

F 3110

Stefan Schäfer, Robert Burgaß

Quantifizierung und Reduzierung von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten im denkmalgeschützten Gebäudebestand

> Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 3110

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0296-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt:

Quantifizierung und Reduzierung von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten im denkmalgeschützten Gebäudebestand

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.50

Technische Universität Darmstadt Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften Institut für Konstruktives Gestalten und Baukonstruktion Prof. Dipl.-Ing. Architekt Stefan Schäfer M.Eng. Robert Burgaß





Der vorliegende Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Forschungsberichtes liegt bei den Autoren. Mitwirkende des Projektes

Projektleitung

Technische Universität Darmstadt Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften Institut für Konstruktives Gestalten und Baukonstruktion Prof. Dipl.-Ing. Architekt Stefan Schäfer Franziska-Braun-Straße 3 64287 Darmstadt

info@kgbauko.tu-darmstadt.de

Wissenschaftliche Bearbeitung

M.Eng. Robert Burgaß

Studentische Mitarbeit

M.Sc. Sandra Jessica Sorge M.Sc. Anna-Lena Fischer M.Sc. Mona Nazari Sam M.Sc. Maximilian Rühl B.Sc. Janek Zindler

Fachliche Betreuung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann M.Sc. Fabian Brodbeck Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (IRB) Nobelstr. 12 70569 Stuttgart

Mittelgeber

Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung Deichmanns Aue 31 – 37 53179 Bonn

Burgaß Bau GmbH Sandfeldstraße 14 17121 Loitz





Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1 Eckdaten des Forschungsprojekts	5
1.2 Zielsetzung und Aufbau des Berichts	5
1.3 Danksagung der Autoren	5
2. Forschungsantrag	6
2.1 Forschungsansatz	6
2.2 Forschungsziele	
2.3 Forschungsmethodik	
3. Untersuchungskonzept 1 – Messen und Auswerten	
3.1 Beschreibung - Versuchsgebäude	14
3.1.1 Anforderungen	14
3.1.2 Formfindung	
3.1.3 Positionierung	
3.1.4 Baukonstruktion	24
3.1.5 Luftdichtheit	
3.2 Beschreibung - Anlagentechnik	
3.2.1 Heizung	
3.2.2 Entfeuchtung	
3.2.3 Monitoring	
3.2.4 Beregnung	55
3.3 Messung - Innenklima	61
3.3.1 Lufttemperatur	61
3.3.2 Luftfeuchtigkeit	64
3.4 Messung - Außenwände	
3.4.1 Lufttemperatur	
3.4.2 Luftfeuchtigkeit	72
3.4.3 Wärmestromdichte	
3.4.4 Oberflächentemperatur	
3.4.5 Feuchteindex	96
3.5 Messung - Außenklima	
3.5.1 Datenanalyse	
3.5.2 Datenkompensation	
3.6 Messung - Stromverbrauch	
3.6.1 Bilanzierung	
3.6.2 Luftentfeuchtung	
3.6.3 Temperaturkorrektur	
3.6.4 Heizphasenverbräuche	
3.6.5 Monatsverbräuche	
3.7 Auswertung - feuchtebedingte Wärmeverluste	
3.7.1 Quantifizierung	
3.7.2 Reduzierung	

4. Untersuchungskonzept 2 – Berechnen und Auswerten	
4.1 Beschreibung - Materialparameter	142
4.2 Beschreibung - Laboruntersuchungen	143
4.2.1 Vorarbeiten	143
4.2.2 Grundkennwerte	148
4.2.3 Hygrothermische Funktionen	158
4.2.4 Approximationsparameter	
4.3 Berechnung - Simulationseingaben	
4.3.1 Simulationszeitraum	
4.3.2 Standort und Klima	
4.3.3 Gebäudegeometrie	
4.3.4 Bauteilaufbau	
4.3.5 Bauteilbezogene Randbedingungen	195
4.3.6 Raumklimatische Randbedingungen	
4.4 Berechnung - Bauteilsimulation	201
4.4.1 Gesamtwassergehalt	201
4.4.2 Feuchtigkeitsverteilung	
4.4.3 Temperaturverteilung	
4.4.4 Wärmestromdichte	210
4.5 Berechnung - Gebäudesimulation	216
4.5.1 Heizwärmebedarf	
4.5.2 Heizleistung	
4.6 Auswertung - feuchtebedingte Wärmeverluste	
4.6.1 Quantifizierung	222
4.6.2 Reduzierung	
5. Vergleich und Handlungsempfehlungen	225
6. Zusammenfassung und Ausblick	239
Literaturverzeichnis	245
Quellenverzeichnis	248
Abbildungsnachweis	253
Tabellennachweis	254
Anhang	255
Anhang 1 - Extremwertanalyse	
Anhang 2 - Windanalyse ganzjährig	
Anhang 3 - Windanalyse Heizphasen	
Anhang 4 - Windschattenanalyse	
Anhang 5 - Thermografische Aufnahmen	
Anhang 6 - Mikrowellenfeuchtemessung	
Anhang 7 - Temperatur-Feuchte-Proiektion	
Anhang 8 - Ziegelsteckbriefe der Pilotstichprobe	
Anhang 9 - Simulationsberechnungen	308
Anhang 10 - Ausführungsplanung	343
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

1. Einleitung

1.1 Eckdaten des Forschungsprojekts

Dieser Abschlussbericht basiert auf dem Forschungsantrag "Quantifizierung und Reduzierung von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten im denkmalgeschützten Gebäudebestand", der im Rahmen des Forschungsprogramms "Forschungsinitiative Zukunft Bau", Antragsrunde 2014, vom Institut für Konstruktives Gestalten und Baukonstruktion der Technischen Universität Darmstadt eingereicht wurde. Der Antrag beschreibt die Forschungsstrategie, feuchtigkeitsbedingte Wärmeverluste bei historischen Außenwänden aus einschaligem Ziegelmauerwerk anhand von Freilandversuchen und Simulationsberechnungen zu untersuchen. Die Freilandversuche in Form von 5 Versuchsgebäuden wurden in Kooperation mit dem Forschungspartner "Burgaß Bau GmbH" entwickelt und umgesetzt. Nach einer Überarbeitungsphase des Forschungsantrags in der auch eine inhaltliche Abstimmung mit dem Forschungsvorhaben: "Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude" (Projektnummer: SWD-10.08.18.7-15.26) erfolgte, wurde das Forschungsprojekt in einem Umfang von 244.120,33 € am 29.09.2015 bewilligt (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.50). Die Laufzeit des Projektes belief sich auf 31 Monate, gezählt ab dem 01.10.2015 bis zum 30.04.2018.

1.2 Zielsetzung und Aufbau des Berichts

Mit diesem Abschlussbericht wird die Zielsetzung verfolgt, die Planung, die Durchführung und die Auswertung des Forschungsprojektes detailliert zu dokumentieren. Die dabei erzielten Ergebnisse werden in den beiden Hauptkapiteln zu den angewendeten Untersuchungskonzepten sukzessive dargelegt und jeweils am Kapitelende im Rahmen einer Auswertung zusammengefasst. Für einen nachvollziehbaren Einstieg in den Bericht erfolgt im ersten Schritt die Beschreibung der wichtigsten inhaltlichen Schwerpunkte des Forschungsantrags. Dabei wird Bezug genommen auf die bauliche Ausgangssituation in Deutschland insbesondere in Hinblick auf die energetische Ertüchtigung von klassischen Bestandsgebäuden und Baudenkmälern. Der sich daraus ableitende Forschungsansatz, die Forschungsziele und Forschungsmethodik werden ebenso vorgestellt. Darauf aufbauend wird mit dem zweiten Schritt auf das "Untersuchungskonzept 1 - Messen und Auswerten" eingegangen. Hier erfolgt die Beschreibung der 5 Versuchsgebäude mit Hinweisen zur geometrischen Konzeption der Baukörper, zur konstruktiven Umsetzung der thermischen Gebäudehüllen und zur verbauten Anlagentechnik. Daraufhin werden die inner- und außerhalb der Versuchsgebäude durchgeführten Messungen vorgestellt und die damit gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Der dritte Schritt dieses Berichtes beinhaltet das "Untersuchungskonzept 2 - Berechnen und Auswerten". Darin wird zunächst dargelegt, wie die Materialparameter für die Außenwände der Versuchsgebäude bestimmt und im Rahmen der Bauteil- sowie Gebäudesimulationen abgebildet wurden. Anschließend erfolgen die Ergebnisdarstellung, der Vergleich mit den Messergebnissen und die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Praxis. Der vierte Schritt beinhaltet die Zusammenfassung aller wichtigen Ergebnisse der Untersuchungskonzepte und gibt einen Ausblick auf weiteres Forschungspotential.

1.3 Danksagung der Autoren

Für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes und die damit verbundene Zusammenarbeit sei an dieser Stelle dem "Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung" sowie der "Burgaß Bau GmbH" vielmals gedankt.

2. Forschungsantrag

2.1 Forschungsansatz

In Zeiten der Energiewende mit hohen politischen Anforderungen an eine umweltschonende Energieversorgung und -nutzung kommt dem Gebäudebestand eine besondere Bedeutung zu. So entfiel im Jahr 2015 ein Anteil von 35 % des deutschlandweiten Endenergieverbrauchs für Raumwärme, Warmwasser, Beleuchtung und Klimakälte auf den Gebäudebestand. Insbesondere Wohngebäude haben eine hohe Beteiligung an dem Gesamtendenergieverbrauch, die sich auf etwa 21,9 % beläuft. Trotz dieser Rahmenbedingungen erfolgt die energetische Ertüchtigung des Bestands nur langsam. Besonders deutlich wird dies an jenen Wohngebäuden, die noch vor 1979 errichtet wurden und mit 68 % den Großteil des Endenergieverbrauchs im Wohngebäudebestand ausmachen. Diese Gebäude wurden bisher nur zu einem Hüllflächenanteil von insgesamt 25 bis 30 % energetisch ertüchtigt und stellen somit einen großen Wirkungshebel dar, um den deutschlandweiten Endenergieverbrauch zu reduzieren.¹

Aus monetärer Sicht zeichnet sich ein ähnliches Bild. So wurden im Jahr 2015 mit 130,8 Mrd. Euro etwa 69,2 % der Wohnungsbauleistungen im Bestand erbracht.² Davon beziehen sich wiederum 36,4 Mrd. Euro auf die Durchführung von Ertüchtigungsmaßnahmen an energetisch relevanten Bauteilen der Gebäudehülle und Anlagentechnik.³ Zum Erreichen der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung, die in deren Energiekonzept von 2010 festgelegt wurden, sind diese Investitionen in den Gebäudebestand jedoch zu gering.⁴ Um die avisierte Sanierungsrate von 2 % zu erreichen, werden bis zum Jahr 2020 zusätzliche Investitionen von 10 bis 13 Mrd. Euro pro Jahr erforderlich.⁵ Unter Berücksichtigung der weltweit steigenden Energienachfrage und dem damit einhergehenden Anstieg der Energiepreise lassen diese Rückstände erwarten, dass der Umfang an energetischen Ertüchtigungsmaßnahmen zukünftig noch steigen wird.

Baurechtlich ausgenommen von dieser Entwicklung sind lediglich Baudenkmäler und besonders erhaltenswerte Bausubstanz, deren Erscheinungsbild gemäß §24 der Energieeinsparverordnung nicht beeinträchtigt werden darf.⁶ Dennoch können sich diese Bauwerke den heutigen energetischen Anforderungen und den Fragen zur Energieeffizienz nicht gänzlich entziehen. Im Gegenteil, für den Erhalt jener besonders schützenswerter Bausubstanz sind eine dauerhafte Nutzung und die damit verbundene Pflege unabdingbar.⁷ Dies bedeutet, dass denkmalgeschützte Wohngebäude trotz steigender Energiekosten auch zukünftig mit vertretbarem finanziellem Aufwand betrieben werden müssen. Um ein solches Ziel umsetzen zu können, ist die Suche nach Ertüchtigungskonzepten, die zu einer Verbesserung des Wärmeschutzes führen, ohne die geistige Botschaft der Bausubstanz zu beeinflussen, eine wichtige Herausforderung für die Forschung im Bereich "Bauen im Bestand".

¹ DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2016, S. 31, 42, 43, 46, 100

² GORNIG 2017, S. 34

³ BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG 2016, S.6

⁴ BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE 2010, S. 5

⁵ BLAZEJCAK 2013, S. 24

⁶ ENEV 2016, §24, Abs. 1

⁷ ICOMOS 2012, S. 47

Die Notwendigkeit dieser Ertüchtigungskonzepte und der damit einhergehende Forschungsbedarf zeichnen sich vor allem durch die hohe Leerstandsquote bei Wohnungen in Altbauten ab (Baujahr vor 1979). So zeigen Mikrozensuserhebungen aus den Jahren 2006, 2010 und 2014, dass in den neuen Bundesländern 11 bis 13 % der Altbau-Wohnungen unbewohnt waren.⁸ Zugleich können ca. 94 % der denkmalgeschützten Gebäude diesen Altbauten zugeordnet werden. Es liegt daher nahe, dass ein ähnlich hoher Anteil der Baudenkmäler von Leerstand und dem damit verbundenen Verfall betroffen ist.⁹ Hervorgerufen wird diese Situation vor allem durch die Bevölkerungsverluste der neuen Bundesländer, als ein Resultat von Abwanderung und niedrigen Geburtenraten.¹⁰ Aber auch hohe Instandhaltungs- sowie Betriebskosten, verbunden mit strengen denkmalpflegerischen Anforderungen, stellen häufig eine unbefriedigende Ausgangslage für Eigentümer und Investoren dar.

Werden dennoch Ertüchtigungsmaßnahmen durchgeführt, so kommen bei Außenwänden in der Regel klassische Systeme mit einer nachträglichen Wärmedämmung zum Einsatz. Allerdings sind Außen- und Innendämmungen nur selten kompatibel mit Stuckaturen oder Verkleidungen auf den Oberflächen von Umfassungswänden (siehe Abb. 1). Mit den resultierenden baukonstruktiven und bauphysikalischen Problemen kommt es daher häufig zu einem unwiederbringlichen Verlust von historischer Bausubstanz und deren geschichtlichem Zeugnis. Diesen Rahmenbedingungen begegnet das Forschungsprojekt, indem sich dessen Schwerpunkte nicht mit der energetischen Optimierung von Außenwänden mittels einer nachträglichen Außen- oder Innendämmung befassen, sondern mit der Reduzierung des Wärmetransports unmittelbar im Porengefüge des Ziegels. Dieser Ansatz, der sich grundlegend von der klassischen Ertüchtigungsstrategie mit zusätzlichen Wärmedämmstoffen unterscheidet, würde nicht nur für historische Gebäude mit aufwändig gestalteten Putzfassaden, sondern auch für Bestandsgebäude mit Ziegelsichtmauerwerk (siehe Abb. 2) eine neue Möglichkeit zur energetischen Ertüchtigung darstellen.



Abb. 1 - Mit Stuckaturen verzierte Giebelhäuser in der Mönchstraße von Stralsund, A1



Abb. 2 - Historisches Speichergebäude (Wohnnutzung) in der Gützkower Landstraße von Greifswald, A1

⁸ STATISTISCHES BUNDESAMT 2006, S. 28

Vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT 2010, S. 47; STATISTISCHES BUNDESAMT 2014, S. 58

⁹ INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH 2010, S. 58

¹⁰ BERLIN-INSTITUT FÜR BEVÖLKERUNG UND ENTWICKLUNG 2011, S. 5, 6 Vgl. BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG 2015, S.7

Zur weiteren Verdeutlichung des Forschungsansatzes ist an dieser Stelle der Transport von Wärme im Allgemeinen näher zu erläutern. Dieser ist ein Energietransport, der durch die Mechanismen Wärmeleitung, Wärmemitführung mittels Konvektion und Wärmestrahlung erfolgen kann. Je nach Beschaffenheit der thermischen Gebäudehülle können diese Übertragungsmechanismen jeweils mit unterschiedlichen Anteilen überlagernd auftreten. Mit Blick auf historische Bauwerke, bei denen eine nachträgliche Außen- oder Innendämmung zur Ertüchtigung einer mäßig dämmenden Hülle nicht umgesetzt werden kann, stellt sich die Frage, welche Faktoren die Wärmeübertragung über die Umfassungswände prägen und wie diese positiv beeinflusst werden können.

An erster Stelle sind die konvektionsbedingten Wärmeverluste zu benennen, die bereits heute im Rahmen von Differenzdruck-Messungen (Blower-Door-Tests) effektiv detektiert und mit einfachen Mitteln (z.B. nachträglicher Austausch von Fensterdichtungen) behoben werden können. Für die Forschung sind diese somit von einem geringeren Interesse. Die Reduzierung strahlungsbedingter Wärmeverluste stellt sich jedoch deutlich schwieriger dar. Ohne den Einbau wärmereflektierender Stoffe auf der innenseitigen Oberfläche der Umfassungswände kann kaum Einfluss auf diese Art der Wärmeverluste genommen werden. Im Gegensatz dazu zeichnet sich aber bei den leitungsbedingten Wärmeverlusten ein deutlich höheres Forschungspotential ab.

Da sich diese bei porösen Baustoffen sowohl auf den Feststoffanteil als auch auf den Porenraum beziehen, gibt es verschiedene Einflussfaktoren, die deren Wirkungsumfang erheblich beeinflussen. Neben der Ausbildung des Porenraums mit Art, Größe und Anordnung der Poren, sind vor allem die Feuchtigkeit und die Temperatur entscheidende Größen für die Höhe der Wärmeleitfähigkeit von porösen Baustoffen. Besonders deutlich wird dies anhand der Wärmeleitfähigkeit von Wasser, die je nach Aggregatzustand 23- bis 90-fach höher ist, als jene von Luft (bei 20 °C). Wird beispielsweise die in Außenwandziegeln von Sichtmauerwerk (siehe Abb. 2) enthaltene Porenluft aufgrund von Schlagregeneinwirkungen verdrängt, so führt dies zu einer signifikanten Änderung der *effektiven Wärmeleitfähigkeit*¹¹ des Außenwandmaterials (siehe Abb. 3).



Abb. 3 - Zunahme des Wärmetransports in Abhängigkeit vom Medium im Porenraum, A1

¹¹ Die Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe wird laut CAMMERER 1995, S. 26 und 37 als effektive Wärmeleitfähigkeit bezeichnet, da sich diese aus der Summe nachfolgender Einzelanteile zusammensetzt: Wärmeleitung im Feststoffgerüst, Wärmeleitung in den gasgefüllten Porenräumen, Strahlungsaustausch zwischen den Porenwandungen und Konvektion innerhalb der Poren.

Von besonderer Relevanz ist in diesem Zusammenhang die Porendiffusion (Latentwärmeeffekte). Dabei handelt es sich um einen Energietransport, der im Porenraum eines porösen Stoffes durch Feuchtigkeitsbewegungen mit Enthalpieänderung¹² verursacht wird und bereits bei einem geringen Wassergehalt die äquivalente Wärmeleitfähigkeit¹³ der Porenluft stark erhöht. Voraussetzung für den Wärmetransport ist, dass die Porenwandungen ganz oder teilweise mit Wasser benetzt sind und ein Temperaturgefälle innerhalb des Stoffes vorliegt. Diese hygrothermische Situation hat zur Folge, dass Feuchtigkeit an den wärmeren Porenwandungen unter Aufnahme von Wärme verdunstet und an den kälteren Porenwandungen unter Abgabe von Wärme wieder kondensiert (siehe Abb. 4).¹⁴



Abb. 4 - Schematische Darstellung der Porendiffusion (Latentwärmeeffekte) bei einem Ziegel, A1

Je nachdem, ob der Stoff einen hygroskopischen¹⁵ oder überhygroskopischen¹⁶ Feuchtigkeitszustand aufweist, wird das Wasser an den Porenwandungen adsorbiert oder es verstärkt bereits vorhandene Wasserschichten. In Abhängigkeit von der Porenstruktur und dem Benetzungsgrad wird das Wasser durch Oberflächendiffusion oder Kapillarleitung zur nächsten Pore weitergeleitet, in der sich der Vorgang wiederholen kann.¹⁷

¹² Laut CAMMERER 1995, S. 94 ist die Enthalpie (auch Wärmeinhalt genannt) als eine thermodynamische Größe definiert, die zur Kennzeichnung des Energiezustands eines Stoffes oder eines Stoffsystems dient. Sie setzt sich zusammen aus der inneren Energie und der Volumenarbeit des Stoffes. Eine Enthalpieänderung findet z.B. beim Verdampfen von Wasser oder bei der Tauwasserbildung statt und stellt dabei die Differenz zwischen der Enthalpie des Dampfes und der Enthalpie der Flüssigkeit dar (Verdampfungsenthalpie). In der Bauphysik sind genau diese Enthalpieänderungen von besonderem Interesse, da hier Wärme freigesetzt oder aufgenommen wird.

¹³ Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit fasst laut CAMMERER 1995, S. 45 die Wärmetransportvorgänge "molekulare Wärmeleitfähigkeit der Porenluft", "Wärmemitführung oder -konvektion der Porenluft" und "Wärmestrahlung zwischen Porenwandungen" durch einen Wärmeleitungsvorgang in einem homogenen Ersatzstoff zusammen.

¹⁴ CAMMERER 1995, S. 71 - 72

¹⁵ Laut WILLEMS 2013, S. 172 - 173 beschreibt der hygroskopische Feuchtigkeitsbereich (auch als Sorptionsfeuchtebereich bezeichnet) die Wassergehalte eines porösen Stoffes, die sich nach längerer Lagerung in Luft konstanter Luftfeuchte und Temperatur einstellen (Gleichgewichtsfeuchten). Die obere Grenze des hygroskopischen Feuchtigkeitsbereichs liegt bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %. Bis zu dieser Grenze erfolgt der Feuchtigkeitstransport vor allem durch Dampfdiffusionsvorgänge (z.T. auch Oberflächendiffusion) und die Speicherung von Feuchtigkeit durch Adsorptionsvorgänge.

¹⁶ Laut WILLEMS 2013, S. 172 - 182 beschreibt der überhygroskopische Feuchtigkeitsbereich (umfasst den Kapillarwasserbereich und Übersättigungsbereich) die Wassergehalte eines porösen Stoffes, die größer sind als dessen Gleichgewichtsfeuchte bei 95 % relativer Luftfeuchtigkeit. Ab dieser Gleichgewichtsfeuchte ist das Porensystem des Stoffes bereits so stark mit Wasser befrachtet, dass der Feuchtigkeitstransport über Kapillarleitung erfolgen kann.

¹⁷ CAMMERER 1995, S. 72

Verdeutlichen lässt sich der Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt und Wärmeleitfähigkeit anhand einfacher Laboruntersuchungen. Im Jahr 1984 wurde diesbezüglich ein Forschungsbericht veröffentlicht, der die bis dahin bekannten Ergebnisse zur Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Baustoffe zusammenfasst und grafisch auswertet.¹⁸ Daraus geht hervor, dass insbesondere Ziegel mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt durch einen sehr starken Anstieg der Wärmeleitfähigkeit gekennzeichnet sind (siehe Abb. 5). So weist z.B. ein Ziegel mit der Rohdichte von 1.556 kg/m³ bei einer Mitteltemperatur von 10 °C und einem volumenbezogenen Feuchtigkeitsgehalt von 0 % eine Wärmeleitfähigkeit von 0,463 W/(mK) auf (siehe Abb. 6). Steigt der Feuchtigkeitsgehalt auf 20 % und anschließend auf 40 % an, so geht dies mit einer Veränderung der Wärmeleitfähigkeit auf ca. 0,82 W/(mK) bzw. 1,22 W/(mK) einher (siehe Abb. 6).¹⁹ Das entspricht einer Reduzierung des Wärmedurchlasswiderstands um ca. 43,54 % bei 20 % volumenbezogenem Feuchtigkeitsgehalt und um ca. 62,10 % bei 40 % volumenbezogenem Feuchtigkeitsgehalt.





Abb. 5 - Werte der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Ziegel in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt, A2

Abb. 6 - Werte der Wärmeleitfähigkeit eines ausgewählten Ziegels in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt, A2

Ein weiterer wichtiger Faktor, der die effektive Wärmeleitfähigkeit von feuchten Ziegeln beeinflusst, sind Temperaturen unterhalb von 0 °C. Diese führen im Porenraum zur Bildung von sogenannten Reifkristallen oder Eis, je nachdem in welchem Aggregatzustand (flüssig oder gasförmig) die im Ziegel vorhandene Feuchtigkeit ausfriert. Laut CAMMERER entspricht die Wärmeleitfähigkeit von Reif bei einer Temperatur von 0 °C und einer Rohdichte von 100 kg/m³ in etwa 0,09 W/(mK).²⁰ Diese steigt mit einer zunehmenden Reifdichte an, bis der λ -Wert von Wasser mit 0,598 W/(mK)²¹ und anschließend von Eis mit 2,20 W/(mK)²² erreicht ist. Dies zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit infolge Reifbildung nur gering ansteigt, wohingegen die Bildung von Eis bzw. Eisbrücken deutlich stärkere Auswirkungen auf den Wärmetransport hat.

¹⁸ ACHTZIGER 1984, S. 1 - 239

¹⁹ ACHTZIGER 1984, S. 161 - 163

²⁰ CAMMERER 1995, S. 90

²¹ VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2013, S. 176

²² CAMMERER 1995, S. 90

Auch Laboruntersuchungen an Ziegeln mit einer Rohdichte von 1.880 kg/m³ und unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt bestätigen, dass die Wärmeleitfähigkeit bei Temperaturen unterhalb von 0 °C umso stärker zunimmt, je größer die Stofffeuchte ist (siehe Abb. 7).²³ So weisen die Ziegel in einem trockenen Zustand sowohl bei 10 °C als auch bei -10 °C nahezu die gleiche Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,6 W/(mK) auf. Bei einem volumenbezogenen Feuchtigkeitsgehalt von 29,7 % kommt es aber zu einem sprunghaften Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von ca. 1,37 W/(mK) bei 10 °C (siehe Abb. 8). Das entspricht einer temperaturbedingten Reduzierung des Wärmedurchlasswiderstands um ca. 23,47 %.



Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kombination der zuvor beschriebenen bauphysikalischen Zusammenhänge (siehe Abb. 3 und Abb. 4) und Laboruntersuchungen (siehe Abb. 6 und Abb. 8) die Bedeutung von Feuchtigkeit und Temperatur für das Bauen im historischen Gebäudebestand aufzeigt. Gerade hier liegen häufig Wandkonstruktionen vor, die durch einen mangelhaften oder fehlenden Feuchteschutz und durch starke Schwankungen der Bauteiltemperaturen gekennzeichnet sind. Die Reduzierung der Feuchte- und Temperaturbeanspruchungen von Umfassungswänden würde somit die realistische Chance mit sich bringen, auch ohne Wärmedämmstoffe, eine effiziente energetische Modernisierung durchführen zu können. Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang die hydrophobierenden Fassadenimprägnierungen (Hydrophobierungen) und die hydrophob eingestellten Fassadenfarben. Diese bieten die Möglichkeit die Regenwasserabsorption über die Außenoberfläche von Umfassungswänden zu reduzieren, ohne das Erscheinungsbild der Fassaden zu beeinflussen. Beide Maßnahmen sind bautechnologisch einfach umzusetzen und lassen an Bestandsgebäuden geringere Feuchtigkeitsgehalte der Außenwände erwarten, die wiederum mit einer Erhöhung des Wärmedurchlasswiderstands einhergehen. Dieser Zusammenhang stellt den Forschungsansatz und somit den wesentlichen Kern des Forschungsprojektes dar.

²³ KRISCHER 1978, S. 279 - 280

2.2 Forschungsziele

Auf Grundlage des Forschungsansatzes werden 2 Zielsetzungen abgeleitet:

- 1. Quantifizierung der energetischen Auswirkungen von Feuchtigkeit in Außenwänden, die aus einschaligem Ziegelmauerwerk bestehen (insbesondere Mauerwerksfeuchtigkeit)
- 2. Untersuchung von feuchtigkeitsreduzierenden Maßnahmen bei einschaligen Außenwänden aus Ziegelmauerwerk hinsichtlich deren energetischen Auswirkungen

Im Rahmen der ersten Zielsetzung sollen die nachfolgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- 1. Wie groß ist der Feuchtigkeitseinfluss auf deren Wärmestromdichte?
- 2. Wie groß ist der Feuchtigkeitseinfluss auf deren Wärmedämmeigenschaften?
- 3. Wie groß ist der Feuchtigkeitseinfluss auf deren Transmissionswärmeverluste?
- 4. Wie groß ist der Feuchtigkeitseinfluss auf deren Bauteiltemperaturen?
- 5. Wie groß ist der Feuchtigkeitseinfluss auf den Energieaufwand zum Beheizen?

Die zweite Zielsetzung beinhaltet die Bearbeitung der beiden nachfolgenden Fragestellungen:

- 1. Welcher zusätzliche Wärmeschutz ist mit feuchtigkeitsreduzierenden Maßnahmen in Form von Hydrophobierungen und hydrophoben Fassadenfarben verbunden?
- 2. Welche Handlungsempfehlungen können zur energetischen Ertüchtigung von historischen Bestandsgebäuden mittels feuchtigkeitsreduzierender Maßnahmen gegeben werden?

2.3 Forschungsmethodik

Zum Erreichen der beiden zuvor genannten Forschungsziele kamen zwei Untersuchungskonzepte zur Anwendung. Im Rahmen des "Untersuchungskonzeptes 1 - Messen und Auswerten" wurden 5 Versuchsgebäude mit der gleichen Kubatur errichtet und mittels Wärme- und Feuchtemonitoring über 4 Heizphasen der Jahre 2016 und 2017 überwacht. Unterschiedliche Wandaufbauten sowie die künstliche Beregnung eines Versuchsgebäudes sind dabei berücksichtigt worden (siehe Abb. 9).



Abb. 9 - Schema des Versuchsaufbaus im Rahmen des Untersuchungskonzepts 1, A1

Die Außenwände der Versuchsgebäude bestehen in der Grundkonfiguration aus einem einschaligen Ziegelmauerwerk mit Innenputz (siehe Abb. 10). Aufbauend auf diese Grundkonfiguration wurden Materialschichten individuell je Versuchsgebäude ergänzt. So erhielt das Versuchsgebäude 2 eine hydrophobierende Imprägnierung (Hydrophobierung) der Fassaden, das Versuchsgebäude 3 einen Außenputz mit hydrophob eingestellter Fassadenfarbe (siehe Abb. 11) und das Versuchsgebäude 4 eine Innendämmung aus Calciumsilikatplatten. Lediglich die Versuchsgebäude 1 und 5 wurden in der Grundkonfiguration mit ziegelsichtigem Mauerwerk erstellt (siehe Abb. 10). Letzteres ist zudem durch eine Beregnungsanlage aktiv mit Wasser benetzt worden. Der Vergleich der Messergebnisse des Wärme- und Feuchtemonitorings für die Außenwände der Versuchsgebäude ermöglicht nun die Quantifizierung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmestromdichte, Wärmedämmeigenschaften und Transmissionswärmeverluste. Damit geht einher, dass auch die energetischen Auswirkungen von feuchtigkeitsreduzierenden Maßnahmen (Hydrophobierung und hydrophobe Fassadenfarbe) ermittelt und deren Wärmeschutzpotential eingeschätzt werden können. Unter Einbeziehung des gemessenen Energieverbrauchs zum Beheizen der 5 Versuchsgebäude sind zudem gebäudebezogen Rückschlüsse hinsichtlich der energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit möglich.



Abb. 10 - Visualisierung des Versuchsgebäudes 1 mit Ziegelsichtmauerwerk, A1



Abb. 11 - Visualisierung des Versuchsgebäudes 3 mit Außenputz und hydrophober Fassadenfarbe, A1

Ergänzend zu den Freilandversuchen des "Untersuchungskonzeptes 1 - Messen und Auswerten" erfolgen im Verlauf des "Untersuchungskonzeptes 2 - Berechnen und Auswerten" für alle baulich realisierten Außenwandkonstruktionen der Versuchsgebäude hygrothermische Bauteilsimulationen. Unter Anwendung der am Versuchsstandort erfassten Wetterdaten sind der Gesamtwassergehalt, der Wassergehalt des Mauerwerks, die Feuchtigkeits- und Temperaturverteilung im Mauerwerk, die Wärmestromdichte und die instationären U-Werte für die am stärksten bewitterte Außenwand West zu berechnen. Ebenso erfolgt die Berechnung des Heizwärmebedarfs für alle Versuchsgebäude über die hygrothermische Gebäudesimulation. Durch die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse für die jeweiligen Versuchsgebäude können nun bauteil- und gebäudebezogen Rückschlüsse auf die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit und von Maßnahmen zur Reduzierung von Mauerwerksfeuchtigkeit gezogen werden. Auf Grundlage der Mess- und Berechnungsergebnisse beider Untersuchungskonzepte lassen sich daraufhin Handlungsempfehlungen zur energetischen Ertüchtigung von Bestandsgebäuden mittels feuchtigkeitsreduzierenden Maßnahmen ableiten.

3. Untersuchungskonzept 1 - Messen und Auswerten

3.1 Beschreibung - Versuchsgebäude

3.1.1 Anforderungen

Bei allen Versuchsgebäuden war die thermische Gebäudehülle durch baukonstruktive Maßnahmen dahingehend zu optimieren, dass die durch Feuchtigkeit verursachten Transmissionswärmeverluste der Umfassungswände möglichst unverfälscht und in einem breiten Spektrum untersucht werden konnten. Dazu wurden die folgenden Anforderungen an die Versuchsgebäude gestellt und in den Abschnitten 3.1.2 Formfindung bis einschließlich 3.1.5 Luftdichtheit konkretisiert:

- 1. Durch eine möglichst große Außenwandoberfläche soll der Anteil der feuchtigkeitsbedingten Transmissionswärmeverluste an den gesamten Wärmeverlusten eines jeden Versuchsgebäudes maximiert werden.
- Transmissionswärmeverluste über die Dach- und Bodenfläche sollen durch einen Bauteilaufbau im Passivhausstandard, d.h. mit einem stationären U-Wert von unter 0,15 W/(m²K), reduziert werden. Diese Anforderung gilt ebenso für die Eingangstür.
- 3. In den Anschlussbereichen von der Bodenplatte an die Umfassungswände und vom Flachdach an die Umfassungswände ist durch baukonstruktive Maßnahmen zu gewährleisten, dass der Wärmeverlust nicht höher ist, als in den homogenen Wandbereichen.
- 4. Die thermische Gebäudehülle ist luftdicht auszuführen und darf einen n_{50} -Wert von 0,6 h⁻¹ nicht überschreiten. Das Flachdach und die Bodenplatte sind zusätzlich durch eine innenliegende dampfdichte Schicht ($s_d \ge 1.500$ m) vor dem Eindiffundieren von Wasserdampf zu schützen.
- 5. Der Wassergehalt der Umfassungswände soll nur aus Baufeuchte des Mauerwerks, Niederschlag in allen Formen, Wasserdampf und aktiver Beregnung (ausschließlich beim Versuchsgebäude 5) resultieren. Alle weiteren Feuchtigkeitseinwirkungen sind zu vermeiden.
- 6. Die durch Niederschlag auf die Außenwandoberfläche treffende Feuchtigkeitsmenge soll weder durch Maßnahmen des konstruktiven Feuchteschutzes, noch durch die ungünstige Anordnung oder Ausrichtung der Baukörper auf den Versuchsfeldern reduziert werden.



Abb. 12 - Grafische Darstellung der Anforderungen, A1

3.1.2 Formfindung

Die Kubatur der 5 Versuchsgebäude wurde im Rahmen der Antragsphase des Forschungsprojektes zunächst überschlägig mit einem *effektiven Volumen*²⁴ von 30 m³ und den folgenden Abmessungen festgelegt: Länge (L) = 4,00 m, Breite (B) = 3,00 m und lichte Raumhöhe (H) = 2,50 m.

Dabei ist das Ziel verfolgt worden, einen kleinen Wohnraum abzubilden, der einfach begehbar und groß genug ist, um die gesamte Heizungs-, Luftentfeuchtungs- und Monitoringtechnik zu fassen. Gleichzeitig sollten die Versuchsgebäude mit einem vertretbaren Kosten- bzw. Personalaufwand des Forschungspartners (Burgaß Bau GmbH) gebaut werden können.

Dabei stellte sich allerdings die Frage, wie die Kubatur der Versuchsgebäude optimiert werden kann, um die Transmissionswärmeverluste über die Außenwände zu maximieren und über das Dach sowie die Bodenplatte zu minimieren. Von besonderer Bedeutung ist hier die Fläche der jeweiligen Bauteile. Je größer diese wird, desto größer werden bei konstanten Wärmedämmeigenschaften die Transmissionswärmeverluste. Daher wurde bezüglich der Kubatur der Versuchsgebäude eine große Mantelfläche, aber eine kleine Grund- und Deckfläche angestrebt.

Bei Quadern stellt die Variable mit dem größten Einfluss auf die Mantelfläche, ohne dabei die Grund- und Deckfläche zu vergrößern, die Höhe H dar (siehe Abb. 13). Unter Beachtung dieser Bedingung (H = maximal) war nun rechnerisch zu ermitteln, bei welchem Verhältnis von Länge zu Breite, die Mantelfläche den größtmöglichen Wert annimmt (siehe Anhang 1 - Extremwertanalyse). Daraus ging hervor, dass das Maximum erreicht wird, wenn die Differenz zwischen Länge L und Breite B möglichst groß ist. Quader bei denen die Länge L gegen ∞ und die Breite B gegen 0 gehen, stellen somit den Idealfall dar. Die kleinste Mantelfläche ergibt sich hingegen bei quadratischen Grundrissen (L = B), wenn sich das Volumen nicht verändert und H = maximal ist (siehe Abb. 14).



Abb. 13 - Einfluss der Höhe des Körpers auf die Deckfläche (A_D) und die Mantelfläche (A_M), A1

Abb. 14 - Kubatur mit maximaler und minimaler Mantelfläche bei gleichem Volumen, A1

²⁴ Das effektive Volumen ergibt sich aus der Grundfläche (Außenmaßbezug) und der lichten Raumhöhe.

Der Zusammenhang zwischen der Mantelfläche und den Kantenlängen (L und B) spiegelt sich auch in dem nachfolgenden Diagramm wider (siehe Abb. 15). Es wird deutlich, dass bei einem Verhältnis von L zu B kleiner 1 und L zu B größer 1 die Mantelfläche zunimmt.



Abb. 15 - Abhängigkeit von Mantelfläche und Verhältnis L zu B bei einer lichten Raumhöhe von 2,5 m, A1

Auf Grundlage der rechnerisch ermittelten Erkenntnisse und der Zielsetzung möglichst realitätsnahe Raumverhältnisse abbilden zu können, wurde für die 5 Versuchsgebäude die lichte Raumhöhe auf 2,75 m vergrößert. Dieses Maß ist das arithmetische Mittel der Werte 2,50 m und 3,00 m, die im Gebäudebestand i.d.R. Grenzwerte für die Deckenhöhe darstellen. Um die Mantelfläche weiter zu optimieren, wurde die ursprüngliche Breite von 3,00 m auf 2,5 m reduziert. Aus Sicht der Autoren stellt dieses Maß einen sinnvollen Kompromiss zwischen einer großen Mantelfläche, Nutzbarkeit des Innenraums für die Anlagentechnik und realistischen Raumverhältnissen dar. Die Länge der Versuchskörper von 4,36 m ergibt sich dann aus dem effektiven Volumen von 30 m³, der lichten Raumhöhe von 2,75 m und der Breite von 2,50 m. Da jedoch für die Umfassungswände Ziegel im Reichsformat (25 cm x 12 cm x 6,5 cm) verwendet werden sollten, waren die Abmessungen noch einmal zu optimieren, sodass sich folgende Mauerwerksmaße ergaben:

- Länge (L) = 4,41 m, Breite (B) = 2,46 m, lichte Raumhöhe (H) = $2,77^5$ m.²⁵

Durch diese Herangehensweise konnte die Größe der Mantelfläche (Umfassungswände) bei einem nahezu gleichen effektiven Volumen ($30,11 \text{ m}^3$) um 8,94 % von 35,00 m² auf 38,13 m² gesteigert werden. Gleichzeitig wurde die Deck- und Grundfläche (Dach und Bodenplatte) um 9,58 % von 12,00 m² auf 10,85 m² reduziert (siehe Abb. 16).



Abb. 16 - Gegenüberstellung von ursprünglicher und optimierter Kubatur der Versuchsgebäude, A1

²⁵ Die lichte Raumhöhe bezieht sich auf den Abstand zwischen der Oberkante der horizontalen Abdichtung (1. Lage auf der Bodenplatte) und der Oberkante des Mauerwerks (siehe Anhang 10 - Ausführungsplanung).

3.1.3 Positionierung

Die Versuchsgebäude wurden auf dem Firmengelände des Forschungspartners (Burgaß Bau GmbH) errichtet (siehe Abb. 18). Dieses befindet sich in der Sandfeldstraße 14, der Ortschaft 17121 Loitz (Mecklenburg-Vorpommern, Gemarkung Loitz, Flur 21, siehe Abb. 17).



Abb. 17 - Geografische Lage der Ortschaft Loitz in Deutschland, A4



Abb. 18 - Firmengelände (rot markiert) der Burgaß Bau GmbH in 17121 Loitz, A5

Für die Versuchsgebäude standen 2 Flächen (siehe Abb. 19) von insgesamt 342 m² zur Verfügung. Die Lage dieser Flächen wurde so ausgewählt, dass eine möglichst geringe Windverschattung und somit auch ein möglichst geringer Schlagregenschutz durch die Umgebungsbebauung gegeben sind. Die Form und Größe der Versuchsflächen resultierte daraus, dass alle Bereiche des Betriebsgeländes weiterhin erschlossen werden konnten und gleichzeitig die Anordnung der Versuchsgebäude mit einer minimalen gegenseitigen Windverschattung möglich war. Ein Lageplan zur Verdeutlichung der baulichen Situation befindet sich im Anhang 10 - Ausführungsplanung.



Abb. 19 - Lage und Abmessungen der Versuchsfelder (Plan ist genordet), A1

Ausrichtung

Um den Einfluss von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten in einem möglichst großen Spektrum abbilden zu können, waren die Versuchsgebäude so auszurichten, dass die Umfassungswände einer hohen Feuchtigkeitsbelastung durch Schlagregen ausgesetzt sind. Da es sich bei Schlagregen immer um eine kombinierte Einwirkung aus Regen- und Windereignis handelt, wurde für den Standort des Versuchsfeldes eine Windanalyse durchgeführt. Über den Deutschen Wetterdienst konnte von der nächstgelegenen Wetterwarte in Greifswald (siehe Abb. 20) die Windrichtung als Stundenmittel für 10 Jahre, d.h. von 2005 bis einschließlich 2014, ausgelesen werden.²⁶



Abb. 20 - Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes im Umfeld von Loitz, A6

Abb. 21 - Darstellung der Einzugsbereiche für die jeweiligen Himmelsrichtungen, A1

Diese Stundenmittelwerte wurden daraufhin jeweils jährlich (2005 bis einschließlich 2014) für 16 Himmelsrichtungen mit einem Einzugsbereich von je 22,5° (siehe Abb. 21) rechnerisch ausgezählt. Dadurch konnte ermittelt werden, wie lange der Wind, in einem ausgewählten Jahr oder über den Zeitraum von 10 Jahren, durchschnittlich aus einer der 16 festgelegten Himmelsrichtungen wehte (siehe Anhang 2 - Windanalyse ganzjährig). Da aber für die Untersuchung feuchtigkeitsbedingter Wärmeverluste die Schlagregeneinwirkung bei hohen Temperaturen von geringerem Interesse ist, wurden im nächsten Schritt die Stundenmittelwerte nicht über ein gesamtes Jahr, sondern lediglich für die Heizphasen eines Jahres ausgezählt.²⁷ Diese jährlichen, aber auf die Heizphasen bezogenen Gesamtwindstunden der 16 Himmelsrichtungen konnten nun für diverse Ausrichtungsvarianten der 5 Versuchsgebäude kombiniert werden (siehe Anhang 3 - Windanalyse Heizphasen). Daraus ging hervor, dass die beiden Himmelsrichtungen Ost und West in den Jahren 2005 bis 2014 durch mehr Gesamtwindstunden gekennzeichnet waren, als andere Richtungskombinationen. Diese Erkenntnis und weitere wichtige Resultate der Windanalyse können den Abbildungen (Abb. 22 bis Abb. 27) entnommen werden.

²⁶ Entfernung Versuchsfeld (17121 Loitz, Sandfeldstraße 14) - Wetterstation (17489 Greifswald, Am St. Georgsfeld 11): 21,70 km Abfrage der Wetterdaten über https://kunden.dwd.de/weste/xl_login.jsp - 27.01.2015 - 29.01.2015

²⁷ Bei der Windanalyse wurden zwei Varianten für die Heizphasen eines Jahres berücksichtigt. Variante 1 bezieht sich auf 9 Heizmonate (01.01. - 31.05. und 01.09. - 31.12.). Variante 2 bezieht sich auf 7 Heizmonate (01.01. - 30.04. und 01.10. - 31.12.).



Abb. 22 - Durchschnittliche Windrichtungsverteilung bezogen auf ein ganzes Jahr, A7



Abb. 24 - Durchschnittliche Windrichtungsverteilung bezogen auf 9 Heizmonate (Variante 1), A7



Abb. 26 - Durchschnittliche Windrichtungsverteilung bezogen auf 7 Heizmonate (Variante 2), A7



Abb. 23 - Richtungskombinationen mit durchschnittlichen Windstunden für ein ganzes Jahr, A7



Abb. 25 - Richtungskombinationen mit durchschnittlichen Windstunden für 9 Heizmonate (Variante 1), A7





Auf Grundlage der ermittelten Hauptwindrichtungen (Ost und West) waren die Versuchsgebäude so auszurichten, dass eine gedachte Gerade, die im Grundriss senkrecht zu den Gebäudediagonalen verläuft, exakt nach Osten und Westen zeigt. Auf diese Weise wurde gewährleistet, dass nicht nur die Längsseiten der Versuchsgebäude eine Ausrichtung entsprechend den Hauptwindrichtungen aufweisen (siehe Abb. 28, linke Seite), sondern auch die Schmalseiten (siehe Abb. 28, rechte Seite). Die größte wirksame Fassadenbreite (Bwirk) zeigt nun in die Richtung, aus der die stärkste Windund voraussichtlich auch die stärkste Schlagregenbelastung erfolgen. Trotz dieser leicht gedrehten Gebäudeausrichtung (bezogen auf die Haupthimmelsrichtungen) werden im weiteren Verlauf der Arbeit die Längsseiten der Versuchsgebäude zur Vereinfachung als Außenwand Ost bzw. West und die Schmalseiten als Außenwand Nord bzw. Süd bezeichnet.



Abb. 28 - Wirksame Gebäudebreite zweier Ausrichtungsvarianten für Wind aus Ost / West (Favorit rechts), A1

Mit der ausgewählten Ausrichtung der Versuchsgebäude geht jedoch auch einher, dass bei der am zweitstärksten vertretenen Windrichtungskombination (ONO-WSW) die wirksame Fassadenbreite kleiner ist (siehe Abb. 29, rechte Seite), als bei einer N-S-Ausrichtung (siehe Abb. 29, linke Seite). Bei der gekoppelten Betrachtung der Windrichtungskombinationen O-W und ONO-WSW war aber wieder die favorisierte Ausrichtungsvariante durch die meisten Windstunden gekennzeichnet.



Abb. 29 - Wirksame Gebäudebreite zweier Ausrichtungsvarianten für Wind aus ONO / WSW (Favorit rechts), A1

Anordnung

Im nächsten Schritt waren die Versuchsgebäude entsprechend der ausgewählten Ausrichtung so auf den Versuchsfeldern zu positionieren, dass diese von den Nachbargebäuden nicht oder nur in einem geringen Umfang vor Schlagregen geschützt werden. Um diese Anforderung umsetzen zu können, war es notwendig, für die Umgebungsbebauung beider Versuchsfelder eine Windschattenanalyse durchzuführen. Dazu wurde auf ein überschlägiges Berechnungsverfahren aus der Fachliteratur²⁸ zurückgegriffen. Mit Hilfe der Höhe des betrachteten Gebäudes (H) und einem Faktor (F), der sich aus dem Verhältnis der wirksamen Gebäudebreite (B) zu Gebäudehöhe (H) ergab, konnte die Länge (x) der Windverschattung berechnet werden (siehe Gl. 1).

	x = F * H	Gl. 1		
Х	Länge der Windverschattung	[m]		
Н	Gebäudehöhe [*]	[m]		
F	Windschutzfaktor**	-		
[*] Gemessen von der Geländeoberkante bis zu ausgewählten Punkten des Daches ^{**} Ermittelt entsprechend Tab. 1				

Der in der Gl. 1 dargestellte Berechnungsansatz beruht darauf, dass die Windschattenlänge eines Gebäudes in etwa der 2- bis 7-fachen Gebäudehöhe (H) entspricht. Ein niedriger Windschutzfaktor von 2 wird für kompakte, allseitig umströmte Gebäude, bei denen das Verhältnis von wirksamer Gebäudebreite (B) zu Gebäudehöhe (H) zwischen 2 und 3 liegt, angewendet. Der Windschutzfaktor von 7 ist hingegen zu verwenden, wenn das betrachtete Bauwerk ein B zu H Verhältnis aufweist, das größer als 30 ist und es an sich nur zu einem Überströmen des Dachs kommt. Die Grenzwerte der dazwischenliegenden Windschutzfaktoren können anhand dieser Vorgaben linear interpoliert werden (siehe Tab. 1).²⁹

Tab. 1 - Windschutzfaktoren entsprechend Gebäudehöhe und wirksamer Gebäudebreite, T1

B / H	B / H	Windschutzfaktor
Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert	
2	3	2
3	9,75	3
9,75	16,5	4
16,5	23,25	5
23,25	30	6
ab 30	-	7

²⁸ FREYMUTH 2002, S. 668

Vgl. ZINDLER 2015, S. 37

²⁹ FREYMUTH 2002, S. 668

Vgl. ZINDLER 2015, S. 37 - 39

Im nächsten Schritt wurden anhand der vor Ort gemessenen Höhen der Umgebungsbebauung die jeweiligen Windschattenflächen für die Hauptwindrichtungen Ost - West bestimmt und daraufhin in einen Lageplan überführt (siehe Abb. 30 und Abb. 31). Die detaillierten Berechnungen können dem Anhang 4 - Windschattenanalyse entnommen werden.







Abb. 31 - Windschattenanalyse für Wind aus Richtung West (Planauszug ist genordet), A1

Auf Grundlage der dabei gesammelten Erkenntnisse konnten die Versuchsgebäude optimal auf den beiden Versuchsfeldern angeordnet werden, sodass sich diese weder gegenseitig "verschatten", noch im Windschattenbereich der Nachbarbebauung liegen (siehe Abb. 32 und Abb. 33).



Abb. 32 - Windschattenanalyse mit Versuchskörper für Wind aus Richtung Ost (Planauszug ist genordet), A1



Abb. 33 - Windschattenanalyse mit Versuchskörper für Wind aus Richtung West (Planauszug ist genordet), A1

Das Versuchsfeld 1 ist mit der dort ausgeführten Bebauung in Abb. 34 dargestellt. Im Vordergrund befindet sich Versuchsgebäude 1 (Außenwände in Grundkonfiguration). Mittig angeordnet ist das Versuchsgebäude 5 (Außenwände aktiv beregnet). Direkt dahinter liegt das Versuchsgebäude 2 (Außenwände mit Hydrophobierung).



Abb. 34 - Versuchsfeld 1 mit den Versuchsgebäuden 1, 5 und 2 (von links nach rechts), A1

Das hintere Versuchsfeld 2 mit dem Versuchsgebäude 4 (Außenwände mit Innendämmung) und dem Versuchsgebäude 3 (Außenwände mit Außenputz und hydrophober Fassadenfarbe) ist auf Abb. 35 dargestellt.



Abb. 35 - Versuchsfeld 2 mit den Versuchsgebäuden 4 und 3 (von links nach rechts), A1

3.1.4 Baukonstruktion

Bodenplatte

Die Bodenplatten der 5 Versuchsgebäude wurden als Stahlbeton-Plattengründung mit einer Dicke von 25 cm auf einer 10 cm starken Sauberkeitsschicht aus Kies ausgeführt. Um den geforderten Passivhausstandard des Bauteils einzuhalten, befindet sich eine 28 cm dicke Perimeterdämmung aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum ($\lambda_{Bem} = 0,035 - 0,036 \text{ W/(mK)}$) unterhalb der Bodenplatte. Zur Reduzierung von Wärmebrückeneffekten wurde im Randbereich zusätzlich eine 5 cm dicke Perimeterdämmung (ebenso XPS-Hartschaumplatten, $\lambda_{Bem} = 0,034 \text{ W/(mK)}$) und ein umlaufendes Mauerfußelement aus Schaumglas ($\lambda_{Bem} = 0,060 \text{ W/(mK)}$) verbaut (siehe Abb. 36 und Abb. 37).³⁰



Abb. 36 - Aufbau der Bodenplatten, A1

Als Trennlage zwischen der unterseitigen Perimeterdämmung und der Stahlbetonplatte kam eine PE-Folie ($s_d \ge 150$ m) zum Einsatz. Der konstruktive Feuchteschutz gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit (z.B. Restfeuchtigkeit aus der Stahlbetonplatte) wurde durch eine horizontale und zweilagige Abdichtung umgesetzt. Die erste und untere Lage der Abdichtung bestand aus einer Elastomerbitumen-Dampfsperrschweißbahn ($s_d \ge 1500$ m) mit der die Anforderungen an einen dampfdichten Bauteilaufbau (siehe Abschnitt 3.1.1 Anforderungen) eingehalten werden konnten. Darüber wurde eine Bitumen-Schweißbahn aufgebracht, die als Trittschutz diente (siehe Abb. 37).³¹



Abb. 37 - Fertiggestellte Bodenplatte des Versuchsgebäudes 1, A1

 $^{\rm 30}$ DOW DEUTSCHLAND ANLAGENGESELLSCHAFT MBH 2012, S. 1

Vgl. DOW DEUTSCHLAND ANLAGENGESELLSCHAFT MBH 2015, S. 1; DEUTSCHE FOAMGLAS GMBH 2016, S. 2

³¹ ZIRO 2007, S. 1

Vgl. MFPA LEIPZIG GMBH 2004, S. 2; PAUL BAUDER GMBH & CO. KG 2014, S. 1; PAUL BAUDER GMBH & CO. KG (2) 2014, S. 1

Mit dem realisierten Aufbau der Bodenplatten wurde ein stationärer U-Wert von 0,123 W/(m²K) erreicht und damit auch die geforderte Passivhausqualität (siehe Abschnitt 3.1.1 Anforderungen). Weitere Details zur Konstruktion der Bodenplatten können dem Anhang 10 - Ausführungsplanung entnommen werden.



Abb. 38 - Schalungskonstruktion einer Bodenplatte, A1



Abb. 40 - Ausgeschalte Bodenplatte, A1



Abb. 39 - Betonage einer Bodenplatte, A1



Abb. 41 - Aussparung für das Mauerfußelement, A1

Der Bau der Bodenplatten ist mit den Arbeitsschritten Aufbau der Schalungskonstruktion, Betonage und Rückbau der Schalungskonstruktion in Abb. 38 bis Abb. 41 dokumentiert. Die nachfolgenden Arbeitsschritte zum Einbau der Mauerfußelemente sowie zum Aufschweißen der ersten und zweiten Abdichtungslage können Abb. 42 bis Abb. 44 entnommen werden.



Abb. 42 - Eingebautes Mauerfußelement, A1



Abb. 43 - Aufschweißen der ersten Abdichtungslage, A1



Abb. 44 - Aufschweißen der zweiten Abdichtungslage, A1

Außenwände

In der Grundkonfiguration wurden die Umfassungswände der Versuchsgebäude als einschalige Wandkonstruktion aus Ziegelmauerwerk (Blockverband, 25 cm dick) erstellt. Als Baustoffe kamen dafür historische Ziegel im Reichsformat (25 cm x 12 cm x 6,5 cm) und Mauermörtel aus einem natürlich hydraulischen Kalk (NHL 2) zum Einsatz (siehe Abb. 45 und Abb. 46).³² Der Mauermörtel wurde im Mischungsverhältnis "3 x Sand" zu "1 x NHL 2" direkt vor Ort hergestellt. Zudem sind die Außenwände aller Versuchsgebäude mit einem ca. 1 cm bis 2 cm dicken Innenputz ausgestattet worden. Für den Innenputz kamen dasselbe Mischungsverhältnis und dasselbe Bindemittel (NHL 2) zur Anwendung.³³



Abb. 45 - Versuchsgebäude 4 in der Rohbauphase (Blick auf die Außenwand West), A1



Abb. 46 - Versuchsgebäude 3 in der Rohbauphase (Blick auf die Außenwand Nord und Ost), A1

Aufbauend auf dieser Grundkonfiguration, die eine typische, häufig anzutreffende und vor allem feuchtigkeitsempfindliche Außenwandkonstruktion des Gebäudebestands repräsentiert, sind die in Tab. 2 genannten Materialschichten individuell je Versuchskörper ergänzt worden. Dabei stellen die Hydrophobierung und der 2 cm dicke Außenputz mit hydrophob eingestellter Fassadenfarbe jeweils den Fall einer energetischen Ertüchtigung dar, der auf die Reduzierung feuchtigkeitsbedingter Wärmeverluste abzielt. Eine Innendämmung der Außenwände mit Calciumsilikatplatten, mit der die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz erfüllt wurden (siehe Tab. 2) und die als klassische Modernisierungsvariante im Gebäudebestand vermehrt zur Anwendung kommt, soll im Rahmen der Untersuchungen als Referenz dienen. Erst unter Berücksichtigung einer solchen Referenzmaßnahme ist eine belastbare Bewertung und damit auch eine Einordnung der energetischen Wirksamkeit von feuchtereduzierenden Modernisierungsmaßnahmen möglich. Neben den Angaben zur Einhaltung des Mindestwärmeschutzes sind in Tab. 2 auch die stationären U-Werte und R-Werte der jeweiligen Wandaufbauten aufgeführt. Die für deren Berechnung benötigten Wärmeleitfähigkeiten wurden der DIN 4108-4 oder den Bauprodukt-Datenblättern entnommen. Für das Mauerwerk der Außenwände erfolgte dies mit der Rohdichte von 1.780,75 kg/m³, die im Rahmen einer Pilotstrichprobe ermittelt und als besonders repräsentativ eingeschätzt wurde (siehe Abschnitt 4.2.1 Vorarbeiten).

³² OTTERBEIN GMBH & CO KG 2014, S. 1

³³ Die Dicke des Innenputzes resultiert aus dem außenseitig bündig gemauerten Mauerwerk und den Formabweichungen der Ziegel.





Innendämmung - Kalkglätte: $\lambda_{trocken} = 0,28$ W/(mK) laut technischem Datenblatt.

Der Außenputz des Versuchsgebäudes 3 wurde in zwei Lagen mit Unterputz (siehe Abb. 47) und Oberputz (siehe Abb. 48) ausgeführt. Wie beim Mauermörtel und Innenputz kamen für beide Lagen dasselbe Mischungsverhältnis und dasselbe Bindemittel (NHL 2) zur Anwendung.³⁴



Abb. 47 - Nach dem Spritzbewurf aufgetragener Unterputz beim Versuchsgebäude 3, A1



Abb. 48 - Nach dem Unterputz aufgetragener Oberputz beim Versuchsgebäude 3, A1

Im nächsten Arbeitsschritt wurde das Versuchsgebäude umlaufend abgeplant (siehe Abb. 49), damit der Außenputz und später die Fassadenfarbe geschützt vor Witterungseinflüssen abbinden können. Nach einer ca. 4-wöchigen Standzeit des Außenputzes erfolgte der Auftrag der Fassadenfarbe durch Aufrollen (siehe Abb. 50). Auf die gesamte Fläche der Fassaden wurden etwa 10 bis 12 Liter der Fassadenfarbe aufgetragen. Dies entspricht einem Verbrauch von 264 bis 317 ml/m².



Abb. 49 - Umlaufende Abplanung des Versuchsgebäudes 3 als Witterungsschutz, A1



Abb. 50 - Auftrag der Fassadenfarbe durch Aufrollen beim Versuchsgebäude 3, A1

³⁴ VIERL 1987, S. 86 - 88

Bei dem aufgetragenen Beschichtungsstoff handelt es sich um eine kapillarhydrophobe Silikonharz-Farbe, deren Stoffgrößen in Tab. 3 zusammengestellt sind.³⁵ Die Fassadenfarbe wurde während der Bauphase abgetönt. Diese Maßnahme zielte darauf ab, dass alle Versuchsgebäude in Hinblick auf die Vergleichbarkeit eine ähnliche Farbgebung der Fassaden und somit auch ähnliche Werte für die kurzwellige Strahlungsabsorption aufweisen sollten. Die Auswahl des Farbtons erfolgte durch den Vergleich von ausgewählten Ziegeln der Versuchsgebäude mit einem Farbfächer.

с I		
Stoffgröße	Wert	Einheit
Trockenschichtdicke	>100 und $\leq 200~({\rm E}_3)$	[µm]
Dampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke	< 0,14 (V ₁)	[m]
Wasserdurchlässigkeitsrate	≤ 0,1 (W ₃)	$[kg/(m^2h^{0,5})]$
Anmerkungen	Die Stoffgrößen beziehen sich auf einen Verbrauch der Fassadenfarbe von 300 ml/m ² . Zudem verweist der Hersteller darauf, dass es durch Abtönung zu Abweichungen bei den Stoffgrößen kommen kann.	

Beim Versuchsgebäude 2 wurde die Hydrophobierung zunächst mit einer Rolle auf das gereinigte Mauerwerk aufgetragen (siehe Abb. 51). Anschließend ist diese im Bereich der Fugen zusätzlich mit einem Pinsel aufgestrichen und eingearbeitet worden (siehe Abb. 52). Als Hydrophobierungsmittel kam dabei eine Emulsion auf Silanbasis in einer Cremeform zur Anwendung.³⁶ Die hohe Viskosität der verwendeten Hydrophobierung hatte den Vorteil, dass diese beim Vorgang des Auftragens an den Fassaden haftete und nicht herunterlief. Damit konnte eine hohe Einwirkzeit erzielt werden, mit der die Hydrophobierung die Möglichkeit hat, eine große Eindringtiefe zu erreichen. In der Summe wurden auf die Fassaden des Versuchsgebäudes 2 ca. 10 kg der Hydrophobierungscreme aufgetragen. Dies entspricht einem Verbrauch von etwa 264 g/m². Im Gegensatz zur Fassadenfarbe handelt es sich jedoch bei der aufgetragenen Hydrophobierung um keine separate Materialschicht, sondern um eine Imprägnierung des Mauerwerks. Stoffgrößen, wie die dampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke oder die Wasserdurchlässigkeitsrate müssen daher für die hydrophobierten Stoffe individuell bestimmt werden (siehe Abschnitt 4.2 Beschreibung - Laboruntersuchungen).



Abb. 51 - Auftragen der Hydrophobierungscreme auf die Fassaden des Versuchsgebäudes 2 mit einer Rolle, A1



Abb. 52 - Einarbeiten der Hydrophobierungscreme in die Fugen des Versuchsgebäudes 2 mit einem Pinsel, A1

³⁵ CAPAROL FARBEN LACKE BAUTENSCHUTZ GMBH 2016, S. 1

 $^{^{\}rm 36}$ CAPAROL FARBEN LACKE BAUTENSCHUTZ GMBH 2014, S. 1

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit des Außenputzes und der hydrophob eingestellten Fassadenfarbe zeigte sich, dass an der Außenwand West nach der ersten Heizphase im Jahr 2016 vereinzelt bzw. punktuell Frostabsprengungen auftraten, die auf eine hohe Feuchtigkeitsbelastung des Außenputzes zurückgeführt werden können (siehe Abb. 53). Als Ursache für diese hohe Feuchtigkeitsbelastung kann die Restfeuchtigkeit aus dem Bauprozess, aber auch eine starke Feuchtigkeitseinwirkung aus Niederschlägen genannt werden, die insbesondere bei vertikalen Bauteilen mit einer Ausrichtung nach West bzw. Süd-West von Bedeutung waren (siehe Abb. 198). Die beschädigten Wandbereiche wurden im Herbst 2016 durch das Entfernen des gelösten Altputzes und durch das Auftragen eines Ergänzungsputzes³⁷ ausgebessert. In den nachfolgenden Heizphasen kam es zu keinen weiteren nennenswerten Frostabsprengungen an der Außenwand West oder den weiteren Außenwänden des Versuchsgebäudes 3 (siehe Abb. 54 bis Abb. 56)



Abb. 53 - Außenwand West des Versuchsgebäudes 3 im unberegneten Zustand (Aufnahmedatum: 09.10.2016), A1



Abb. 54 - Außenwand West des Versuchsgebäudes 3 im beregneten Zustand (Aufnahmedatum: 18.11.2017), A1

Des Weiteren konnte an der Außenwand West des Versuchsgebäudes 3 festgestellt werden, dass sich nach Regenereignissen Bereiche mit einer erhöhten Feuchtigkeitsbelastung netzförmig über die gesamte Fassadenfläche abzeichneten (siehe Abb. 54). Dieses charakteristische Muster lässt auf Schwindrisse im Außenputz schließen.³⁸ Es konnten jedoch sowohl im unberegneten als auch im beregneten Zustand keine mit dem Auge sichtbaren Risse in der Fassadenbeschichtung festgestellt werden. Daher ist hier von sehr geringen Rissbreiten auszugehen. Zudem zeigten sich im Anschluss an Regenereignisse auch flächige Bereiche mit einer hohen Feuchtigkeitsbelastung (siehe Abb. 54). Ein Abperlen auftreffender Regentropfen konnte an keiner der Fassaden des Versuchsgebäudes 3 festgestellt werden. In der Summe muss daher beim Versuchsgebäude 3 von einem nicht wirksamen Feuchteschutz durch die Fassadenbeschichtung ausgegangen werden.

³⁷ Beim Ergänzungsputz kam dasselbe Mischungsverhältnis und Bindemittel (NHL 2) zur Anwendung, wie beim "Altputz".

³⁸ WTA-MERKBLATT 2-4, S. 8 - 10



Abb. 55 - Unbeschädigte Außenwand Nord und Ost des Versuchsgebäudes 3 (Aufnahmedatum: 26.10.2017), A1



Abb. 56 - Unbeschädigte Außenwand Ost und Süd des Versuchsgebäudes 3 (Aufnahmedatum: 26.10.2017), A1

Gegenüber dem Versuchsgebäude 3 konnte beim Versuchsgebäude 2 sowohl vor Ort als auch im Rahmen von Laboruntersuchungen (siehe Abschnitt 4.2 Beschreibung - Laboruntersuchungen) die Wirksamkeit der Hydrophobierung nachgewiesen werden. So zeigte sich nach Regenereignissen an den Fassaden ein deutliches Abperlen von Wassertropfen (siehe Abb. 57 bis Abb. 60).



Abb. 57 - Perlenförmige Wassertropfen an der Oberfläche eines Ziegels des Versuchsgebäudes 2, A1



Abb. 58 - Perlenförmige Wassertropfen an der Oberfläche eines Ziegels des Versuchsgebäudes 2, A1



Abb. 59 - Perlenförmige Wassertropfen an der Oberfläche eines Ziegels des Versuchsgebäudes 2, A1



Abb. 60 - Perlenförmige Wassertropfen an der Oberfläche eines Ziegels des Versuchsgebäudes 2, A1

Der Zugang in die Versuchsgebäude erfolgt über eine Eingangstür, die sich in der Außenwand Nord befindet (siehe Abb. 61). Bei dieser handelt es sich um eine einflüglige Metalltür mit Eckzarge und umlaufender Gummidichtung, deren 4,5 cm dickes Türblatt eine 4,3 cm dicke Wärmedämmung aus Steinwolle ($\lambda_{Bem} = 0,035 \text{ W/(mK)}$) aufweist. Da das Türblatt in dieser Ausführung nur einen U-Wert von 0,715 W/(m²K) erreicht, wurde zusätzlich ein Wärmedämmelement konzipiert, das im Bereich der Mauerwerksöffnung händisch eingesetzt und herausgenommen werden kann (siehe Abb. 62).³⁹ Das Wärmedämmelement besteht aus einer 1,0 cm starken OSB-Trägerplatte, auf die beidseitig eine 10,0 cm starke Wärmedämmung aus extrudiertem Polystyrol ($\lambda_{Bem} = 0,036 \text{ W/(mK)}$) aufgeschraubt wurde.⁴⁰ Um ein Hinterströmen des in die Mauerwerksöffnung eingesetzten Wärmedämmelementes zu verhindern, wurde außenseitig auf die Türzarge ein vorkomprimiertes Dichtungsband umlaufend aufgeklebt (siehe Abb. 61). Durch das Einsetzen eines Riegels in eine Holzhalterung erfolgte die Lagesicherung und ein Anpressen des Wärmedämmelements an die dahinterliegende Eingangstür (siehe Abb. 62).



Abb. 61 - Außenwand Nord des Versuchsgebäudes 4 ohne eingesetztes Wärmedämmelement, A1



Abb. 62 - Außenwand Nord des Versuchsgebäudes 4 mit eingesetztem Wärmedämmelement, A1

Mit dem eingesetzten Wärmedämmelement erreicht die Eingangstür einen stationären U-Wert von 0,139 W/(m²K) und erfüllt demnach die im Abschnitt 3.1.1 Anforderungen genannte Anforderung von 0,15 W/(m²K). Weitere Konstruktionsdetails zur Eingangstür und zum Wärmedämmelement können dem Anhang 10 - Ausführungsplanung entnommen werden.

³⁹ NOVOFERM GMBH 2003, S. 7

Vgl. KNAUF GIPS KG 2011, S. 2

⁴⁰ DOW DEUTSCHLAND ANLAGENGESELLSCHAFT MBH 2015, S. 1

Dach

Das Dach wurde bei allen Versuchsgebäuden als Flachdach mit dem gleichen Holztragwerk (Fichte) und Schichtenaufbau umgesetzt. Die Tragkonstruktion besteht aus Deckenbalken, die mit einem Achsabstand von 87 cm auf der abgedichteten Mauerkrone auflagern (siehe Abb. 63 und Abb. 64). Um das geplante Dachgefälle von 6 % herzustellen, wurden auf und quer zu den Deckenbalken, die Gefällebalken mit einem Achsabstand von 60 cm verbaut (siehe Abb. 64).



Abb. 63 - Aufbau des Flachdachs (Schmalseite), A1



Abb. 64 - Aufbau des Flachdachs (Längsseite), A1

Gemäß den Anforderungen an die Versuchsgebäude (siehe Abschnitt 3.1.1 Anforderungen) sind alle Dächer durch eine Dampfsperre (Aluminiumverbundfolie, $s_d \ge 1.500$ m) vor Wasserdampfdiffusion aus dem Innenraum geschützt.⁴¹ Die Dampfsperre wurde innenseitig auf einer Unterkonstruktion aus Siebdruckplatten durch Anheften punktuell befestigt. Im Bereich der Außenwände erfolgte die Befestigung durch einen Folienkleber. Alle Durchdringungspunkte der Dampfsperre wurden zudem mit einem Aluminiumklebeband abgeklebt. Aufgrund dieser dampfdichten Konstruktion, bei der eine Rücktrocknung nach innen nicht mehr möglich ist, wurden die Flachdächer im Gefachebereich der Gefällebalken durch eine stark belüftete Luftschicht ergänzt (siehe Abb. 65).



Abb. 65 - Visualisierung der Schichtenfolge des belüfteten Flachdachs, A1

⁴¹ ALUJET GMBH 2010, S.1

Der Wärmeschutz der Flachdächer konnte mittels einer 24 cm dicken Wärmedämmung zwischen den Deckenbalken und einer 6 cm dicken Wärmedämmung zwischen den Gefällebalken umgesetzt werden (jeweils Mineralwolle, $\lambda_{Bem} = 0,035 \text{ W/(mK)}$). Die obere Wärmedämmebene hat dabei die Aufgabe, die Wärmebrückenwirkung der Deckenbalken zu reduzieren. Zudem erfolgte der Einbau einer Winddichtheitsschicht (Polyestervlies mit Polyurethan-Beschichtung, $s_d \approx 0,15 \text{ m}$) umlaufend an den Schmal- und Längsseiten der Flachdächer (siehe Abb. 66 und Abb. 67). Um dabei die stark belüftete Luftschicht im Gefachebereich der Gefällebalken sicherzustellen, wurde das Polyestervlies auf den Schmalseiten nicht bis zur Unterkonstruktion der Dachhaut hochgeführt. Diese Bauweise ermöglicht ein Überströmen der Wärmedämmung mit Außenluft für eine optimale Feuchteabfuhr (siehe Abb. 65). Zugleich wird durch die Winddichtheitsschicht ein Durchströmen der Dämmebenen reduziert und somit auch der konvektionsbedingte Wärmetransport. In der Summe konnte durch die Wärmeschutzmaßnahmen ein stationärer U-Wert von 0,125 W/(m²K) erreicht werden.⁴²



Abb. 66 - Winddichtheitsschicht auf der Längsseite von Versuchsgebäude 2 während der Bauphase, A1



Abb. 67 - Winddichtheitsschicht auf der Schmalseite von Versuchsgebäude 2 während der Bauphase, A1

Der seitliche Abschluss der Flachdächer erfolgte mit einer Verkleidung aus Holzhartfaserplatten, die auf eine 3 cm starke Unterkonstruktion geschraubt wurden (siehe Abb. 67 bis Abb. 69). Nach oben schließen die Flachdächer mit einer Unterkonstruktion aus OSB-Platten und einer zweilagigen Abdichtung aus Bitumenbahnen ab (siehe Anhang 10 - Ausführungsplanung).



Abb. 68 - Verkleidung aus Holzhartfaserplatten auf der Längsseite von Versuchsgebäude 4, A1



Abb. 69 - Verkleidung aus Holzhartfaserplatten auf der Schmalseite von Versuchsgebäude 2, A1

⁴² URSA DEUTSCHLAND GMBH 2016, S. 1

Vgl. USA DEUTSCHLAND GMBH (2) 2016, S. 1; DÖRKEN GMBH & CO KG 2016, S. 3
3.1.5 Luftdichtheit

Im Zeitraum vom 16.09.2016 bis zum 17.09.2016 wurde bei den Versuchsgebäuden 1 bis 5 die Luftdichtheit der thermischen Hülle nach dem Differenzdruckverfahren untersucht. In Rahmen der Untersuchungen kamen entsprechend der DIN EN 13829 sowohl Überdruck- als auch Unterdruck-Messungen zum Einsatz (siehe Abb. 70).



Abb. 70 - Schematische Darstellung der Überdruck- und Unterdruckmessung beim Versuchsgebäude 1, A1

Dabei war zu beachten, dass die 5 Versuchsgebäude ein kleines Innenvolumen V und ein großes Verhältnis von Hüllfläche A zu Innenvolumen V aufweisen. Bei den Versuchsgebäuden 1, 2, 3 und 5 beträgt das Innenvolumen nur 20,48 m³ und das A-zu-V-Verhältnis 2,28 m⁻¹. Bei dem von innen gedämmten Versuchsgebäude 4 ist das Innenvolumen mit 18,00 m³ noch kleiner und das A-zu-V-Verhältnis mit 2,42 m⁻¹ noch größer. Da der n₅₀-Wert, als Maß für die Luftdichtheit eines Gebäudes, dem Produkt aus Luftdurchlässigkeit q₅₀ und A-zu-V-Verhältnis entspricht, wirken sich Leckagen in der Hülle kleinvolumiger Gebäude stärker auf diesen aus, als Leckagen in der Hülle großvolumiger Gebäude. Deshalb wurde vor den Messungen sehr auf einen akkurat bzw. luftdicht ausgeführten Einbau der Messstation in den Blendrahmen der Eingangstür geachtet (siehe Abb. 71 und Abb. 72).



Abb. 71 - Im Blendrahmen der Eingangstür verbaute Messstation, A1



Abb. 72 - Abgeklebte Messstation, A1

Die bei den Unterdruck- und Überdruck-Messungen erfassten Werte für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle (q_{50} -Werte) sind in Tab. 4 zusammengestellt. Aus den Mittelwerten der Messungen geht hervor, dass die geringste Luftdurchlässigkeit mit 0,28 m³/(m²h) beim Versuchsgebäude 3 und die größte Luftdurchlässigkeit mit 0,80 m³/(m²h) beim Versuchsgebäude 5 vorliegt. Hinsichtlich der Messqualität konnten bei allen Messungen die Anforderungen der DIN EN ISO 9972 eingehalten werden. So erreichen die im Rahmen der Unterdruck- und Überdruck-Messungen aufgezeichneten Leckagekurven ein Bestimmtheitsmaß r² zwischen 0,993 und 0,999 (Soll: r² \geq 0,98) sowie einen Strömungsexponenten n zwischen 0,644 und 0,819 (Soll: 0,5 \leq n \leq 1).

uchs- äude	Unterdruck-Messung	Überdruck-Messung	Mittelwert
Vers geb	[m³/(m²h)]	[m³/(m²h)]	[m³/(m²h)]
1	0,60	0,64	0,62
2	0,61	0,61	0,61
3	0,31	0,26	0,28
4	0,40	0,46	0,43
5	0,85	0,75	0,80

Tab. 4 - Luftdurchlässigkeit bei einer Druckdifferenz von 50 Pascal (q₅₀-Wert), T1

In Tab. 5 sind die n_{50} -Werte der Versuchsgebäude 1 bis 5 aufgeführt, die sich aus deren q_{50} -Werten (siehe Tab. 4) und deren tatsächlichen Werten für das A-zu-V-Verhältnis ergeben. Hier zeigt sich, dass die Anforderung an die Luftdichtheit der Gebäudehülle mit $n_{50} \le 0,6 \text{ h}^{-1}$ nur bei der Überdruck-Messung von Versuchsgebäude 3 eingehalten wird. Da die thermische Hülle der Versuchsgebäude keine Durchdringen mit Ausnahme der Eingangstür aufweist, sind mögliche Leckagen auf wenige Anschlusspunkte begrenzt, wie z.B. zwischen Dach und Außenwänden oder zwischen Eingangstür und angrenzenden Bauteilen. Auch eine minimale Hinterströmung der Messstation kann trotz der umlaufenden Abklebung nicht ausgeschlossen werden. Um zu verdeutlichen, welchen Einfluss das A-zu-V-Verhältnis auf die n_{50} -Werte hat, werden diese im Folgenden auf das A-zu-V-Verhältnis eines typischen Einfamilienhauses von 0,8 m⁻¹ bezogen. Damit ergeben sich bei allen Versuchsgebäuden n_{50} -Werte, die der Anforderung von 0,6 h⁻¹ entsprechen (siehe Tab. 5).

Tab. 5 - Luftwechselrate bei einer Druckdifferenz von 50 Pascal (n_{50} -Wert), T1

äude	Unterdruck-Messung		Überdruc	k-Messung	Mittelwert	
suchsgeb	A-zu-V Versuchsgeb.	A-zu-V Einfamilienhaus	A-zu-V Versuchsgeb.	A-zu-V Einfamilienhaus	A-zu-V Versuchsgeb.	A-zu-V Einfamilienhaus
Ver	$[h^{-1}]$	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	$[h^{-1}]$	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]
1	1,37	0,48	1,46	0,51	1,42	0,50
2	1,39	0,49	1,39	0,49	1,39	0,49
3	0,71	0,25	0,59	0,21	0,64	0,22
4	0,97	0,32	1,11	0,37	1,04	0,34
5	1,94	0,68	1,71	0,60	1,83	0,64

3.2 Beschreibung - Anlagentechnik

3.2.1 Heizung

Die Heizungstechnik der Versuchsgebäude besteht aus den nachfolgenden 5 Komponenten:

- 1. *Komponente* Radiator: In jedem Versuchsgebäude befindet sich ein ölgefüllter Elektroradiator mit einer Nennleistung von 2.500 Watt (siehe Abb. 73 bis Abb. 75 und Abb. 77).
- Komponente Heizungssensor: Zur automatischen Steuerung der Elektroradiatoren ist in allen Versuchsgebäuden ein Temperatursensor (PT 1000) in der Ausführung als Raumpendelsensor verbaut (siehe Abb. 73 und Abb. 76, Holzhalterung rechte Seite).
- 3. Komponente Heizungsreglung: Die Ein-Aus-Steuerung der 5 Elektroradiatoren erfolgt aus einer Schaltzentrale über 5 digitale Temperaturregler mit der Abtastzeit von 500 ms (siehe Abb. 79). In den digitalen Reglern sind der untere und der obere Grenzwert für die Innenraumtemperatur der 5 Versuchsgebäude hinterlegt. Mit dem Unterschreiten des unteren Grenzwertes von 19,8 °C werden die Elektroradiatoren automatisch zugeschaltet. Die Abschaltung erfolgt beim Erreichen des oberen Grenzwertes von 20,2 °C ebenfalls automatisiert.
- 4. *Komponente* Wirkenergiezähler: Für jedes Versuchsgebäude befindet sich in der Schaltzentrale ein Wirkenergiezähler mit S0-Schnittstelle. Die Wirkenergiezähler messen die Strommenge bzw. die übertragene elektrische Energie, die ausschließlich für die Beheizung der 5 Versuchsgebäude entsprechend den Grenztemperaturen benötigt wird (siehe Abb. 79).
- Komponente Impulslogger: An einen in der Schaltzentrale angeordneten Impulslogger werden über die SO-Schnittstelle der Wirkenergiezähler die gemessenen Stromverbräuche der einzelnen Versuchsgebäude fortlaufend übertragen. Der Impulslogger summiert die erhaltenen Messwerte auf und legt die Zwischenergebnisse in einem Rhythmus von 15 Minuten geräteintern in einer Datenbank ab (siehe Abb. 79).

Die räumliche Anordnung der Komponenten der Heizungsanlage, die sich in den Versuchsgebäuden befinden, kann den Planunterlagen (siehe Anhang 10 - Ausführungsplanung) und den folgenden Visualisierungen (siehe Abb. 73 und Abb. 74) entnommen werden.



Abb. 73 - Blick in das Versuchsgebäude 1 (Komponenten der Heizungstechnik sind rot dargestellt), A1



Abb. 74 - Blick in das Versuchsgebäude 1 (Komponenten der Heizungstechnik sind rot dargestellt), A1

Die zum Versuchsstart ausgeführte Heizungs-, Entfeuchtungs- und Monitoringtechnik ist in Abb. 75 exemplarisch für das Versuchsgebäude 1 dargestellt. Beim Einbau der technischen Komponenten wurde die räumliche Position der Holzhalterung des Heizungssensors und des Elektroradiators so eingemessen, dass sich diese auf halber Raumbreite befinden und zudem einen Abstand von 1 m zur Eingangstür bzw. zur Außenwand Süd aufweisen. Des Weiteren ist der Heizungssensor in allen Versuchsgebäuden auf einer Höhe von 158,5 cm über der obersten Abdichtungslage montiert.



Abb. 75 - Blick in das Versuchsgebäude 1 mit der vorhandenen Anlagentechnik, A1

Die Position des Heizungssensors und des Elektroradiators wurde unter den Rahmenbedingungen festgelegt, dass einerseits die Versuchsgebäude ausreichend begehbar bleiben und anderseits eine gleichmäßige Erwärmung des Innenraums möglich ist, ohne dass sich beide Komponenten negativ beeinflussen. Zugleich sollte sich der Heizungssensor an einer Position in den Versuchsgebäuden befinden, an der dieser umfassend den Umgebungsbedingungen ausgesetzt ist, um somit wiederum das Innenraumklima möglichst repräsentativ erfassen zu können. Dabei kamen sowohl allgemeine Planungshinweise aus der Fachliteratur und dem Produktdatenblatt als auch aus dem Beiblatt 3 der VDI/VDE-Richtlinie 3512 "Temperaturmessung für die Gebäudeautomatisation" zur Anwendung.⁴³



Abb. 76 - Heizungssensor (rechts) und Innenraumsensor des Monitoringsystems (links) im Versuchsgebäude 1, A1



Abb. 77 - Über einen externen Heizungssensor geregelter Elektroradiator im Versuchsgebäude 1, A1

Die Auslegung der Elektroradiatoren auf 2.500 W (siehe Abb. 77) erfolgte nach dem vereinfachten Verfahren gemäß der DIN EN 12831-1 unter Berücksichtigung einer Norm-Innenraumtemperatur von 20 °C und einer Norm-Außentemperatur von -12 °C.⁴⁴ Im Rahmen des Berechnungsvorgangs wurde die thermische Gebäudehülle der Versuchsgebäude mit ungedämmten und ziegelsichtigen Außenwänden angesetzt, da bei diesen die größte Heizlast zu erwarten ist. Nach der Auslegung und Beschaffung der Elektroradiatoren wurden diese im nächsten Schritt modifiziert. Dieser Schritt war notwendig, da die Radiatoren eine interne Funktion aufweisen, die bei hohen Temperaturen an der Geräteoberfläche eine automatische Abschaltung initiiert. Da eine solche Abschaltung jedoch die Messungen beeinflusst hätte, wurde die Funktion deaktiviert.

⁴³ VDI / VDE 3512-3, S. 5 - 6

Vgl. PISTOHL 2009, S. H 196; TEMPERATURE CONTROL GMBH 2009, S. 2

⁴⁴ Die Norm-Außentemperatur ergibt sich aus dem Beiblatt 1 zur DIN EN 12831 für den nächstgelegenen Ort Greifswald.

Die außerhalb der Versuchsgebäude installierten Komponenten der Heizungstechnik sind in einer Schaltzentrale mit Internetanschluss angeordnet (siehe Abb. 78 und Abb. 79). Dieser erlaubt es, dass die aufgezeichneten Messdaten des Impulsloggers über ein passwortgeschütztes Webinterface weltweit ausgelesen werden können. Zudem stellt die Schaltzentrale eine Kontrolleinrichtung dar. So werden von den Temperaturreglern der Momentanwert der Innenraumtemperatur und von den Wirkenergiezählern der kumulierte Stromverbrauch der Versuchsgebäude angezeigt. Ebenso kann über eine separate Anzeige der Momentanwert der relativen Luftfeuchtigkeit in Versuchsgebäude 5 abgelesen werden. Mit Hilfe der Temperatur- und Verbrauchsanzeigen ist somit, ohne ein Betreten der Versuchsgebäude, eine Funktionskontrolle der Heizungstechnik möglich.



Abb. 78 - Blick auf Schaltzentrale (links: Schaltschrank mit Heizungsreglern und Impulslogger), A1



Abb. 79 - Temperaturregler (oben), Impulslogger (Mitte) und Wirkenergiezähler (unten) am 17.01.2016, A1

Das ausgewählte und über den gesamten Versuchszeitraum (16.01.2016, 22:30 Uhr bis 01.01.2018, 00:00 Uhr) durchgängig betriebene Heizungssystem war für den Anwendungszweck mit wichtigen systemspezifischen Vorteilen verbunden. Gegenüber konventionellen Heizungssystemen auf Basis fossiler Energieträger zeigten sich diese vor allem in den Bereichen "*Beschaffung und Installation"* sowie "*Betrieb und Verbrauchsmessung*":

- 1. *Beschaffung und Installation*: Aufgrund der geringen Anzahl und Kosten der Einzelkomponenten, aber auch aufgrund der geringen technischen Komplexität und der örtlichen Verfügbarkeit von elektrischer Energie, konnte das gesamte Heizungssystem kostengünstig erworben und vor Ort installiert werden.
- 2. *Betrieb und Verbrauchsmessung*: Aufgrund der geringen technischen Komplexität und der damit verbundenen einfachen Steuerung, war das Heizungssystem im Ganzen sehr robust und weniger fehler- bzw. wartungsanfällig. Darüber hinaus konnte die Messung der Verbrauchswerte durch die Nutzung von Wirkenergiezählern einfach, zuverlässig und mit hoher Präzision durchgeführt werden. Die auf diese Weise erfassten Verbrauchswerte in Kilowattstunden beschreiben direkt die den Versuchsgebäuden zugeführte Wärmemenge, da die von den Radiatoren aufgenommene elektrische Energie verlustfrei in Wärme umgewandelt wird.

Obwohl die Kosten für eine Kilowattstunde elektrischer Energie deutlich höher ausfallen, als für eine Kilowattstunde fossiler Brennstoffe, war in der Summe die Durchführung der Freilandversuche mittels einer Elektroheizung aufgrund der genannten Vorteile deutlich praktikabler.

3.2.2 Entfeuchtung

Die Entfeuchtung der Raumluft in den Versuchsgebäuden 1 bis 5 erfolgte ab dem Versuchsstart am 16.01.2016 zunächst ausschließlich passiv. Dazu kam ein stark hygroskopisches Salz in Form von Calciumchlorid-Granulat zur Anwendung. Das Granulat wurde in Textilbeuteln mit einer Füllmenge von 1.000 g auf mehreren Wasserauffang-Wannen gelegt und mit diesen in die Versuchsgebäude, jeweils an der gleichen Position, eingebracht. In jedem Versuchsgebäude war somit zum Start des Versuchs ein passiver Luftentfeuchter bestehend aus einer Wasserauffang-Wanne und einem mit Salz gefüllten Textilbeutel vorhanden (siehe Abb. 73, Abb. 75, Abb. 80 und Abb. 81).



Abb. 80 - Konstruktion des passiven Luftentfeuchters, A1



Abb. 81 - Passiver Luftentfeuchter mit Salzbeutel, A1

Mit steigenden Außentemperaturen ist die Anzahl der Wasserauffang-Wannen und der Salzbeutel in den Versuchsgebäuden sukzessive erhöht worden. Zudem erhielten alle Wasserauffang-Wannen eine Abdeckung, um die erneute Verdunstung von bereits aufgefangenem Wasser zu reduzieren (siehe Abb. 82 und Abb. 83). Eine Übersicht zu den im Verlauf der ersten Heizphase eingebrachten Salzmengen kann Tab. 22 entnommen werden. Zusätzlich zu den darin genannten Mengen wurden am 07.05.2017, um 19:00 Uhr jeweils 8.000 g in Versuchsgebäude 1, 2, 3 und 5 sowie 4.000 g in das Versuchsgebäude 4 eingebracht.



Abb. 82 - Konstruktion des passiven Luftentfeuchters mit Abdeckung (Kunststoff-Folie), A1



Abb. 83 - Konstruktion des passiven Luftentfeuchters mit Abdeckung und leeren Salzbeuteln, A1

Die passiven Luftentfeuchter wurden am 12.09.2016 um 10:15 Uhr, 14:30 Uhr und 17:15 Uhr aus den Versuchsgebäuden 1, 2 und 3 entnommen. Aus den Versuchsgebäuden 4 und 5 erfolgte die Entnahme am 13.09.2016 um 09:30 Uhr und um 11:00 Uhr. Bis auf kleinere Rückstände waren alle Salzbeutel am Tag der Entnahme geleert (siehe Abb. 83). Einen Überblick über die Gesamtmengen der Lösung, die in den Versuchsgebäuden aufgefangen wurden, gibt Abb. 84.



Abb. 84 - Aus den Versuchsgebäuden entnommene Wannen mit der gesamten aufgefangenen Lösung, A1

Unmittelbar nach der Entnahme der passiven Luftentfeuchter aus den einzelnen Versuchsgebäuden wurde die Masse der darin aufgefangenen Lösung bestimmt. Unter der Voraussetzung, dass es sich um eine gesättigte und nicht übersättigte Lösung handelt, ist die ermittelte Masse daraufhin genutzt worden, um mit der Lösbarkeit des Salzes in Wasser (0,74 kg/l bei 20 °C)⁴⁵ und der Dichte von Wasser (0,99821 kg/l bei 20 °C)⁴⁶ die Masse des gelösten Salzes zu berechnen (siehe Gl. 2).⁴⁷

	$m_{L} - m_{Salz,vorh.} = \frac{m_{Salz,vorh.}}{\beta_{Salz}} \rho_{Wasser}$	Gl. 2
m_L	Masse der Lösung	[kg]
m _{Salz,vorh.}	Masse des gelösten Salzes	[kg]
β_{Salz}	Lösbarkeit von Salz in Wasser bei 20 °C als Massenkonzentration	[kg/l]
ρ_{Wasser}	Dichte von Wasser bei 20 °C	[kg/l]

Die Differenz aus der Masse der Lösung und der Masse des gelösten Salzes ergibt nun die Masse des Wassers, die der Raumluft des jeweiligen Versuchsgebäudes durch passive Entfeuchtung entzogen wurde (siehe Gl. 3). Im Rahmen der Berechnung mit Gl. 2 konnte zudem festgestellt werden, dass nicht die Gesamtmasse der eingebrachten Salze in Lösung gegangen ist. Zurückzuführen ist dies auf kleinere Salzreste, die in den Textilbeuteln und auf dem Steg des Luftentfeuchters verblieben sind (siehe Abb. 82 und Abb. 83). Auch waren auf dem Boden einzelner Wasserauffang-Wannen partiell Salzablagerungen in Form eines dünnen Films festzustellen (siehe Abb. 85 bis Abb. 88).

	$m_{Wasser} = m_L - m_{Salz,vorh.}$	Gl. 3
m _{Wasser}	Masse des Wassers	[kg]
m _{Lösung}	Masse der Lösung	[kg]
m _{Salz,vorh.}	Masse des gelösten Salzes	[kg]

 $^{^{\}rm 45}$ UHU GMBH & CO KG 2012, S. 4

⁴⁶ VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2013, S. 176

⁴⁷ SORGE 2017, S. 184 - 185



Abb. 85 - Gesamte Lösung aus passiver Luftentfeuchtung im Versuchsgebäude 1, A1



Abb. 87 - Gesamte Lösung aus passiver Luftentfeuchtung im Versuchsgebäude 3, A1



Abb. 86 - Gesamte Lösung aus passiver Luftentfeuchtung im Versuchsgebäude 2, A1



Abb. 88 - Durch passive Luftentfeuchtung aufgefangene Lösung aus dem Versuchsgebäude 4, A1

Eine Zusammenstellung aller Mess- und Berechnungsergebnisse zur passiven Luftentfeuchtung in den Versuchsgebäuden kann Tab. 6 entnommen werden.

Versuchsgebäude		1	2	3	4	5
Gesamtmasse des Salzes	[kg]	21,00	21,00	21,00	6,00	21,00
Dauer der passiven Entfeuchtung	[h]	5.747,75	5.752,00	5.754,75	5.771,00	5.772,50
Masse der entnommenen Lösung	[kg]	47,73	48,11	48,38	11,85	48,24
Volumen der entnommenen Lösung	[1]	35,20	35,48	35,67	8,52	35,58
Masse des aufgelösten Salzes	[kg]	20,32	20,48	20,59	5,04	20,54
Masse des verlorenen Salzes	[kg]	0,68	0,52	0,41	0,96	0,46
Masse des entnommenen Wassers	[kg]	27,41	27,63	27,78	6,80	27,70
Volumen des entnommenen Wassers	[1]	27,36	27,58	27,73	6,79	27,66
Entfeuchtungsleistung	[g/h]	4,77	4,80	4,83	1,18	4,80

Tab. 6 - Kenndaten zur passiven Luftentfeuchtung in den Versuchsgebäuden 1 bis 5, T5

Obwohl die Salzmengen sukzessive erhöht wurden (siehe Tab. 22), konnte die für die Heizphasen angestrebte relative Luftfeuchtigkeit zwischen 35 und 55 % (bezogen auf die Tagesmittelwerte) in den Versuchsgebäuden 1, 2 und 3 dauerhaft und in dem Versuchsgebäude 4 zeitweise nicht erreicht werden (siehe Abb. 122 und Tab. 23.). Aus diesem Grund erfolgte eine Umstellung von passiver auf aktive Luftentfeuchtung, deren Einzelkomponenten entsprechend Abb. 89 in den Versuchsgebäuden angeordnet wurden.



Abb. 89 - Blick in das Versuchsgebäude 1 (Komponenten der aktiven Luftentfeuchtung sind blau dargestellt), A1

Im Detail besteht das umgestellte Entfeuchtungssystem aus einem aktiven Luftentfeuchter, einem separaten Wirkenergiezähler und zwei umgebauten Wasserauffang-Wannen, die zuvor zur passiven Luftentfeuchtung genutzt wurden.⁴⁸ Die beiden Wannen sind über eine Schlauchverbindung an den Kondensatabfluss des aktiven Luftentfeuchters angeschlossen worden und erhielten zudem einen Deckel, um die Verdunstung von bereits aufgefangenem Kondensat zu unterbinden (siehe Abb. 90). Mit dem so erzielten Speichervolumen (siehe Tab. 7) konnte das Entfeuchtungssystem mehrwöchig betrieben werden, ohne dass das aufgefangene Kondensat aus Kapazitätsgründen zwischenzeitlich zu entnehmen war. Die Abführung des im aktiven Luftentfeuchter anfallenden Kondensats erfolgte jedoch drucklos, sodass dieser erhöht aufgestellt werden musste (siehe Abb. 89 und Abb. 90).

Vorausharahöuda	Wanne 1	Wanne 2	Gesamt
versuchsgebaude	[1]	[1]	[1]
1	38	38	76
2	38	38	76
3	32	32	64
4	38	32	70
5	70	32	102

Tab.	7	- Fassungsvermögen	der	verwendeten	Wasserauffang-	Wannen,	T1
------	---	--------------------	-----	-------------	----------------	---------	----

 $^{^{\}rm 48}$ Nur das Versuchsgebäude 5 erhielt eine neue Wanne mit einem Fassungsvermögen von 70 l.

Zur Stromversorgung des aktiven Luftentfeuchters wurde in jedem Versuchsgebäude eine bereits vorhandene Steckdose ausgewählt und mit einem Wirkenergiezähler ausgestattet (siehe Abb. 91). Damit war es möglich den Stromverbrauch für die Entfeuchtung der Raumluft separat zu erfassen und die dabei erzeugte Abwärme des Gerätes zu quantifizieren (siehe Abschnitt 3.6.1 Bilanzierung). Die Messung des Stromverbrauchs für die Beheizung der Versuchsgebäude blieb von dem Betrieb des aktiven Luftentfeuchters jedoch unberührt, da die Stromversorgung der Elektroradiatoren und die Stromversorgung sonstiger Anlagentechnik über getrennte Stromkreise erfolgte.



Abb. 90 - Aktiver Luftentfeuchter und Wasserauffang-Wannen im Versuchsgebäude 1, A1



Abb. 91 - Steckdose mit separaten Wirkenergiezähler für den aktiven Luftentfeuchter, A1



Abb. 92 - Aktiver Luftentfeuchter im Versuchsgebäude 1 mit Anzeige des Zielwertes, A1

Die aktiven Luftentfeuchter wurden in allen Versuchsgebäuden am 19.09.2016 zwischen 14:00 Uhr und 14:10 Uhr in Betrieb genommen.⁴⁹ Aufgrund der elektronischen Hygrostatsteuerung mit einer Echtwert-Feuchtevorwahl konnten die Geräte die relative Luftfeuchtigkeit in den Versuchsgebäuden selbstständig regeln und somit unbeaufsichtigt zur Anwendung kommen. Vor der Inbetriebnahme wurde dazu an jedem Luftentfeuchter eine Feuchtevorwahl bzw. ein Zielwert von 45 % relativer Luftfeuchtigkeit eingestellt (siehe Abb. 92). Dieser Wert impliziert, dass die aktiven Luftentfeuchter bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % automatisch den Standby-Modus verlassen und die Raumluft bis auf 40 % relative Luftfeuchtigkeit entfeuchten. Nach dem Erreichen dieses Wertes schalten die aktiven Luftentfeuchter wieder automatisch in den Standby-Modus.

⁴⁹ Gemäß der Bedienungsanleitung erreichen die Luftentfeuchter über das Kondensationsprinzip eine maximale Entfeuchtungsleistung von 20 l/d. Der Arbeitsbereich für die relative Luftfeuchtigkeit beträgt 35 % bis 80 % und für die Lufttemperatur 5 °C bis 35 °C.

Um im Innenraum der Versuchsgebäude eine gleichmäßige Verteilung der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit zu erreichen, wurde auf den Tischen für die Anlagentechnik je ein Axialventilator verbaut, der seit dem Versuchsstart im Dauerbetrieb die Raumluft umwälzt. In der Abb. 93 ist die Ansaug- und Auslassseite des Axialventilators sowie des aktiven Luftentfeuchters einschließlich der zu erwartenden Luftströmung schematisch dargestellt.



Abb. 93 - Schematische Darstellung der Luftströmung im Versuchsgebäude 1, A1

Die in den Versuchsgebäuden verwendeten Axialventilatoren (siehe Abb. 94) sind entsprechend des Produktdatenblatts durch eine Leistungsaufnahme von 14 Watt gekennzeichnet und erreichen mit der Drehzahl von 2.300 min⁻¹ eine Förderleistung von 107 m³/h.⁵⁰



Abb. 94 - Hinter dem Datenlogger der Monitoringtechnik installierter Axialventilator im Versuchsgebäude 1, A1

⁵⁰ VENTS VENTILATION SYSTEMS 2016, S. 47

3.2.3 Monitoring

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde neben der Heizungs- und Entfeuchtungstechnik auch Monitoringtechnik eingesetzt. Diese diente dazu in den nachfolgenden Bereichen charakteristische bzw. bauphysikalisch relevante Messgrößen über den gesamten Versuchszeitraum kontinuierlich zu messen und aufzuzeichnen:

- 1. Innenklima (Versuchsgebäude 1, 2, 3, 4 und 5)
- 2. Außenwände (Versuchsgebäude 1, 2, 3 und 4)
- 3. Außenklima (Versuchsstandort)

Das Innenklima wurde in den Versuchsgebäuden 1 bis 4 über die Messgrößen Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit erfasst. Dazu kam ein digitaler Messwertgeber mit CMOsens-Technologie zur Anwendung, der mit einem kapazitiven Feuchtesensor und einem Bandlückentemperatursensor ausgestattet war. Um das Innenklima an einer Position zu messen und zu kontrollieren, von der dieses auch gesteuert wurde, erfolgte die Montage des Messwertgebers auf gleicher Höhe und in unmittelbarer Nähe zum Heizungssensor (siehe Abb. 76 und Abb. 98). Aufgrund dieser Einbaulage wird der Messwertgeber im Forschungsbericht auch als Innenraumsensor bezeichnet.⁵¹

Die Außenwände Ost, Süd und West der Versuchsgebäude 1 bis 4 wurden ebenfalls mit Sensoren des Monitoringsystems ausgestattet. Hier kam der gleiche digitale Messwertgeber zum Einsatz, der auch zur Aufzeichnung des Innenklimas genutzt wurde. Auf diese Weise konnten die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in ausgewählten Tiefen der Außenwände bestimmt werden, die sich entsprechend des Innen- und Außenklimas einstellt. Da die gemessene relative Luftfeuchtigkeit über die Feuchtespeicherfunktion des Außenwandmaterials in einem direkten Zusammenhang mit dessen Wassergehalt steht, können anhand der Messwerte Aussagen zur Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände getroffen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass mit dem Messverfahren lediglich punktuelle Messungen erfolgen. Um dennoch repräsentative und vergleichbare Messwerte für die Außenwände zu erhalten, wurden die Messwertgeber bei allen Versuchsgebäuden so angeordnet, dass sich diese im Bereich des Schwerpunkts der Wandfläche befinden. Hier erfolgte deren Einbau nebeneinander und jeweils in einem separaten Binder der 9. Binderschicht (Außenwand Süd) oder der 10. Binderschicht (Außenwand Ost und Außenwand West).⁵² Damit sollte bezweckt werden, dass die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit stets im Ziegelmaterial und somit in einer ähnlichen Materialumgebung durchgeführt wird. Zudem wurden die Messwertgeber in verschiedenen Tiefen (4,0 cm, 14,5 cm und 25 cm) eingesetzt, sodass eine Beurteilung der Feuchtigkeitsverteilung über den Wandquerschnitt möglich ist.⁵³ Insgesamt kamen bei den Versuchsgebäuden 1 bis 4 jeweils 3 Messwertgeber im Mauerwerk der Außenwände Ost, Süd und West zum Einsatz. Lediglich beim Versuchsgebäude 4 wurde ein weiterer Messwertgeber direkt hinter der Innendämmung verbaut.

 $^{^{\}rm 51}$ AHLBORN MESS- UND REGELUNGSTECHNIK GMBH 2011, S. 3-3-7 bis 3-3-13

Vgl. SENSIRION AG 2011, S. 1

⁵² Beim Versuchsgebäude 1 wurden die Messwertgeber auch bei den Außenwänden Ost und West in der 9. Binderschicht installiert (Ursache: Fehlbohrungen). Die Zählung der Binderschichten erfolgte bei allen Versuchsgebäuden von unten nach oben.

⁵³ Die angegebenen Einbautiefen der Messwertgeber beziehen sich auf die Innenkante des Innenputzes.

Die für den Einbau der Messwertgeber in die Außenwände notwendigen Bohrungen wurden von innen durchgeführt, mit Druckluft ausgeblasen und nach dem Einsetzen der Messwertgeber mit Silikon luftdicht verschlossen (siehe Abb. 96). Die Position der Messwertgeber in den Außenwänden kann schematisch der Abb. 95 und detailliert dem Anhang 10 - Ausführungsplanung entnommen werden. Aufgrund der Einbauposition werden diese im weiteren Verlauf des Forschungsberichtes auch als Mauerwerkssensoren bezeichnet.



Abb. 95 - Visualisierung der Monitoringtechnik für das Innenklima und die Außenwände (Versuchsgebäude 1), A1

Bestandteil der Monitoringtechnik der *Außenwände* war auch eine Wärmestrommessplatte, die bei den Versuchsgebäuden 1 bis 4 jeweils an der Außenwand West befestigt wurde. Die Montage der 120 x 120 x 3 mm großen Messplatte erfolgte in den 4 Versuchsgebäuden an der gleichen Position, d.h. exakt auf halber Wandbreite und auf einer Höhe von 160 cm über der Oberkante der letzten Abdichtungslage (gemessen bis zur Unterkante der Messpatte). Um ein Hinterströmen des flexiblen Trägermaterials (Silikon) mit warmer Raumluft zu vermeiden, wurde die Wärmestrommessplatte umseitig abgeklebt (siehe Abb. 97).



Abb. 96 - Mauerwerkssensoren mit Silikonverschluss in der Außenwand Ost (Versuchsgebäude 1) , A1



Abb. 97 - Wärmestrommessplatte der Außenwand West (Versuchsgebäude 1), A1

Im Versuchsgebäude 5 wurde aus Kostengründen, aber auch aufgrund der aktiven Beregnung der Außenwände (siehe Abschnitt 3.2.4 Beregnung) und der zu erwartenden Feuchtigkeitsbelastung, auf die komplexe Monitoringtechnik verzichtet. So ist im Gegensatz zu Versuchsgebäude 1 bis 4 das Innenklima nicht über einen digitalen Messwertgeber mit integrierten Sensoren für Temperatur und Luftfeuchtigkeit (siehe Abb. 76 und Abb. 98) aufgezeichnet worden, sondern ausschließlich über einen NTC-Temperatursensor (siehe Abb. 99). Dieser war aufgrund der Bauart ca. 10 cm tiefer als die Heizungssensoren der Versuchsgebäude montiert und an den Impulslogger der Heizungstechnik (siehe Abb. 79) angeschlossen. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde im Versuchsgebäude 5 separat über einen kapazitiven Sensor gemessen und als Momentanwert in der Schaltzentrale angezeigt (siehe Abb. 99). Die Messwerte wurden jedoch nicht gespeichert.



Abb. 98 - Heizungssensor (links) und Innenraumsensor des Monitoringsystems (rechts) im Versuchsgebäude 3, A1



Abb. 99 - Heizungssensor (links), Feuchtesensor (Mitte) und Temperatursensor (rechts) im Versuchsgebäude 5, A1

Für die im Innenraum und den Außenwänden der Versuchsgebäude verbauten Messwertgeber des Monitoringsystems (nutzen das Messelement SHT75) sind die maximalen absoluten Abweichungen vom wahren Wert in Abb. 100 und Abb. 101 angegeben. Daraus geht hervor, dass in einem Bereich von 10 % bis 90 % relativer Luftfeuchtigkeit eine Abweichung von \pm 1,8 Prozentpunkte möglich ist. Unterhalb von 10 % und oberhalb von 90 % relativer Luftfeuchtigkeit steigt die Abweichung jedoch auf bis zu \pm 4 Prozentpunkte linear an. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Angaben lediglich auf Messungen bei 25 °C beziehen und keine Hysterese des Messelements enthalten. Zudem kann sich ein sogenannter "Offset" um bis zu 3 Prozentpunkte einstellen, wenn der Messwertgeber länger als 60 Stunden einer relativen Luftfeuchtigkeit über 80 % ausgesetzt ist.⁵⁴



Abb. 100 - Maximale Abweichungen bei Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit (bezogen auf 25 °C), A18



Abb. 101 - Maximale Abweichungen bei Messungen der Lufttemperatur, A18

⁵⁴ SENSIRION AG 2011, S. 2 - 3

Da die Innenraumtemperaturen im Rahmen des Forschungsprojektes von großer Bedeutung sind, wurde ergänzend zu den in Abb. 101 genannten Abweichungen überprüft, in welchem Umfang die Messwerte der Innenraumsensoren tatsächlich voneinander abweichen. Dazu wurde am 15.04.2017 die Innenraumsensorik der Versuchsgebäude 2, 3 und 4 ausgebaut und in das Versuchsgebäude 1 eingebaut. Der Einbau der Sensoren erfolgte hier nebeneinander und auf gleicher Höhe mit dem Heizungssensor, d.h. 158,5 cm über der obersten Abdichtungslage (siehe Abb. 102). Diese konnten daraufhin über den Datenlogger des Versuchsgebäudes 1 an das Monitoringsystem angeschlossen werden (siehe Abb. 94). Im Zeitraum vom 15.04.2017 bis 18.04.2017 wurden nun von jedem der 4 Innenraumsensoren 59 zeitgleich gemessene Innenraumtemperaturen manuell⁵⁵ aufgenommen. Anhand der gewonnen Messwerte, die in einem Temperaturbereich von 18,07 °C bis 20,20 °C lagen, konnte für jeden der 4 Innenraumsensoren eine gemittelte Innenraumtemperatur bestimmt werden. Die Standardabweichung⁵⁶ dieser Mittelwerte beträgt 0,051 °C. Die Abweichung der Mittelwerte der einzelnen Sensoren (basierend auf jeweils 59 Messwerte) gegenüber dem Mittelwert aller Sensoren (basierend auf 59 x 4 Messwerten) ist in Tab. 8 zusammengestellt.

Innenraumsensor	Mittelwert einzelner Innenraumsensoren	Mittelwert aller Innenraumsensoren	Abweichung
aus versuensgebaude	[°C]	[°C]	[°C]
1	19,257		0,074
2	19,172	10 102	-0,011
3	19,113	19,103	-0,070
4	19,189		0,007

Tab. 8 - Abweichungen der Innenraumsensoren von Versuchsgebäude 1 bis 4, T1

Am 01.05.2017 wurde über eine Kabelverlängerung der Innenraumsensor von Versuchsgebäude 4 an den Datenlogger des Versuchsgebäudes 1 angeschlossen und im Versuchsgebäude 5 eingebaut (siehe Abb. 103). Die Montage des Sensors erfolgte auch hier auf gleicher Höhe zum Heizungssensor, d.h. 158,5 cm über der obersten Abdichtungslage.



Abb. 102 - Gegenüberstellung der Innenraumsensoren der Versuchsgebäude 1 bis 4 (alle Sensoren links), A1



Abb. 103 - Gegenüberstellung der Innenraumsensoren der Versuchsgebäude 4 und 5 (beide Sensoren rechts), A1

⁵⁵ Die Messwerte der Innenraumtemperaturen mussten manuell ausgelesen werden (alle 10 Minuten), um den Aufzeichnungsvorgang des gesamten Monitoringsystems nicht stoppen und neustarten zu müssen. Die genauen Zeiträume des händischen Auslesens waren der 15.04.2017 von 14:50 Uhr bis 16:10 Uhr, 16.04.2017 von 11:00 Uhr bis 12:40 Uhr, 17.04.2017 von 13:50 Uhr bis 16:20 Uhr und 17:30 Uhr bis 20:30 Uhr sowie der 18.04.2017 von 10:10 Uhr bis 10:40 Uhr.

⁵⁶ Empirische Standardabweichung bezogen auf die Grundgesamtheit.

Im Zeitraum vom 01.05.2017, 15:30 Uhr bis 03.05.2017, 10:00 Uhr wurden die Messwerte beider Innenraumsensoren in 30-Minuten-Schritten automatisch⁵⁷ aufgezeichnet. Dabei konnten mit jedem Sensor 86 Messwerte ermittelt werden, die in einem Temperaturbereich von 18,51 °C und 20,89 °C lagen. Für den gesamten Messzeitraum wurde daraufhin je Innenraumsensor der Mittelwert für die Innenraumtemperatur bestimmt (basierend auf 86 Messwerte). Aus der Gegenüberstellung beider Mittelwerte ergab sich anschließend eine Abweichung von 0,037 °C (siehe Tab. 9).

Innenraumsensor	Mittelwert einzelner Innenraumsensoren	Abweichung
aus versuchsgebaude	[°C]	[°C]
4	19,562	0.027
5	19,526	0,037

Tab. 9 - Abweichungen der Innenraum	sensoren von Versuchsgebäude 4 und 5, T1
-------------------------------------	--

Ergänzend zum Vergleich der Innenraumsensoren wurden im Anschluss an den Versuchszeitraum die Mauerwerkssensoren in jedem Versuchsgebäude ausgebaut und hinsichtlich der Messung der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit gegenübergestellt (siehe Abb. 104 bis Abb. 107).



Abb. 104 - Gegenüberstellung der Mauerwerkssensoren in Versuchsgebäude 1, A1



Abb. 105 - Gegenüberstellung der Mauerwerkssensoren in Versuchsgebäude 2, A1



Abb. 106 - Gegenüberstellung der Mauerwerkssensoren in Versuchsgebäude 3, A1



Abb. 107 - Gegenüberstellung der Mauerwerkssensoren in Versuchsgebäude 4, A1

⁵⁷ Die Aufzeichnung der Messwerte konnte automatisch erfolgen, weil der Innenraumsensor von Versuchsgebäude 4 nicht an einem neuen Steckplatz des Datenloggers angeschlossen wurde, sondern an einem Steckplatz, an dem zuvor ein Mauerwerkssensor installiert war. Da dieser Steckplatz bereits automatisch aufgezeichnet wurde, konnte ein Neustart des Monitoringsystems umgangen werden. Nach dem Abschluss der Maßnahme wurde der Innenraumsensor entfernt und der Mauerwerkssensor wieder angeschlossen.

Die Installation der Mauerwerkssensoren im Innenraum erfolgte auf der gleichen Höhe mit dem Heizungssensor und dem Innenraumsensor des jeweiligen Versuchsgebäudes. Eine Stunde nach dem Umbau wurde mit der Aufzeichnung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit begonnen. Über den gesamten Untersuchungszeitraum vom 03.01.2018 bis 08.01.2018 konnten pro Mauerwerkssensor ca. 720 Messwerte in Zeitschritten von 10 Minuten für die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit erfasst werden. Anschließend wurde sensorbezogen der Mittelwert für beide Messgrößen über den gesamten Untersuchungszeitraum bestimmt. Diese Mittelwerte wurden nun genutzt, um für jedes Versuchsgebäude die Standardabweichung der Mauerwerkssensoren zu berechnen. Für die Messung der Lufttemperatur sind die Standardabweichungen in Tab. 10 und für die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit in Tab. 11 zusammengestellt.

Mauerwerkssensoren	Zeitraum der Untersuchung	Mittelwert der Lufttemperatur [*]	Standardabweichung der Grundgesamtheit
ini versuchsgebaude	[-]	[°C]	[°C]
1	Start: 03.01.2018, 14:40 Uhr Ende: 08.01.2018, 14:30 Uhr	16,876	0,127
2	Start: 03.01.2018, 16:30 Uhr Ende: 08.01.2018, 16:20 Uhr	16,827	0,093
3	Start: 03.01.2018, 18:40 Uhr Ende: 08.01.2018, 18:30 Uhr	16,428	0,845
4	Start: 03.01.2018, 20:40 Uhr Ende: 08.01.2018, 20:30 Uhr	17,398	0,351

Tab. 10 - Standardabweichung für die Messung der Lufttemperatur mit den Mauerwerkssensoren, T1

^{*} Der Mittelwert der Lufttemperatur wurde mit dem Innenraumsensor des Versuchsgebäudes bestimmt.

Die etwas höhere Standardabweichung von Versuchsgebäude 3 bei der Messung der Lufttemperatur (siehe Tab. 10) ist auf die Sensorik der Bohrtiefe 25,0 cm zurückzuführen, die aber zur Auswertung nicht herangezogen wurde (siehe Abschnitt 3.4.1 Lufttemperatur). Wird die Standardabweichung hingegen nur mit den weniger feuchtigkeitsbelasteten Sensoren der Bohrtiefe 4,0 cm berechnet, so beläuft sich diese auf 0,040 °C. Bei der relativen Luftfeuchtigkeit stellt sich die Situation ähnlich dar (siehe Tab. 11). Werden für die Versuchsgebäude 2 und 3 nur die Sensoren der Bohrtiefe 4,0 cm herangezogen, so resultiert eine Standardabweichung von 1,35 Prozentpunkte (Versuchsgebäude 2) und von 0,58 Prozentpunkte (Versuchsgebäude 3).

Mauerwerkssensoren	Zeitraum der Untersuchung	Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit [*]	Standardabweichung der Grundgesamtheit
III versuchsgebaude	[-]	[%]	[Prozentpunkte]
1	Start: 03.01.2018, 14:40 Uhr Ende: 08.01.2018, 14:30 Uhr	50,584	1,157
2	Start: 03.01.2018, 16:30 Uhr Ende: 08.01.2018, 16:20 Uhr	50,299	3,040
3	Start: 03.01.2018, 18:40 Uhr Ende: 08.01.2018, 18:30 Uhr	50,307	3,042
4	Start: 03.01.2018, 20:40 Uhr Ende: 08.01.2018, 20:30 Uhr	45,410	1,344
3	Start: 03.01.2018, 18:40 Uhr Ende: 08.01.2018, 18:30 Uhr Start: 03.01.2018, 20:40 Uhr Ende: 08.01.2018, 20:30 Uhr	50,307 45,410	3,042 1,344

Der Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit wurde mit dem Innenraumsensor des Versuchsgebäudes bestimmt.

Nach dem Abschluss des Versuchszeitraums erfolgte neben dem Vergleich der Mauerwerkssensoren auch ein Vergleich der Wärmestrommessplatten. Zur Durchführung der Untersuchung wurde die Eingangstür des Versuchsgebäudes 1 gewählt (siehe Abb. 108), da die Dämmeigenschaften über die Türblattfläche als näherungsweise konstant eingeschätzt werden können. Zudem ist das Türblatt durch eine ebene und glatte Oberfläche gekennzeichnet. Diese ermöglicht eine einfache Montage mittels Aufkleben, bei der die Wärmestrommessplatten vollflächig aufliegen. Die Abklebung erfolgte hier in der gleichen Form und mit den gleichen Maßen, wie bei der Montage an den Außenwänden (siehe Abb. 109 und Abb. 97). Die Wärmestrommessplatten wurden dabei um den Schwerpunkt des von außen abgeklebten Türblatts mit einem lichten Abstand von 13 cm angeordnet.



Abb. 108 - Wärmestrommessplatten an der Eingangstür von Versuchsgebäude 1, A1



Abb. 109 - Wärmestrommessplatten des Versuchsgebäudes 1 und 2 (oben) sowie des Versuchsgebäudes 3 und 4 (unten), A1

Vor dem Beginn der Datenaufnahme wurde der Elektroradiator um 90° gedreht, sodass dieser längs zur Eingangstür stand. Dabei wurde auch der Abstand zwischen Elektroradiator und Eingangstür auf 2 m vergrößert. Vom 06.01.2018, 15:30 Uhr bis 07.01.2018, 14:40 Uhr erfolgte in Schritten von 10 Minuten die Datenaufnahme (ohne Wärmedämmelement der Eingangstür). Die Ergebnisse sind in Tab. 12 dargestellt. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Abweichung nur zwischen den beiden oberen und zwischen den beiden unteren Wärmestrommessplatten bestimmt wurde, da je nach Montagehöhe ein anderer Abstand zum Elektroradiator bestand.

Tab. 12 -	Abweichungen der	Wärmestrommessplatten aus	den Versuchsgebäuden 1	bis 4, T1
-----------	------------------	---------------------------	------------------------	-----------

Wärmestrommessplatte	Mittelwert der Innenraumtemperatur [*]	Mittelwert der Außentemperatur	Mittelwert der Wärmestromdichte	Abweichung
aus versuchisgebaude	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[W/m ²]
1			-11,295	0 151
2	10.000	2 600	-11,144	0,151
3	19,062	2,099	-12,287	0.077
4			-12,364	0,077

^{*} Der Mittelwert der Lufttemperatur wurde mit dem Innenraumsensor des Versuchsgebäudes 1 bestimmt.

Das *Außenklima* am Versuchsstandort (Höhenlage: 7 m über Normalhöhennull) wurde mit einem meteorologischen Messsystem erfasst, dass aus zwei Komponenten bestand. Die erste Komponente ist ein nach Norden ausgerichteter Strahlungsmesskopf (siehe Abb. 110) für globale, direkte und diffuse Sonnenstrahlung, der am höchsten Punkt der süd-östlichen Ecke von Versuchsgebäude 1 montiert wurde (Höhenlage: 3,88 m über der Geländeoberkante). Die zweite Komponente stellt ein meteorologischer Messwertgeber dar (siehe Abb. 111), der sich am Container der Schaltzentrale auf einer Höhe von 2,98 m über der Geländeoberkante befand (siehe Anhang 10 - Ausführungsplanung) und ebenfalls nach Norden ausgerichtet war. Mit dem meteorologischen Messwertgeber konnte über digitale Sensoren die Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und die Niederschlagshöhe (flüssige und feste Niederschläge) erfasst werden.



Abb. 110 - Strahlungsmesskopf an der süd-östlichen Ecke von Versuchsgebäude 1, A1



Abb. 111 - Meteorologischer Messwertgeber am Container der Schaltzentrale, A1

Alle Messgrößen des *Innenklimas*, der *Außenwände* und des *Außenklimas* wurden im Rhythmus von 10 Minuten von Datenloggern bzw. Universalmessgeräten (siehe Abb. 94) über Netzwerktechnik (siehe Abb. 78) an einen örtlichen Monitoringserver gesendet und dort kontinuierlich gespeichert. Nach 24 Stunden sind die erfassten Daten (ca. 27.500 Datenfelder) um 00:00 Uhr automatisiert per E-Mail an das Institut KGBauko übersendet worden. Es erfolgte dann die Datenaggregation in Excel und die quantitative sowie qualitative Überprüfung mittels grafischer Auswertung (siehe Abb. 112).



Abb. 112 - Datenaggregation in Excel (links) und grafische Auswertung (rechts), A1

3.2.4 Beregnung

Zur Sicherstellung einer sinnvollen Nutzung bzw. Dosierung der Beregnungsanlage wurde zunächst ein Beregnungsprogramm konzipiert, das an dieser Stelle beschrieben werden soll. Zielsetzung bei der Entwicklung des Beregnungsprogramms war es, eine für den deutschen Raum hohe, aber nicht unrealistisch hohe Schlagregenbelastung beim Versuchsgebäude 5 abzubilden. Deshalb wurde für einen Zeitraum von 80 Jahren (1935 bis 2014) eine Analyse der jährlichen Niederschlagsmengen von Deutschland durchgeführt. Auf Grundlage des dabei ermittelten Höchstwertes ist nach einem Standort bzw. nach einer Wetterstation in Deutschland gesucht worden, die im Mittel über 10 Jahre (2005 bis 2014) eine ähnlich hohe jährliche Niederschlagsmenge ausweist. Die für diesen Standort und Zeitraum resultierende Schlagregenbelastung soll anschließend in Form aktiver Beregnung auf das Versuchsgebäude 5 übertragen werden. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch, dass nur dann eine hohe Schlagregenbelastung resultiert, wenn neben einer hohen Niederschlagsmenge gleichzeitig eine hohe Windgeschwindigkeit vorliegt. Die Suche nach einer geeigneten Wetterstation erfolgte daher auch unter Berücksichtigung der Messgröße Windgeschwindigkeit.

Im ersten Schritt zur Konzeption des Beregnungsprogramms wurden die auf ein Jahr bezogenen Niederschlagswerte für Deutschland analysiert. Aus der Abb. 113 geht hervor, dass im Zeitraum von 1935 bis 2014 die höchste jährliche Niederschlagsmenge mit 1.018,10 l/m² im Jahr 2002 auftrat. Dieser Wert wurde in der Konzeption des Beregnungsprogramms als Referenzwert verwendet.⁵⁸



Im zweiten Schritt galt es nun eine Wetterstation zu finden, die über einen Zeitraum von 10 Jahren (2005 bis 2014) einen durchschnittlichen Jahresniederschlag ausweist, der nahe am Referenzwert von 1.018,10 l/m² liegt. Die auszuwählende Station sollte sich dabei nicht auf einer für Deutschland extremen Höhe befinden, sondern näherungsweise der mittleren Stationshöhe des hauptamtlichen Stationsnetzes des Deutschen Wetterdienstes von ca. 290 m entsprechen.⁵⁹

⁵⁸ Die Abfrage der Niederschlagswerte für Deutschland erfolgte über:

https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihenundtrends/zeitreihenundtrends.html - 19.04.2018

⁵⁹ Die Abfrage der Stationshöhen des hauptamtlichen Stationsnetzes des Deutschen Wetterdienstes erfolgte über: https://www.dwd.de/DE/leistungen/bodenwettermeldung/bodenwettermeldung.html - 19.04.2018

Um die Anzahl möglicher Wetterstationen zu begrenzen, erfolgte nun eine Niederschlagsanalyse für die einzelnen Bundesländer. Dazu wurde der Datenbestand des Deutschen Wetterdienstes genutzt. Daraus ging hervor, dass die höchsten Jahresniederschläge im langjährigen Mittel (1935 bis 2014) in den Bundesländern Baden-Württemberg (968 l/m²), Bayern (937 l/m²), Nordrhein-Westfalen (873 l/m²) und Rheinland-Pfalz einschließlich des Saarlands (802 l/m²) auftreten. Es liegt somit nahe, in diesen Bundesländern nach einer Wetterstation zu suchen, die den Vorgaben hinsichtlich der gemittelten jährlichen Niederschlagsmenge von 1.018,10 l/m² und der Stationshöhe von 290 m entspricht. Eine gute Übereinstimmung konnte bei den Wetterstationen Solingen-Hohenscheid und Lüdenscheid in Nordrhein-Westfalen, sowie bei der Wetterstation Chieming in Bayern festgestellt werden (siehe Tab. 13).⁶⁰

Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes	Mittelwert der jährlichen Niederschlagsmenge (2005 - 2014)	Höhe der Wetterstation über NN	Mittelwert der Windgeschwindigkeit (2005 - 2014)				
	[l/m ²]	[m]	[m/s]				
Solingen-Hohenscheid	1.021,27	154	$3,15^{*}$				
Lüdenscheid	1.128,87	387	3,01				
Chieming	1.131,61	551	2,94				
Hinweise	* Es wurden die Winddaten der Wetterstation "Essen-Bredeney" verwendet (Entfernung Wetterstation Solingen Hohenscheid Luftlinie ca. 31 km. Höhendifferenz: 4 m)						

Tab. 1	13 -	Wetterstationen	mit einer	jährlichen	Niederschl	agsmenge nahe	e dem Ref	erenzwert (10-Jahres-We	erte),	Т2
--------	------	-----------------	-----------	------------	------------	---------------	-----------	-------------	--------------	--------	----

An erster Stelle wird die Station Solingen-Hohenscheid näher betrachtet. Diese weist mit 1.021,27 l/m² einen Mittelwert der jährlichen Niederschlagsmenge auf, die sehr nahe am Referenzwert liegt. Da allerdings für den Standort keine Winddaten in der Datenbank des Deutschen Wetterdienstes vorliegen, wurden diese von der Wetterstation Essen-Bredeney verwendet. Die Stationen sind etwa 31 km voneinander entfernt und befinden sich auf einer nahezu gleichen Höhe. Für die Standorte Lüdenscheid und Chieming sind die Winddaten vorhanden, sodass die Schlagregenbelastung für vertikale Bauteilflächen nach Gl. 4 bestimmt werden konnte.⁶¹

	$R_{\rm S} = R_{\rm N}(R_1 + R_2 v_{\rm w})$	Gl. 4
R _S	Schlagregenbelastung auf senkrechte Fassadenfläche	$[l/m^2]$
R _N	Niederschlagsmenge auf horizontale Fläche	$[l/m^2]$
R ₁	Schlagregenkoeffizient 1 (0 bei senkrechten Flächen)	[s/m]
R ₂	Schlagregenkoeffizient 2 (0,2 bei exponierter Lage der Wand)	[s/m]
V _W	Windgeschwindigkeit	[m/s]

⁶⁰ Die Abfrage der Niederschlagswerte einzelner Bundesländer erfolgte über: https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihenundtrends/zeitreihenundtrends.html - 26.04.2018

Die Abfrage der Niederschlagswerte ausgewählter Wetterstationen erfolgte über: https://www.dwd.de/DE/leistungen/weste/westexl/weste_xl.html - 26.04.2018

⁶¹ KÜNZEL 1994, S. 34

Die Berechnung der Schlagregenbelastung entsprechend Gl. 4 erfolgte für die Standorte Solingen-Hohenscheid, Lüdenscheid und Chieming über einen Zeitraum von 10 Jahren, d.h. von 2005 bis 2014. Dazu wurden die verfügbaren Daten (Tageswerte der Niederschlagshöhe und Stundenwerte der mittleren Windgeschwindigkeit) monatsweise zusammengefasst. Mit den resultierenden Werten konnte nun die Schlagregenbelastung auf eine vertikale Fassadenfläche für jeden Monat und durch Aufsummieren für jedes Jahr des o.g. Zeitraums berechnet werden. In die Berechnung ging der Schlagregenkoeffizient R₁ mit 0 s/m und der Schlagregenkoeffizient R₂ mit dem 0,2 s/m ein, die für senkrechte Bauteile (Außenwände) mit exponierter Lage gelten. Die Ergebnisse der Berechnung können Abb. 114 entnommen werden.



Abb. 114 - Berechnete Schlagregenbelastung für die 3 ausgewählten Wetterstationen, A8

In dem nun folgenden Schritt wurde die zum Versuchsstandort nächstgelegene Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes ausgewählt (Greifswald), um für diese ebenso die Schlagregenbelastung über 10 Jahre monatsweise zu berechnen. Aus der Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse von Greifswald und den 3 ausgewählten Wetterstationen (siehe Tab. 13) ergibt sich eine Differenz der Schlagregenbelastung (siehe Abb. 115). Diese Differenz soll mit der Beregnungsanlage auf die Fassaden des Versuchsgebäudes 5 aufgebracht werden, um die Schlagregenbelastung von Solingen-Hohenscheid, Lüdenscheid oder Chieming am Versuchsstandort künstlich abzubilden.



Abb. 115 - Durchschnittliche Schlagregenbelastung pro Jahr gemittelt über 10 Jahre, A8

Als Referenz wurde im letzten Schritt die Wetterstation Solingen-Hohenscheid ausgewählt, da die Schlagregenbelastung im Vergleich zu Lüdenscheid und Chieming am niedrigsten ist und somit eher einen konservativen Ansatz darstellt. Zudem liegt der Mittelwert der Jahresniederschlagsmenge für den Zeitraum 2005 - 2014 (siehe Tab. 13) am nächsten an der Referenz-Jahresniederschlagsmenge von 1.018,10 l/m² (siehe Abb. 113). Auch die Stationshöhe befindet sich mit 154 m in einer guten Nähe zur mittleren Stationshöhe des hauptamtlichen Stationsnetzes des Deutschen Wetterdienstes (ca. 290 m). Im direkten Vergleich mit der Wetterstation Greifswald resultiert somit eine jährliche Differenz-Schlagregenbelastung von 157,88 l/m² (siehe Abb. 115), die durch aktive Beregnung auf die Ost-, Süd- und Westfassade des Versuchsgebäudes 5 aufzubringen ist. Dies erfolgt über eine Beregnungsanlage, die zeitgesteuert an- und abgeschaltet wird (siehe Abb. 116 und Abb. 117).



Abb. 116 - Versuchsgebäude 5 und Beregnungsanlage, A1



Abb. 117 - Beregnungsanlage im laufenden Betrieb, A1

Unter Berücksichtigung der Fläche der zu beregnenden Fassaden (31,30 m²), des Volumenstroms der Beregnungsanlage (144,55 l/h), des Beregnungszeitraums (01. Mai bis 31. Oktober) sowie der Beregnungshäufigkeit (5 Tagen pro Woche) ergab sich eine Beregnungsdauer von 22 Minuten pro Tag bzw. Beregnungseinheit (siehe Tab. 14). Um Verluste bei der Beregnung zu berücksichtigen, wurde die benötigte Gesamtwassermenge pro Jahr pauschal um 40 % erhöht. Zudem wurde für eine bessere Kontrolle der Beregnungseinheiten, die Anlage so konfiguriert, dass die Beregnung montags bis freitags im Zeitraum von 09:00 Uhr bis 09:22 Uhr stattfand.

Tab.	14 -	Eingangsdaten	zur Best	immung d	der I	Dauer	einer	Beregnun	gseinheit.	Т1
I av.	11.	Lingungsuaten	Zui Dest	inning v	uci	Dauci	cinci	Deregnun	goennen,	

Eingangsdaten	Wert	Einheit
Differenz der jährlichen Schlagregenbelastung	157,88	[l/m²]
Gesamtwassermenge bei 31,30 m² Fassadenfläche	4.941,92	[1]
Gesamtwassermenge bei 40 % Wasserverlust der Anlage	6.918,69	[1]
Beregnungsdauer bei einem Volumenstrom von 144,55 l/h	2.871,91	[min]
Beregnungstage für das Jahr 2016	131	[d]
Beregnungstage für das Jahr 2017	132	[d]
Dauer einer Beregnungseinheit	22	[min]

Um in Erfahrung zu bringen wie viel Wasser bei einer Beregnungsdauer von 22 Minuten die 3 aktiv beregneten Fassaden tatsächlich erreicht und von diesen tatsächlich aufgenommen wird, wurde das Erdreich vor den Außenwänden einmalig abgeplant. Mit Hilfe der Abplanung konnten sämtliche Wassermengen aufgefangen werden, die im Verlauf der Beregnung die Fassaden nicht treffen oder in diese nicht eindringen können, wie z.B.

- 1. Wassermengen, die das Mauerwerk seitlich verfehlen
- 2. Wassermengen, die nur das Erdreich vor dem Mauerwerk erreichen
- 3. Wassermengen, die nur die Perimeterdämmung unterhalb des Mauerwerks erreichen
- 4. Wassermengen, die an den Beregnungsdüsen unkontrolliert nach unten austreten
- 5. Wassermengen, die am Mauerwerk abprallen oder herunterlaufen

Dazu wurden die Planen nicht nur großflächig zugeschnitten und umlaufend Vorort arrangiert, sondern auch direkt unter dem Mauerwerk an der Oberkante der Perimeterdämmung montiert (siehe Abb. 118 und Abb. 119).



Abb. 118 - Großflächig abgeplantes Erdreich vor den Außenwänden Süd und West, A1



Abb. 119 - Großflächig abgeplantes Erdreich vor den Außenwänden West und Nord, A1

Die am 18.10.2017 durchgeführte Untersuchung zeigt, dass im Verlauf einer Beregnungseinheit mit der Länge von 22 Minuten eine Gesamt-Wassermenge in Höhe von 53,00 l die Beregnungsanlage verlässt. In dieser Zeit konnte mit der Abplanung eine Verlust-Wassermenge von 19,98 l bestimmt werden. Daraus resultiert, dass maximal 33,02 l Wasser von den aktiv beregneten Außenwänden aufgenommen wurde. Damit belaufen sich der Anteil der Verlust-Wassermenge auf 37,70 % und der Anteil der von den Fassaden aufgenommenen Wassermenge auf 62,30 %. Unter Einbeziehung der gesamten beregneten Fassadenfläche (31,30 m²) resultiert eine flächenbezogene Wassermenge von 1,06 l/m^2 (siehe Tab. 15).

Tab. 15 - Gesamt- und Verlust-Wassermenge einer Beregnungseinheit mit der Länge von 22 Minuten, T1

Dauer der Beregnung	Wasser gesa	rmenge amt	Wassermenge Verlust		Wasser Fassa	rmenge aden	Wassermenge flächenbezogen
[min]	[1]	[%]	[1]	[%]	[1]	[%]	[l/m²]
22	53,00	100	19,98	37,70	33,02	62,30	1,06

Wichtige Eckdaten zur aktiven Beregnung von Versuchsgebäude 5 sind für das Jahr 2016 in Tab. 16 zusammengestellt. Wie geplant, konnte die Beregnung im Zeitraum vom 01.05.2016 bis 31.10.2016 erfolgen. Lediglich an 3 Tagen (01.08.2016 bis 03.08.2016) kam es zu einer Unterbrechung der Wasserversorgung und somit auch zu einem Ausfall der Beregnungsanlage. In der Summe wurden in den 6 Monaten der aktiven Beregnung 7.389 Liter Wasser von der Beregnungsanlage abgegeben. Bei einem Verlust von 37,70 % (siehe Tab. 15) entspricht dies einem Feuchtigkeitseintrag auf den Fassaden von 4.603,68 l bzw. 147,07 l/m².

Zeitraum der Beregnung	Anzahl der Beregnungstage	Zeitraum der Ausfälle	Anzahl der Ausfalltage
01.05.2016 - 31.10.2016	131	01.08.2016 - 03.08.2016	3
Wassermenge gesamt	Wassermenge Verlust	Wassermenge Fassaden	Wassermenge flächenbezogen
[1]	[1]	[1]	[l/m ²]
7.389	2.785,32	4.603,68	147,07

Tab.	16 -	Daten	für die	e aktive	Beregnung	von V	/ersuchsge	bäude	5 im	Jahr	2016,	T1
					0 - 0	-)	

Zu Beginn der Beregnungsphase im Jahr 2017 kam es aufgrund von Frostschäden an den Düsen der Sprinkler zu einem Ausfall der Beregnungsanlage. Daher konnte mit dem regelmäßigen Beregnen des Versuchsgebäudes 5 erst nach einer Reparatur am 22.05.2017 begonnen werden. Ohne weitere Ausfälle wurde bis zum 31.10.2017 eine Wassermenge von 4.074,72 l auf die Fassaden aufgebracht. Bezogen auf die beregnete Mauerwerksfläche entspricht dies einer Wassermenge von 130,17 l/m² (siehe Tab. 17). Darin enthalten ist auch eine zusätzliche und außerplanmäßige Beregnungseinheit, die am 16.10.2017 von 10:40 Uhr bis 11:02 Uhr erfolgte. Die Untersuchung am 18.10.2017 wurde hingegen im Rahmen einer regulären Beregnungseinheit durchgeführt (siehe Tab. 15).

Tab. 17 - Daten für die aktive Beregnung	von Versuchsgebäude 5 im Jahr 2017, T1
--	--

Zeitraum der Beregnung	Anzahl der Beregnungstage	Zeitraum der Ausfälle	Anzahl der Ausfalltage
01.05.2017 - 31.10.2017	132	01.05.2017 - 21.05.2017	15
Wassermenge gesamt	Wassermenge Verlust	Wassermenge Fassaden	Wassermenge flächenbezogen
[1]	[1]	[1]	[l/m ²]
6.540	2.465,28	4.074,72	130,17

Relevante Eckdaten zur Wartung der Beregnungsanlage sind in Tab. 18 zusammengefasst. Die darin aufgeführte Wassermenge entspricht jedoch nur der im Verlauf des Wartungsvorgangs abgegebenen Gesamt-Wassermenge.

Tab. 18 - Daten zur Wartung der Beregnungsanlage im Jahr 2016 und 2017, T1

Datum	Ereignis	Wassermenge
[-]	[-]	[1]
05.04.2016	Test der Beregnungsanlage	189
30.04.2016	Einstellung der Beregnungsanlage	310
01.05.2017	Test der Beregnungsanlage	161
19.05.2017	Reparatur der Beregnungsanlage	247

3.3 Messung - Innenklima

3.3.1 Lufttemperatur

Die in der ersten Heizphase (01.02.2016 bis 30.04.2016) und der zweiten Heizphase (01.10.2016 bis 31.12.2016) gemessenen Innenraumtemperaturen der 5 Versuchsgebäude sind in Abb. 120 als gleitende Tagesmittelwerte dargestellt. Obwohl alle Versuchsgebäude mit der gleichen Heizphasen unterschiedliche Innenraumtemperaturen ein. Zurückzuführen ist dieser Effekt auf die Trägheit der Elektroradiatoren und die jeweilige Auskühlgeschwindigkeit der Versuchsgebäude. So wird mit dem Unterschreiten des unteren Temperatur-Grenzwertes (19,8 °C) erst zeitverzögert Wärme durch den Radiator an den Innenraum abgegeben. Bei Versuchsgebäuden mit höherer Auskühlgeschwindigkeit führt dies kurzzeitig zu niedrigeren Innenraumtemperaturen, als bei Versuchsgebäuden, die durch eine kleinere Auskühlgeschwindigkeit geprägt sind. Aufgrund der kontinuierlichen Wiederholung dieses Trägheitseffekts infolge der wechselnden Zu- und Abschaltung der Radiatoren, spiegeln sich die kurzzeitigen Unterschreitungen des unteren Temperatur-Grenzwertes in den Tagesmittelwerten der Innenraumtemperaturen wider. Dies erfolgt umso stärker, je größer die Differenz zwischen der Innen- und Außentemperatur bzw. die Auskühlgeschwindigkeit der Versuchsgebäude ist.



Abb. 120 - Lufttemperatur in den Versuchsgebäuden (gleitende Tagesmittelwerte), A1

In der ersten Heizphase liegen die Mittelwerte der Innenraumtemperatur von Versuchsgebäude 1 bis 5 in einer guten Nähe zur angestrebten Zieltemperatur von 20 °C. Die größte Abweichung von 1,28 °C, dies entsprich 6,40 %, ist bei Versuchsgebäude 5 gegeben (siehe Tab. 19). Der zu Beginn der ersten Heizphase deutlich sichtbare Versatz im Kurvenverlauf der Innenraumtemperaturen kann neben den Trägheitseffekten der Radiatoren auch auf die thermisch noch nicht eingeschwungene Gebäudehülle zurückgeführt werden. Diese wirkt sich vor allem auf die Versuchsgebäude 1, 2, 3 und 5 aus, da hier keine innenseitige Wärmedämmung, wie beim Versuchsgebäude 4, vorhanden ist. Die niedrige Temperatur der massiven Außenwände hat somit einen direkten Einfluss auf die sich einstellende Innenraumtemperatur. Mit dem fortschreitenden Erwärmen der thermischen Gebäudehülle und den damit verbundenen Wärmespeichereffekten reduzieren sich allerdings die Abweichungen zwischen den Innenraumtemperaturen der Versuchsgebäude. Besonders deutlich wird dies gegen Ende der ersten Heizphase (April 2016) und im Verlauf der zweiten Heizphase. Hier liegen die Kurven der Tagesmittelwerte der Innenraumtemperaturen dichter zusammen (siehe Abb. 120). Lediglich das Versuchsgebäude 4 ist zu Beginn der zweiten Heizphase aufgrund der aktiven Luftentfeuchtung (Geräteabwärme) und höherer Außentemperaturen durch ein Überschreiten der Zieltemperatur gekennzeichnet. Im Mittel stellen sich aber bei allen Versuchsgebäuden über die zweite Heizphase kleinere Abweichungen von der Zieltemperatur ein (maximal 1,01 °C bzw. 5,05 %), als in der ersten Heizphase (siehe Tab. 19).

suchs- äude	Versuchsstart	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	-0,38	19,03	19,18	19,52	19,25
2	-0,35	19,09	19,26	19,65	19,34
3	-0,70	18,85	19,00	19,31	19,06
4	-0,12	19,93	20,00	20,08	20,00
5	-0,20	18,25	18,67	19,22	18,72
suchs- äude	Oktober 2016	Novemb	er 2016	Dezember 2016	Heizphase 2
Versuchs- gebäude	Oktober 2016 [°C]	Novemb	per 2016 C]	Dezember 2016 [°C]	Heizphase 2 [°C]
L Versuchs- gebäude	Oktober 2016 [°C] 19,50	Novemb [° 19	ber 2016 C] .15	Dezember 2016 [°C] 19,11	Heizphase 2 [°C] 19,26
Versuchs- gebäude	Oktober 2016 [°C] 19,50 19,71	Novemb [° 19]	ber 2016	Dezember 2016 [°C] 19,11 19,28	Heizphase 2 [°C] 19,26 19,44
- Versuchs- gebäude	Oktober 2016 [°C] 19,50 19,71 19,25	Novemb [° 19] 19] 19]	Der 2016 C] ,15 ,33 ,03	Dezember 2016 [°C] 19,11 19,28 18,96	Heizphase 2 [°C] 19,26 19,44 19,08
+ Versuchs- gebäude	Oktober 2016 [°C] 19,50 19,71 19,25 21,00	Novemb (° 19 19 19 19 19 19 19 19	Der 2016 Image: Second secon	Dezember 2016 [°C] 19,11 19,28 18,96 19,90	Heizphase 2 [°C] 19,26 19,44 19,08 20,28

Tab. 19 - Lufttemperatur in den Versuchsgebäuden (Mittelwerte 1. und 2. Heizphase 2016), T1

Für die dritte Heizphase (01.01.2017 bis 30.04.2017) und die vierte Heizphase (01.10.2017 bis 31.12.2017) sind die Innenraumtemperaturen der Versuchsgebäude als gleitende Tagesmittelwerte in Abb. 121 dargestellt. Lücken im Kurvenverlauf stellen Ausfälle bei der Datenaufzeichnung dar und sind in Tab. 20 zusammengefasst:

Versuchsgebäude	Beginn des Ausfalls	Ende des Ausfalls	Dauer des Ausfalls
2	15.04.2017, 13:00 Uhr	17.04.2017, 11:40 Uhr	46,67 h
3	15.04.2017, 12:30 Uhr	17.04.2017, 12:40 Uhr	48,17 h
4	15.04.2017, 12:10 Uhr	17.04.2017, 12:20 Uhr	48,17 h
5	31.12.2016, 13:30 Uhr 06.01.2017, 02:45 Uhr 21.10.2017, 09:15 Uhr 29.10.2017, 13:15 Uhr	01.01.2017, 00:45 Uhr 07.01.2017, 07:15 Uhr 27.10.2017, 10:30 Uhr 08.11.2017, 14:45 Uhr	11,25 h 28,50 h 145,25 h 241,5 h

Tab. 20 - Ausfälle bei der Datenaufzeichnung des Innenklimas, T1



In den beiden Heizphasen des Jahres 2017 konnte die Zieltemperatur von 20 °C bei allen Versuchsgebäuden mit einer guten Näherung erreicht werden. Die größten Abweichungen liegen weiterhin beim Versuchsgebäude 5 vor. Diese betragen in der dritten Heizphase 1,03 °C bzw. 5,15 % und in der vierten Heizphase 0,98 °C bzw. 4,90 %. Die kleinsten Abweichungen sind aufgrund des besseren Wärmeschutzes der Außenwände beim Versuchsgebäude 4 gegeben (siehe Tab. 21). Die zeitweise auftretende Überschreitung der Zieltemperatur ist wie in der zweiten Heizphase auf den Betrieb der Luftentfeuchter (Abwärme) und auf erhöhte Außentemperaturen zurückzuführen (siehe Abb. 121).

suchs- äude	Januar 2017	Februar 2017	März 201	7 Ap:	ril 2017	Heizphase 3
Vers geb	[°C]	[°C]	[°C]		[°C]	[°C]
1	18,92	19,00	19,34	-	19,52	19,20
2	19,11	19,21	19,53		19,71	19,39
3	18,83	18,90	19,14		19,28	19,04
4	19,83	19,84	20,07	2	20,49	20,05
5	18,56	18,71	19,19	-	19,39	18,97
suchs- äude	Oktober 2017	Novem	ber 2017	Dezembe	r 2017	Heizphase 4
Vers geb	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	19,63	19	9,22	19,0)7	19,31
2	19,82	19	9,43	19,2	22	19,49
3	19,30	19	9,03	18,9	2	19,08
4	20,89	19	9,93	19,9	2	20,25
5	19,57	18	3,88	18,7	/1	19,02

Tab. 21 - Lufttemperatur in den Versuchsgebäuden (Mittelwerte 3. und 4. Heizphase 2017), T1

3.3.2 Luftfeuchtigkeit

Die gleitenden Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit sind in Abb. 122 für die überwachten Versuchsgebäude dargestellt. Es verdeutlicht sich, dass die Versuchsgebäude 1 bis 3 in der ersten Heizphase sehr ähnliche, aber höhere Luftfeuchtigkeitswerte aufweisen, als das Versuchsgebäude 4. Verursacht wird diese Situation durch die hier verbaute Innendämmung aus Calciumsilikatplatten, die höhere Innenraumtemperaturen ermöglicht und zudem sehr sorptionsfähig ist.



Abb. 122 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Versuchsgebäuden (gleitende Tagesmittelwerte), A1

In der ersten Heizphase zeigt sich weiterhin, dass die angestrebte Luftfeuchtigkeit zwischen 35 % und 55 % (bezogen auf die Tagesmittelwerte) von den Versuchsgebäuden 1, 2 und 3 dauerhaft und von dem Versuchsgebäude 4 zeitweise überschritten wurde (siehe Tab. 23). Zurückzuführen ist dies auf die hohe Baufeuchtigkeit in den Außenwänden, auf die nicht vorgesehene Raumlüftung und auf Dampfdiffusionsprozesse, die mit steigenden Außentemperaturen zunehmend nach innen erfolgen. Die zur Luftentfeuchtung eingebrachten Salze konnten auch in großen Mengen den Anstieg der Luftfeuchtigkeit bestenfalls dämpfen, aber nicht auf die Zielwerte reduzieren. Bis zum 30.04.2016 wurden in den Versuchsgebäuden 1, 2, 3 und 5 die Salzmengen bis auf 13,00 kg sukzessive erhöht. In Versuchsgebäude 4 erfolgte eine Steigerung auf 2,00 kg. Eine Übersicht zu den Salzmengen, die während der ersten Heizphase in die Versuchsgebäude eingebracht wurden, gibt Tab. 22.

Tab. 2	22 -	Dokumentation	der	in die	Versuchs	gebäude	eingebr	rachten	Salzmenger	ı (1. I	Heizph	ase 201	6), T1

Versuchsgebäude	Datum	Menge	Summe
1, 2, 3, 5	16.01.2016, 22:30 Uhr 05.02.2016, 17:30 Uhr 13.02.2016, 17:00 Uhr 21.02.2016, 15:00 Uhr 13.03.2016, 15:00 Uhr	1.000 g 1.000 g 2.000 g 3.000 g 6.000 g	13.000 g
4	16.01.2016, 22:30 Uhr 05.02.2016, 17:30 Uhr	1.000 g 1.000 g	2.000 g

Durch die Umstellung von passive auf aktive Luftentfeuchtung (siehe Punkt 3.2.2 Entfeuchtung), konnten in der zweiten Heizphase bei den 4 überwachten Versuchsgebäuden Luftfeuchtigkeitswerte erreicht werden, die in dem angestrebten Bereich zwischen 35 % und 55 % liegen (siehe Tab. 23). Aufgrund der höheren Innenraumtemperaturen (siehe Tab. 19) und der feuchtigkeitsregulierenden Innendämmung (Sorptionsfähigkeit der Calciumsilikatplatten) erzielt das Versuchsgebäude 4 auch weiterhin die niedrigsten Mittelwerte für die relative Luftfeuchtigkeit.

suchs- äude	Versuchsstart	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	97,60	72,01	74,96	83,84	76,97
2	98,60	72,16	74,59	83,02	76,62
3	99,00	72,56	74,33	83,47	76,81
4	92,60	50,94	51,67	65,85	56,16
suchs- äude	Oktober 2016	Novemb	er 2016	Dezember 2016	Heizphase 2
<u> </u>					-
Ve	[%]	[%	6]	[%]	[%]
1 1	[%] 52,23	[9	6] ,05	[%] 50,57	[%] 51,29
2	[%] 52,23 52,03	[% 51, 49,	6]	[%] 50,57 49,14	[%] 51,29 50,34
2 3	[%] 52,23 52,03 52,43	[9 51, 49, 51,	6]	[%] 50,57 49,14 50,76	[%] 51,29 50,34 51,50

Tab. 23 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Versuchsgebäuden (Mittelwerte 1. und 2. Heizphase 2016), T1

In der dritten und vierten Heizphase setzen sich die niedrigen Tagesmittelwerte für die relative Luftfeuchtigkeit in den Versuchsgebäuden 1 bis 4 fort (siehe Abb. 123 und Tab. 24). Die Lücke in den Messkurven der Heizphase 3 stellt einen Ausfall der Datenerfassung dar (siehe Tab. 20).



Beim Vergleich der Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit für die Heizphasen 1 bis 4 zeigt sich, dass diese tendenziell abnehmen und somit auf eine Trocknung der Gebäudehülle, insbesondere der Außenwände, hindeuten. So sinkt z.B. beim Versuchsgebäude 2 der Mittelwert von 76,62 % in der Heizphase 1 auf 47,93 % in der Heizphase 4 (siehe Tab. 23 und Tab. 24).

suchs- äude	Januar 2017	Februar 2017	März 2017	April 2017	Heizphase 3
Vers geb	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	49,54	49,41	49,15	48,93	49,26
2	48,50	48,37	48,26	48,33	48,36
3	49,69	49,57	49,48	49,27	49,51
4	38,66	41,43	49,28	50,23	44,85
suchs- äude	Oktober 2017	Novemb	oer 2017	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[%]	[9	6]	[%]	[%]
1	49,06	48	,31	48,05	48,47
2	48,60	48	,10	47,09	47,93
3	49,42	48	,21	48,03	48,56

Tab. 24 - Relative Luftfeuchtigkeit in den Versuchsgebäuden (Mittelwerte 3. und 4. Heizphase 2017), T1

Bestätigt wird der fortschreitende Trocknungsvorgang auch durch die Entfeuchtungsmengen, die bei den nicht aktiv beregneten Versuchsgebäuden (1 bis 4) tendenziell abnehmen (siehe Abb. 124). So wurde dem Versuchsgebäude 2 im Verlauf der zweiten Heizphase 99,98 l Wasser durch aktive Entfeuchtung der Raumluft entnommen. In der vierten Heizphase beträgt die Entfeuchtungsmenge nur noch 12,97 l Wasser (siehe Tab. 25 und Tab. 26).



Abb. 124 - Monatliche Entfeuchtungsmengen durch aktive Luftentfeuchtung, A1

ıs- le		Heizphase 2	2		Heizp	ase 3 Heizphase 4				ŀ
rsuch	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Okt.	Nov.	Dez.
Ve ge	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
1	52,10	18,56	10,81	7,36	6,87	11,44	11,20	7,68	3,55	1,82
2	64,02	22,82	13,14	8,10	7,11	12,83	12,74	8,57	3,40	1,00
3	42,67	15,98	10,21	7,41	6,98	10,94	11,17	7,10	3,51	2,17
4	23,32	2,74	1,07	0,37	3,24	9,66	13,49	5,89	1,09	0,00
5	118,51	75,17	50,90	40,52	32,79	39,32	36,46	94,43	72,94	47,84

Tab. 25 - Monatliche Entfeuchtungsmenge durch aktive Luftentfeuchtung (2. Heizphase 2016), T1

Die je Heizphase angefallenen Entfeuchtungsmengen sind in Tab. 26 zusammengefasst. Ergänzend zu Abb. 122 zeigt sich auch hier, dass mit aktiven Maßnahmen eine wirksamere Entfeuchtung der Raumluft möglich ist, als mit passiven Maßnahmen.

suchs- bäude	Heizphase 1 (passiv)	Heizphase 2 (aktiv)	Heizphase 3 (aktiv)	Heizphase 4 (aktiv)
Vei ge	[1]	[1]	[1]	[1]
1	17,00	81,47	36,86	13,04
2	17,13	99,98	40,79	12,97
3	17,23	68,86	36,50	12,78
4	2,27	27,12	26,76	6,98
5	17,18	244,59	149,09	215,20

Tab. 26 - Entfeuchtungsmengen (keine Lösung) durch passive und aktive Luftentfeuchtung, T1

Anhand von Tab. 26 und Abb. 125 werden zudem die erheblichen Wassermengen deutlich, die zur Einhaltung des angestrebten Luftfeuchtigkeitsbereichs in den Versuchsgebäuden, allein während den Heizphasen, zu entnehmen sind.



3.4 Messung - Außenwände

3.4.1 Lufttemperatur

Zur Analyse der Wärmedämmeigenschaften von Bauteilen der thermischen Gebäudehülle können sowohl Oberflächentemperaturen als auch Bauteiltemperaturen in Oberflächennähe herangezogen werden. Deutlich wird dies, wenn stationäre und nicht-isotherme Randbedingungen gegeben sind, wie z.B. ein Außenklima von -10 °C und ein Innenklima von 20 °C. Unter diesen Randbedingungen stellen sich bei Bauteilen mit einem niedrigen U-Wert innenseitig größere und außenseitig kleinere Oberflächentemperaturen ein, als bei Bauteilen mit einem hohen U-Wert. Die Wärmeleitfähigkeit der Materialschichten hat somit direkten Einfluss auf die Temperatur der innen- und außenseitigen Bauteiloberfläche. Dieser Zusammenhang kann bei der Beurteilung von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten genutzt werden. Änderungen der Bauteilfeuchtigkeit, die zu einer Veränderung der Wärmeleitfähigkeit und somit auch der Dämmeigenschaften einzelner Materialschichten führen, müssen sich demnach in den Oberflächentemperaturen widerspiegeln. Durch den Vergleich dieser Temperaturen können z.B. an baugleichen Außenwänden die energetischen Auswirkungen einer Hydrophobierung oder einer hydrophoben Fassadenfarbe gegenüber der unbehandelten Oberfläche analysiert werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde dazu in den Versuchsgebäude 1 bis 4 die Lufttemperatur in den Außenwänden Ost, Süd und West jeweils in unterschiedlichen Tiefen gemessen. Die Messergebnisse für die flachste Bohrung (Tiefe: 4,0 cm - gemessen ab der Innenkante des Innenputzes) der Außenwand West sind in Abb. 126 für die Heizphasen 1 und 2 dargestellt.





Die Temperaturmessung nahe der Wandinnenoberfläche eignet sich besonders, da diese weniger durch Temperaturschwankungen und Wärmespeichereffekte aufgrund von Sonneneinstrahlung beeinflusst wird als eine Messung nahe der Wandaußenoberfläche. Die thermischen Bedingungen auf der Wandinnenseite stellen sich gleichmäßiger dar und sind daher für einen Vergleich besser geeignet. Zudem bilden sich die Änderungen der Wärmeleitfähigkeit einzelner Materialschichten stärker in den innenseitigen als in den außenseitigen Bauteiltemperaturen ab.

Anhand von Abb. 126 wird deutlich, dass die Temperaturmessungen in der westlichen Außenwand der Versuchsgebäude 1, 2 und 3 über beide Heizphasen einen identischen Kurvenverlauf aufweisen. Die größte Abweichung der Mittelwerte beträgt für die erste Heizphase 0,16 °C und für die zweite Heizphase 0,2 °C, die jeweils zwischen dem Versuchsgebäude 1 und 2 auftreten. Zu beachten ist dabei, dass das Versuchsgebäude 3 im Gegensatz zu den Versuchsgebäuden 1 und 2 einen minimal besseren Wärmeschutz bzw. U-Wert aufweist (siehe Tab. 2). Dieser bessere Wärmeschutz bildet sich aber in den Messergebnissen nicht durch höhere Temperaturen ab (siehe Tab. 27). Als mögliche Ursachen kommen eine niedrigere Innenraumtemperatur oder eine erhöhte Feuchtigkeitsbelastung der Außenwand West in Betracht. Eine niedrigere Innenraumtemperatur bestätigt sich anhand von Abb. 120 und Tab. 19. Eine höhere Feuchtigkeitsbelastung als bei den Versuchsgebäuden 1 und 2 kann für die zweite Heizphase nicht und für die erste Heizphase nicht eindeutig festgestellt werden (siehe Abb. 129, Tab. 30 und Tab. 31). Ebenso ist zu berücksichtigen, dass das Versuchsgebäude 4 nicht zum Vergleich hinzugezogen werden kann, da sich innenseitig eine 8 cm dicke Calciumsilikat-Dämmung befindet. In dieser Dämmebene kommt es zu einer starken Temperaturänderung, sodass das Mauerwerk und der Sensor in einem niedrigeren Temperaturbereich liegen, als beim Versuchsgebäude 1, 2 und 3 (siehe Tab. 27). Die niedrigen Messwerte zeigen somit keine schlechteren Wärmedämmeigenschaften der Wand an, sondern verdeutlichen die thermischen Auswirkungen auf das Mauerwerk, wenn dieses von innen gedämmt wird.

suchs- äude	Versuchsstart	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	-0,28	13,25	14,41	16,48	14,72
2	-0,57	13,58	14,52	16,52	14,88
3	-0,35	13,50	14,39	16,54	14,82
4	-0,17	7,07	9,03	13,36	9,84
suchs- äude	Oktober 2016	Novem	ber 2016	Dezember 2016	Heizphase 2
Vers geb	[°C]	['	°C]	[°C]	[°C]
1	16,17	14	4,13	13,70	14,67
2	16,26	14	1,34	13,99	14,87
3	16,22	14	1,22	13,71	14,72
4	12,16	7	,45	6,82	8,83

Tab. 27 - Lufttemperatur im Mauerwerk (Mittelwerte 2016, Außenwand West, Bohrtiefe 4 cm), T1

Im weiteren Verlauf der Messungen kommt es zu einer Spreizung der Temperaturkurven, die sich vor allem in der Heizphase 4 zeigt (siehe Abb. 127). Hier vergrößert sich die Abweichung zwischen den Versuchsgebäuden 2 und 3 von 0,4 °C im Oktober auf 0,61 °C im November und 0,73 °C im Dezember. Im Mittel ergibt sich über die gesamte vierte Heizphase beim Versuchsgebäude 3 eine 0,58 °C bzw. 3,94 % tiefere Mauerwerkstemperatur, als beim Versuchsgebäude 2 (siehe Tab. 28). Auch die Abweichung zwischen Versuchsgebäude 1 und Versuchsgebäude 2 zeigt von Heizphase 1 bis 4 eine ähnliche Entwicklung, die allerdings weniger stark ausgeprägt ist.



Der Verlauf der Messkurven im Jahr 2017 (siehe Abb. 127) dokumentiert eine steigende Diskrepanz zwischen den Wärmedämmeigenschaften der Versuchsgebäude 2 und 3. Unter Berücksichtigung der häufigen Schlagregeneinwirkung auf die westlichen Fassaden der Versuchsgebäude (siehe Punkt 3.5 Messung - Außenklima) ist davon auszugehen, dass diese Diskrepanz durch die kapillare Aufnahme des auftreffenden Wassers verursacht wurde. Gestützt wird diese Einschätzung durch den Vergleich der Feuchtigkeitsbelastung beider Versuchsgebäude. So zeigt sich beim Versuchsgebäude 2, dass die hydrophobierte Außenwand West bis in den Sorptionsfeuchtebereich hinein kontinuierlich trocknet. Beim Versuchsgebäude 3 stellt sich hingegen in den Heizphasen 3 und 4 eine Auffeuchtung ein, bei der Wassergehalte im Kapillarwasserbereich erreicht werden. Auch das Versuchsgebäude 1 zeigt eine leichte Auffeuchtung der Außenwand West in der Heizphase 4 (siehe Abb. 129 und Abb. 130).

Versuchs- gebäude	Januar 2017	Februar 2017	März 2017	April 2017	Heizphase 3
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	12,49	13,37	15,32	16,07	14,32
2	12,82	13,76	15,62	16,30	14,63
3	12,34	13,27	15,27	16,05	14,24
4	3,83	5,71	10,15	11,91	7,92
Versuchs- gebäude	Oktober 2017 Noven		ber 2017	Dezember 2017	Heizphase 4
	[°C] [°C]	[°C]	[°C]
1	16,86	14	1,46	13,53	14,96
2	17,19	14	1,87	13,79	15,29
3	16,79	14	1,26	13,06	14,71
4	13,82	8	,49	6,24	9,53

Tab. 28 - Lufttemperatur im Mauerwerk (Mittelwerte 2017, Außenwand West, Bohrtiefe 4 cm), T1


Abb. 126 - Burttemperatur in Maderwerk (greitende Tagesiniterwerte, Ausenwaht Sud, Bonriere + ein), Ar

Der Einfluss von Mauerwerksfeuchtigkeit auf die Temperaturkurven (siehe Abb. 128) kann zudem anhand der südlichen Außenwand bestätigt werden. Hier zeigt sich, dass die Versuchsgebäude 1, 2 und 3 sowohl in der ersten als auch in der vierten Heizphase sehr ähnliche Kurvenverläufe für die Mauerwerkstemperatur in 4,0 cm Tiefe aufweisen (siehe Abb. 128). In der ersten Heizphase beträgt die größte Abweichung zwischen den Mittelwerten 0,16 °C und in der zweiten Heizphase 0,25 °C (siehe Tab. 29). Dieses Ergebnis korreliert sehr gut mit den Messungen der Feuchtigkeitsbelastung. Gegenüber der westlichen Außenwand liegen die Kurvenverläufe in der Heizphase 4 nicht nur in einem niedrigeren Bereich, sondern auch dichter zusammen (siehe Abb. 131). Damit relativiert sich zugleich der Einfluss von Unterschieden in den Innenraumtemperaturen der Versuchsgebäude.

suchs- äude	Versuchsstart	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	-0,31	13,16	14,13	16,39	14,57
2	-0,15	13,19	14,06	16,29	14,53
3	-0,39	13,15	13,93	16,12	14,41
4	-0,41	7,99	9,26	13,51	10,27
suchs- äude	Oktober 2017	Novemb	oer 2017	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[°C]	[°	C]	[°C]	[°C]
1	17,08	14	,58	13,49	15,06
2	17,38	14	,85	13,69	15,31
3	17,10	14	,79	13,69	15,20
4	14,95	9,	58	7,17	10,58

Tab. 29 - Lufttemperatur im Mauerwerk (Mittelwerte 2016 und 2017, Außenwand Süd, Bohrtiefe 4 cm), T1

3.4.2 Luftfeuchtigkeit

Die Feuchtigkeitsbelastung und das Trocknungsverhalten der Außenwände West, Süd und Ost soll für die Versuchsgebäude 1, 2, 3 und 4 anhand von Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit in einer Bohrtiefe von 4,0 cm (gemessen ab der Innenkante des Innenputzes) dargelegt werden. Für die westliche Außenwand sind die Messergebnisse der ersten und zweiten Heizphase in Abb. 129 als gleitender Tagesmittelwert dargestellt. Hier zeigt sich, dass für alle überwachten Versuchsgebäude über die gesamte erste Heizphase eine sehr hohe Feuchtigkeitsbelastung im Kapillarwasserbereich vorliegt (relative Luftfeuchtigkeit \geq 95 %). Dabei handelt es sich vor allem um die Restfeuchtigkeit des Bauprozesses. Erst im Verlauf der zweiten Heizphase reduziert sich diese Feuchtigkeitsbelastung soweit, dass zunächst bei den Versuchsgebäuden 1 und 3, später auch beim Versuchsgebäude 2, Werte der relativen Luftfeuchtigkeit unterhalb von 100 % auftreten.



In Tab. 30 und Tab. 31 sind die Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit für die Versuchsgebäude 1 bis 4 monatsbezogen und heizphasenbezogen zusammengestellt. Darin wird sichtbar, dass der Tiefstwert für die zweite Heizphase mit 95,50 % beim Versuchsgebäude 3 und der Höchstwert mit 100,00 % beim Versuchsgebäude 4 auftritt.

suchs- äude	Versuchsstart	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4	100,00	100,00	100,00	98,74	99,58

Tab. 30 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (Mittelwerte 2016, Außenwand West, Bohrtiefe 4 cm), T1

suchs- äude	Oktober 2016	November 2016	Dezember 2016	Heizphase 2
Vers geb	[%]	[%]	[%]	[%]
1	99,49	95,86	93,12	96,16
2	100,00	99,73	96,80	98,84
3	99,08	94,89	92,50	95,50
4	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. 31 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (Mittelwerte 2016, Außenwand West, Bohrtiefe 4 cm), T1

In der dritten Heizphase setzen sich die Trocknungsvorgänge der Versuchsgebäude 1 und 2 stetig fort (siehe Abb. 130), sodass bei der Außenwand West Wassergehalte im Sorptionsfeuchtebereich (relative Luftfeuchtigkeit < 95 %) erreicht werden. Das etwas langsamere Trocknungsverhalten von Versuchsgebäude 2 gegenüber Versuchsgebäude 1 lässt sich mit der hydrophobierten Oberfläche erklären, die zu einer Vergrößerung des Wasserdampfdiffusionswiderstands der Außenwand führt. Das Versuchsgebäude 3 ist hingegen durch eine deutliche Auffeuchtung gekennzeichnet, die bis in den Kapillarwasserbereich erfolgt. Der Tiefstwert der relativen Luftfeuchtigkeit liegt bei 89,11 % und wird von dem Versuchsgebäude 1 erreicht (siehe Tab. 32).



Eine fortführende Trocknung zeigt sich im Verlauf der Heizphase 4 nur beim Versuchsgebäude 2. Das Versuchsgebäude 3 ist durch ein deutliches Auffeuchtungsverhalten und das Versuchsgebäude 1 durch ein leichtes Auffeuchtungsverhalten gekennzeichnet. Dennoch stellt sich im Durchschnitt über die Heizphase 4 beim Versuchsgebäude 1 die niedrigste relative Luftfeuchtigkeit mit 81,96 % ein. Der Mittelwert für die vierte Heizphase des Versuchsgebäudes 2 liegt mit 84,80 % leicht darüber. Mit 100 % relativer Luftfeuchtigkeit wird der Höchstwert weiterhin von dem Versuchsgebäude 4 erreicht. Über die gesamte dritte und vierte Heizphase hat das Versuchsgebäude 4 diesen Wert nicht unterschritten (siehe Tab. 32).

suchs- äude	Januar 2017	Feb	ruar 2017	März 201	17	April 2017	Heizphase 3
Vers geb	[%]		[%]	[%]		[%]	[%]
1	91,44		90,11	88,33		86,55	89,11
2	93,94		92,31	91,27		90,76	92,08
3	94,81		95,98	96,65		97,56	96,25
4	100,00		100,00	100,00		100,00	100,00
suchs- äude	Oktober 2017		Novemb	oer 2017	I	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[%]		[9	%]		[%]	[%]
1	80,78		82	,29		82,81	81,96
2	84,93		84	,85		84,64	84,80
3	91,11		93	,48		96,81	93,80
4	100,00		100),00		100,00	100,00

Tab. 32 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (Mittelwerte 2017, Außenwand West, Bohrtiefe 4 cm), T1

Aufgrund der tendenziell ähnlichen Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit, wie bei der Außenwand West, werden diese für die südliche Außenwand verkürzt dargestellt (siehe Abb. 131). Dabei ist zu beachten, dass auf der Südseite der Versuchsgebäude die größten Werte solarer Strahlung vorliegen (siehe Punkt 3.5 Messung - Außenklima) und somit ein hohes Trocknungspotential gegeben ist. Dieses hohe Trocknungspotential spiegelt sich in den Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk wider. So liegen die Messwerte der Versuchsgebäude 1, 2 und 3 über die gesamte Heizphase 4 im Sorptionsfeuchtebereich. Auch die Außenwand Süd des Versuchsgebäudes 4 weist Messwerte auf, die unterhalb von 100 % liegen. Die stärkste Trocknung zeigt jedoch das Versuchsgebäude 2, das für die vierte Heizphase einen Mittelwert von 69,11 % erreicht (siehe Tab. 33).



Abb. 131 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (gleitende Tagesmittelwerte, Außenwand Süd, Bohrtiefe 4 cm), A1

suchs- äude	Versuchsstart	Februar 2016	März 201	6	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[%]	[%]	[%]		[%]	[%]
1	100,00	100,00	100,00		100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00		100,00	100,00
3	100,00	100,00	100,00		100,00	100,00
4	100,00	100,00	100,00		100,00	100,00
suchs- äude	Oktober 2017	Novem	ber 2017	Ι	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[%]	['	[%]		[%]	[%]
1	77,17	77	7,39		78,09	77,55
2	68,18	69	9,27		69,87	69,11
3	74,72	74	,99		75,73	75,15
4	91,17	93	,34		95,68	93,40

Tab. 33 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (Mittelwerte 2016 und 2017, Außenwand Süd, Bohrtiefe 4 cm), T1

Für die östliche Außenwand sind die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit in Abb. 132 dargestellt. Identisch zu den Messergebnissen der Außenwände West und Süd liegen in der ersten Heizphase die gleitenden Tagesmittelwerte für die Versuchsgebäude 1, 2 und 4 konstant bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit. Nur das Versuchsgebäude 3 zeigt niedrigere Werte, die aber stetig ansteigen und am 23.06.2016 ebenfalls 100 % erreichen. Bis zur Heizphase 4 sind die Trocknungsprozesse soweit fortgeschritten, dass die Außenwand Ost der Versuchsgebäude 1 bis 3 eine Feuchtigkeitsbelastung im Sorptionsfeuchtebereich aufweist. Der Tiefstwert für die vierte Heizphase wird mit 69,73 % von dem Versuchsgebäude 1 erreicht. Der Höchstwert beträgt 96,20 % beim Versuchsgebäude 4 und liegt damit zwischen den Höchstwerten der Außenwand Süd und West (siehe Tab. 34).



Abb. 132 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (gleitende Tagesmittelwerte, Außenwand Ost, Bohrtiefe 4 cm), A1

uchs- äude	Versuchsstart	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	97,00	92,32	92,80	94,24	93,12
4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
suchs- äude	Oktober 2017	Noveml	per 2017	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[%]	[9	%]	[%]	[%]
1	69,68	70	,11	69,40	69,73
2	86,44	85	,69	85,38	85,84
3	78,50	77	,41	76,42	77,44

Tab. 34 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (Mittelwerte 2016 und 2017, Außenwand Ost, Bohrtiefe 4 cm), T1

Die Messergebnisse der Heizphase 4 sind für die Außenwände West, Süd und Ost einschließlich eines gewichteten Mittelwertes in der Abb. 133 zusammengefasst. Die Gewichtung erfolgt anhand der jeweiligen Außenfläche des Mauerwerks, die für die Ost- bzw. Westseite 12,24 m² und für die Südseite 6,83 m² beträgt. Die dazugehörigen Wassergehalte, bestimmt mit der Feuchtespeicherfunktion des Referenzziegels Z-16 (siehe Punkt 4.2.3 Hygrothermische Funktionen), sind in Tab. 35 aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von über 90 % mit einer linear ansteigenden Abweichung der Sensorik zu rechnen ist, die bei 95 % relativer Luftfeuchtigkeit \pm 3 % beträgt. Aufgrund des sehr steilen Anstiegs der Feuchtespeicherfunktion des Referenzziegels im Kapillarwasserbereich, werden daher Messwerte über 95 % relativer Luftfeuchtigkeit nicht für die Überführung in einen Wassergehalt des Ziegelmaterials herangezogen.



suchs- äude	Außenwand Ost	Außenwand Süd	Außenwand West	Gewichteter Mittelwert
Vers geb	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
1	1,35	1,77	2,08	1,73
2	2,66	1,33	2,45	2,29
3	1,76	1,60	4,78	2,91
4	-	4,47	-	-

Tab. 35 - Wassergehalt des Ziegelmaterials (Mittelwerte der Heizphase 4, Bohrtiefe 4,0 cm)

Anhand von Abb. 133 und Tab. 35 verdeutlicht sich, dass über die vierte Heizphase die höchste Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks in einer Tiefe von 4,0 cm tendenziell bei den westlichen Außenwänden gegeben ist. Die größten Trocknungseffekte und damit niedrigsten Werte für die Feuchtigkeitsbelastung konnten bei 3 von 4 Versuchsgebäuden auf der Südseite festgestellt werden. Die Außenwand Ost liegt bei den Versuchsgebäuden 3 und 4 zwischen den Werten der Außenwand Süd und West. Beim Versuchsgebäude 1 bildet diese aber den Tiefst- und beim Versuchsgebäude 2 den Höchstwert der relativen Luftfeuchtigkeit. Somit verhält sich die Außenwand Ost in Hinblick auf die Feuchtigkeitsbelastung und das Trocknungsverhalten je nach Versuchsgebäude tendenziell unterschiedlich.

Aus diesen Daten geht auch hervor, dass das hydrophobierte Mauerwerk und das Mauerwerk mit Außenputz und hydrophober Fassadenfarbe gegenüber dem ungedämmten Ziegelsichtmauerwerk auf der Südseite einen niedrigeren Wassergehalt aufweisen. Beide Maßnahmen zeigen hier eine messbare Wirkung hinsichtlich der Verbesserung des Feuchteschutzes. Bei den Außenwänden Ost und West kann auf Grundlage der Messdaten eine solche Verbesserung jedoch nicht festgestellt werden. Im Gegenteil, das Versuchsgebäude 3 ist auf der Westseite durch einen etwa doppelt so hohen Wassergehalt gekennzeichnet, wie das Versuchsgebäude 1. Auch das Versuchsgebäude 2 zeigt im Vergleich zu Versuchsgebäude 1 auf der Westseite einen leicht höheren Wassergehalt. Deutlich größere Auswirkungen auf die Feuchtigkeitsbelastung und das Trocknungsverhalten der Außenwände hat die Innendämmung des Versuchsgebäudes 4. Auf der Südseite, die tendenziell den niedrigsten Wassergehalt der 3 überwachten Außenwände aufweist, ist dieser mehr als doppelt so hoch, wie beim Versuchsgebäude 1. Noch ausgeprägter stellt sich die Feuchtigkeitsbelastung bei der Außenwand Ost und West dar. Hier sind nach 4 Heizphasen noch immer hohe Wassergehalte im Kapillarwasserbereich vorhanden.

Von besonderer Relevanz bei der Untersuchung der Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände ist der Einfluss von Schlagregen und solarer Strahlung (siehe Punkt 3.5 Messung - Außenklima). So zeigen sich bei den westlichen Außenwänden, die durch die größte Schlagregenbelastung gekennzeichnet sind, auch hohe Wassergehalte. Die niedrigen Wassergehalte der südlichen Außenwände decken sich wiederum mit den Werten der solaren Strahlung, die hier am größten sind. Die Ostseite der Versuchsgebäude ist sowohl durch kleinere Werte der Schlagregenbelastung als auch der solaren Einstrahlung gekennzeichnet. Der Wassergehalt ist hier weniger davon abhängig, wie gut der Schutz gegen Schlagregen ist, sondern wie schnell eingedrungenes Wasser die Außenwand wieder verlassen kann. Zusätzliche Schichten oder niedrige Bauteiltemperaturen, die den Verdunstungsprozess bremsen, können sich daher negativ auf den Wassergehalt der Wand auswirken. Da sich die vorhergehende Analyse der Feuchtigkeitsbelastung ausschließlich auf eine Bohrtiefe von 4,0 cm bezogen hat, wird im Folgenden die Feuchtigkeitsverteilung über den Wandquerschnitt am Beispiel der östlichen Außenwände betrachtet. Für die Mauerwerksmitte, d.h. für eine Bohrtiefe von 14,5 cm, sind die Kurvenverläufe der relativen Luftfeuchtigkeit in Abb. 134 dargestellt.



Da die Feuchtigkeitsbelastung bei allen Versuchsgebäuden in dieser Bohrtiefe von Heizphase 1 bis Heizphase 4 konstant bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit lag, erfolgte die Darstellung in Abb. 134 in einer verkürzten Form. Die monatsbezogenen und heizphasenbezogenen Mittelwerte können der nachfolgenden Tab. 36 entnommen werden.

suchs- äude	Versuchsstart	Febru	ıar 2016	März 201	16	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[%]		[%]	[%]		[%]	[%]
1	100,00	10	00,00	100,00)	100,00	100,00
2	100,00	10	00,00	100,00	1	100,00	100,00
3	100,00	10	00,00	100,00	1	100,00	100,00
4	100,00	10	00,00	100,00	1	100,00	100,00
suchs- säude	Oktober 2017		Noveml	per 2017	I	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[%]		[%]			[%]	[%]
1	100,00		100),00		100,00	100,00
2	100,00		100	0,00		100,00	100,00
3	100,00		100	0,00		100,00	100,00
4	100,00		100	0,00		100,00	100,00

Tab. 36 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (Mittelwerte 2016 und 2017, Außenwand Ost, Bohrtiefe 14,5 cm), T1

Für die Bohrtiefe von 25,0 cm zeigen sich ähnliche Kurvenverläufe der relativen Luftfeuchtigkeit, wie für die Messung in Mauerwerksmitte (siehe Abb. 135). Nur zwischen den Heizphasen kam es bei den Versuchsgebäuden 1, 2 und 4 zu einer erfassbaren Trocknung der Außenwand Ost. Mit dem Beginn der zweiten Heizphase stieg hier jedoch die relative Luftfeuchtigkeit erneut auf 100%.



Die Mittelwerte für die beiden Heizphasen des Jahres 2016 und den dazugehörigen Monaten sind in Tab. 37 zusammengefasst. Es wird deutlich, dass sowohl monats- als auch Heizphasenbezogen von keinem der Versuchsgebäude Werte der relativen Luftfeuchtigkeit erreicht werden, die unterhalb des Kapillarwasserbereichs liegen.

suchs- äude	Versuchsstart	Februar 2016	März 201	16	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[%]	[%]	[%]		[%]	[%]
1	100,00	100,00	100,00		100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00		100,00	100,00
3	100,00	100,00	100,00		100,00	100,00
4	100,00	100,00	99,97		99,99	99,99
suchs- äude	Oktober 2016	Novem	ber 2016	Ι	Dezember 2016	Heizphase 2
Vers geb	[%]	I	[%]		[%]	[%]
1	99,68	10	0,00		100,00	99,89
2	98,98	10	0,00		100,00	99,66
3	100,00	10	0,00		100,00	100,00
4	99,24	10	0,00		100,00	99,74

Tab. 37 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (Mittelwerte 2016, Außenwand Ost, Bohrtiefe 25 cm), T1

In der dritten Heizphase tritt eine messbare Trocknung des Mauerwerks bei den Versuchsgebäuden 1, 2 und 4 ab Mitte März auf (siehe Abb. 136). Wie in der zweiten Heizphase kommt es aber auch in der vierten Heizphase zu einer Auffeuchtung auf Werte von 100 % relativer Luftfeuchtigkeit.



Entsprechend Tab. 38 zeigen sich die größten Trocknungseffekte im Verlauf der dritten Heizphase beim Versuchsgebäude 4. Beim Versuchsgebäude 3 ist keine Trocknung der östlichen Außenwand messbar. Hier liegt die relative Luftfeuchtigkeit wie in der ersten und zweiten Heizphase konstant bei 100 %. In der vierten Heizphase liegen die Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit bei allen Versuchsgebäuden zwischen 99 % und 100 % und somit weiterhin im Kapillarwasserbereich.

suchs- äude	Januar 2017	Februar 2017	März 2017	April 2017	Heizphase 3
Vers geb	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	100,00	100,00	99,88	97,32	99,30
2	99,99	100,00	99,32	97,20	99,12
3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4	100,00	100,00	98,94	94,60	98,38
suchs- äude	Oktober 2017	Novemb	per 2017	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[%]	[9	%]	[%]	[%]
1	100,00	100),00	100,00	100,00
2	99,71	100),00	100,00	99,90
3	100,00	100),00	100,00	100,00
4	99,27	100),00	100,00	99,75

Tab. 38 - Relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk (Mittelwerte 2017, Außenwand Ost, Bohrtiefe 25 cm), T1

In der Summe zeigt sich für die Außenwand Ost, dass die über die vierte Heizphase gemittelte Feuchtigkeitsbelastung in der Mauerwerksmitte (Bohrtiefe 14,5 cm) die höchsten Werte annimmt (siehe Abb. 137). Zudem geht aus den Messdaten für die östliche Außenwand hervor, dass bei den Versuchsgebäuden 1 bis 4 eine stärkere Trocknung des Mauerwerks nach innen (Bohrtiefe 4,0 cm), als nach außen (Bohrtiefe 25,0 cm) vorliegt. Die aus diesen Werten über den gesamten Querschnitt des Mauerwerks gemittelte relative Luftfeuchtigkeit (siehe Abb. 137) bestätigt zudem die in Abb. 133 dokumentierte Rangfolge der Feuchtigkeitsbelastung.



Abb. 137 - Relative Luftfeuchtigkeit in verschiedenen Mauerwerkstiefen (Mittelwerte Heizphase 4, Außenwand Ost), A1

Hinsichtlich der Messergebnisse zur Feuchtigkeitsbelastung und -verteilung der Außenwände ist anzumerken, dass es sich bei dem angewandten Messverfahren um eine Langzeitmessung handelt, die lediglich punktuell durchgeführt wurde. Die Feuchtigkeitsverhältnisse einer Außenwand können jedoch über die Wandfläche Schwankungen unterliegen, die mit einer punktuellen Messung nicht erfassbar sind. Dies ist insbesondere bei der Beurteilung der Wirksamkeit einer Hydrophobierung von Relevanz, deren hydrophoben Eigenschaften je nach Oberflächenbeschaffenheit (z.B. aufgrund einer unterschiedlich stark ausgeprägten Brennhaut) und Verschmutzungsgrad des Ziegelmaterials variieren kann. Zudem ist die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit mit einer kapazitiven Sensorik im Bereich über 90 % zunehmend mit Abweichungen verbunden. Diese Abweichungen können sich aufgrund der im Kapillarwasserbereich stark ansteigenden Feuchtespeicherfunktion poröser Stoffe, erheblich auf den zu bestimmenden Wassergehalt auswirken. Daher haben die hier dokumentieren Messergebnisse für die Feuchtigkeitsbelastung und -verteilung der Außenwände einen tendenziellen Charakter. Für eine umfassende Beurteilung der Feuchtigkeitsverhältnisse von Außenwänden sind neben punktuell durchgeführten Langzeitmessungen auch flächig durchgeführte Kurzzeitmessungen notwendig. Diese Kurzzeitmessungen erfolgten an den Außenwänden der Versuchsgebäude unter Anwendung des Mikrowellenverfahrens. Die Ergebnisse der am Versuchsstandort durchgeführten Messreihen sind im Punkt 3.4.5 Feuchteindex dokumentiert.⁶²

⁶² WTA-MERKBLATT 3-17, S. 6

3.4.3 Wärmestromdichte

Der Verlauf der Wärmestromdichte, gemessen an der Innenoberfläche der westlichen Außenwände, wird für die beiden Heizphasen des Jahres 2016 in Abb. 138 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die mit Abstand kleinsten Wärmeverluste während der ersten Heizphase bei dem von innen gedämmten Versuchsgebäude 4 auftreten. Weiterhin wird deutlich, dass die Verläufe von Versuchsgebäude 1, 2 und 3 sehr dicht zusammenliegen und größere Schwankungen aufweisen als der Kurvenverlauf von Versuchsgebäude 4. In der zweiten Heizphase kommt es jedoch zu einer Spreizung der Messkurven. Das Versuchsgebäude 3 weist ab etwa Anfang November 2016 deutlich niedrigere Tagesmittelwerte für die Wärmestromdichte auf, als die Versuchsgebäude 1 und 2. Da deren Innenraumtemperaturen über denen des Versuchsgebäudes 3 liegen (siehe Abb. 120) ist davon auszugehen, dass ein solches Messergebnis die Folge von fallenden bzw. niedrigen Außentemperaturen ist. Diese bewirken eine größere Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenklima, durch die sich Außenwände mit schlechteren Wärmedämmeigenschaften stärker in den Messungen der Wärmestromdichte abbilden. Beim Versuchsgebäude 3 können diese schlechteren Dämmeigenschaften vor allem auf den Einfluss von Feuchtigkeit zurückgeführt werden. Eine ansteigende Feuchtigkeitsbelastung zeichnet sich zwar erst im Verlauf der dritten Heizphase ab (siehe Abb. 130), wird jedoch bereits während der zweiten Heizphase in tieferen Wandbereichen vorhanden gewesen sein. Dies lässt sich damit erklären, dass eine Auffeuchtung bei konstanten Innenklima (siehe Tab. 19 und Tab. 23) nur von außen möglich ist und daher erst zeitverzögert von dem innenliegenden Wandsensor detektiert werden kann.



Abb. 138 - Verlauf der Wärmestromdichte für Außenwand West (Tagesmittelwerte, 1. und 2. Heizphase 2017), A1

Da der Vergleich der Wärmestromdichte von Versuchsgebäude 1, 2, 3 und 4 grafisch nur begrenzt möglich ist, wird an dieser Stelle auf die Durchschnittswerte für die erste und zweite Heizphase verwiesen (siehe Tab. 39). Auch hier zeigt sich, dass das Versuchsgebäude 4 die niedrigsten Werte für die Wärmestromdichte aufweist. Gegenüber dem Versuchsgebäude 1 geht die Innendämmung in der ersten Heizphase mit einer Reduktion der Wärmeverluste um 51,64 % und in der zweiten Heizphase um 50,94 % einher. Trotz der sehr hohen Feuchtigkeitsbelastung der Außenwand West (siehe Abb. 129) ist somit die Wirksamkeit der Innendämmung gegeben.

Bei den ungedämmten Versuchsgebäuden tritt in der ersten Heizphase die maximale Abweichung der Wärmestromdichten zwischen dem Versuchsgebäude 1 und 2 auf. Im Durchschnitt sind die Wärmeverluste des Versuchsgebäudes 2 um 5,09 % größer. Auch das Versuchsgebäude 3 liegt mit 4,84 % höheren Wärmeverlusten in einem ähnlichen Bereich. In der zweiten Heizphase steigt dieser Wert auf 11,17 % an, sodass nun das Versuchsgebäude 3 die größten Wärmeverluste aufweist.

suchs- äude	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
1	-26,28	-20,93	-12,46	-19,83
2	-26,86	-22,15	-13,68	-20,84
3	-27,61	-22,42	-12,51	-20,79
4	-12,40	-10,27	-6,17	-9,59
suchs- äude	Oktober 2016	November 2016	Dezember 2016	Heizphase 2
ers				
> ~	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
> 00	[W/m ²] -14,52	[W/m ²] -21,98	[W/m²] -24,28	[W/m ²] -20,24
> ³⁰ 1 2	[W/m ²] -14,52 -14,51	[W/m ²] -21,98 -21,60	[W/m²] -24,28 -23,52	[W/m ²] -20,24 -19,86
2 3	[W/m ²] -14,52 -14,51 -15,56	[W/m ²] -21,98 -21,60 -24,61	[W/m ²] -24,28 -23,52 -27,40	[W/m ²] -20,24 -19,86 -22,50

Tab. 39 - Wärmestromdichte für Außenwand West (Mittelwerte 1. und 2. Heizphase 2016), T1

In der dritten und vierten Heizphase setzt sich die Spreizung der Messkurven fort. Diese zeichnet sich nun auch zwischen den Versuchsgebäuden 1 und 2 ab (siehe Abb. 139). Damit wird deutlich, dass deren Außenwände zunehmend durch voneinander abweichende Wärmedämmeigenschaften gekennzeichnet sind.



Abb. 139 - Verlauf der Wärmestromdichte für Außenwand West (Tagesmittelwerte, 3. und 4. Heizphase 2017), A1

Anhand der Mittelwerte für die dritte und vierte Heizphase zeigt sich, dass der beste Wärmeschutz weiterhin beim Versuchsgebäude 4 vorliegt. So ist die Wärmestromdichte über die dritte Heizphase um 52,20 % und über die vierte Heizphase um 54,28 % niedriger, als bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 1 (siehe Tab. 40). Wie in Abb. 139 bereits erkennbar, bilden sich nun auch die energetischen Auswirkungen der Hydrophobierung stärker in den Messwerten ab. Deutlich wird dies vor allem in der letzten Heizphase. Hier ist der Durchschnittswert der Wärmestromdichte um 5,48 % niedriger als beim Versuchsgebäude 1 und um 17,70 % als beim Versuchsgebäude 3.

suchs- äude	Januar 2017	Februar 2017	März 2017	7 April 2017	Heizphase 3
Vers geb	[W/m ²]				
1	-28,39	-24,75	-17,90	-15,49	-21,61
2	-28,16	-24,29	-17,11	-14,86	-21,08
3	-33,76	-29,38	-20,11	-16,80	-24,98
4	-13,51	-11,91	-8,60	-7,35	-10,33
suchs- säude	Oktober 2017	Noveml	per 2017	Dezember 2017	Heizphase 4
Vera geb	[W/m ²]	[W/	/m²]	[W/m ²]	$[W/m^2]$
1	-12,32	-21	.,45	-24,90	-19,53
2	-11,15	-19	9,94	-24,35	-18,46
3	-12,95	-24	,46	-29,94	-22,43
4	-5,97	-9	,50	-11,35	-8,93

Tah	40 -	Wärmestromdichte	für Außenw	and West	(Mittelwerte 3	und 4 He	iznhase 2017	л т1
1av.	то -	warmesuomulence	Iui Auisciiw	and west	(millerwerte 5.	unu - , n	Izphase 2017	, 11

Da die Versuchsgebäude im Verlauf der Heizphasen nicht exakt dieselben Innenraumtemperaturen aufweisen (siehe Tab. 19 und Tab. 21), ist die Auswertung der an den Außenwänden gemessenen Wärmestromdichten mit Ungenauigkeiten verbunden. Diese Ungenauigkeiten resultieren daraus, dass größere Innenraumtemperaturen und somit größere Temperaturdifferenzen zwischen Innenund Außenklima zu höheren Wärmeströmen in den Außenwänden führen, als kleinere Innenraumtemperaturen bzw. kleinere Temperaturdifferenzen. Um die temperaturbedingten Ungenauigkeiten zu beseitigen und eine bessere Vergleichbarkeit der Versuchsgebäude zu erzielen, wurden für die westlichen Außenwänden der Versuchsgebäude die instationären Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) berechnet. Die Berechnung erfolgte monats- und heizphasenbezogen anhand von Gl. 5 mit den vor Ort gemessenen Wärmestromdichten und Temperaturdifferenzen. Die Ergebnisse sind in Abb. 140 bis Abb. 141 und in Tab. 41 bis Tab. 42 dargestellt.

	$U_{i} = \frac{-\overline{q}}{(\overline{T}_{i} - \overline{T}_{e})}$	Gl. 5
Ui	Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	[W/(m ² K)]
\overline{q}	Gemittelte Wärmestromdichte (gemessen)	[W/m ²]
\overline{T}_i	Gemittelte Innenraumtemperatur (gemessen)	[K]
\overline{T}_{e}	Gemittelte Außentemperatur (gemessen)	[K]



Abb. 140 - Instationäre U-Werte für Außenwand West (1. und 2. Heizphase 2016), A1

Für die beiden ersten Heizphasen zeigt die Gegenüberstellung der instationären U-Werte ähnliche prozentuale Unterschiede, wie bei der Wärmestromdichte. Am größten sind diese zwischen dem Versuchsgebäude 1 und 4 mit 54,52 % in der ersten Heizphase und 54,68 % in der zweiten Heizphase. Die kleinsten Unterschiede gegenüber Versuchsgebäude 1 zeigt das Versuchsgebäude 2. In der ersten Heizphase ist dieses durch einen 3,69 % schlechteren Wärmeschutz der Außenwand West gekennzeichnet. Mit fortschreitender Trocknung (siehe Abb. 129) stellt sich hingegen in der zweiten Heizphase ein um 3,85 % besserer Wärmeschutz ein. Den größten instationären U-Wert zeigt das Versuchsgebäude 3, der sich gegenüber Versuchsgebäude 1 von 5,21 % in der ersten Heizphase auf 11,47 % in der zweiten Heizphase erhöht hat (siehe Tab. 41).

suchs- äude	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1	
Vers geb	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	
1	1,795	1,503	1,177	1,517	
2	1,817	1,571	1,267	1,573	
3	1,891	1,614	1,189	1,596	
4	0,795	0,693	0,550	0,690	
suchs- äude	Oktober 2016	November 2016	Dezember 2016	Heizphase 2	
Vers geb	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	$[W/(m^2K)]$	$[W/(m^2K)]$	
1	1,442	1,515	1,681	1,560	
1 2	1,442 1,401	1,515 1,462	1,681 1,600	1,560 1,500	
1 2 3	1,442 1,401 1,562	1,515 1,462 1,693	1,681 1,600 1,898	1,560 1,500 1,739	

Tab. 41 - Instationäre U-Werte für Außenwand West (1. und 2. Heizphase 2016), T1



Abb. 141 - Instationäre U-Werte für Außenwand West (3. und 4. Heizphase 2017), A1

Die für die zweite Heizphase aufgezeigten Unterschiede zwischen den instationären U-Werten der Versuchsgebäude vergrößern sich über die dritte und vierte Heizphase nochmals. Deutlich wird dies beim Vergleich der Versuchsgebäude 1 und 2 (siehe Abb. 141 und Tab. 42). Hier zeigt sich, dass die Hydrophobierung in der dritten Heizphase den instationären U-Wert um 4,18 % und in der vierten Heizphase um 7,62 % reduziert. Mit zunehmender Trocknung der hydrophobierten Außenwand West des Versuchsgebäudes 2 (siehe Abb. 130) ist somit eine Verbesserung der Dämmeigenschaften gegenüber der unbehandelten Außenwand West des Versuchsgebäudes 1 gegeben. Bezogen auf die Heizphase 1 und 4 beträgt diese Verbesserung 11,31 Prozentpunkte.

Gegenläufig verhält sich hingegen der Wärmeschutz der Außenwand West von Versuchsgebäude 3. Hier zeigt sich im Vergleich zu Versuchsgebäude 1, dass mit ansteigender Feuchtigkeitsbelastung (siehe Abb. 130) eine Verschlechterung des Wärmeschutzes um 15,79 % in der dritten Heizphase und um 15,60 % in der vierten Heizphase (siehe Abb. 141) einhergeht. Noch deutlicher wird der Feuchtigkeitseinfluss auf den Wärmeschutz der westlichen Außenwand beim Vergleich mit dem Versuchsgebäude 2 (siehe Abb. 130 und Abb. 141). Obwohl das Versuchsgebäude 3 einen 2,0 cm dickeren Wandaufbau aufweist, ist dessen instationärer U-Wert in der ersten Heizphase um 1,46 % und in der vierten Heizphase um 25,14 % höher, als beim Versuchsgebäude 2. Im Verlauf der vier Heizphasen hat sich somit ein Unterschied in den Dämmeigenschaften um 23,68 Prozentpunkte ausgebildet (siehe Abb. 140 und Abb. 141).

Konstanter stellen sich hingegen die Unterschiede in den Dämmeigenschaften der Außenwand West bei den Versuchsgebäuden 1 und 4 dar. So ist der instationäre U-Wert beim Versuchsgebäude 4 in der dritten Heizphase um 54,99 % und in der vierten Heizphase um 57,98 % niedriger als beim Versuchsgebäude 1. Der prozentuale Unterschied der Dämmeigenschaften beider Versuchsgebäude steigt somit von der ersten bis zur dritten Heizphase um 0,50 Prozentpunkte und von der dritten bis zur vierten Heizphase um 2,99 Prozentpunkte. Die zunächst abnehmende Feuchtigkeitsbelastung von Versuchsgebäude 1 (siehe Abb. 129 und Abb. 130) spiegelt sich in den Ergebnissen nicht wider, da ggf. beim Versuchsgebäude 4 eine Trocknung im nicht messbaren Feuchtebereich auftrat.

suchs- äude	Januar 2017	Februar 2017	März 201	7 April 2017	Heizphase 3
Vers geb	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m²K)] [W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]
1	1,549	1,507	1,467	1,357	1,482
2	1,514	1,453	1,371	1,272	1,420
3	1,837	1,784	1,655	1,485	1,716
4	0,700	0,687	0,662	0,590	0,667
suchs- äude	Oktober 2017	Novem	ber 2017	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[W/(m ² K)] [W/(n ² K)] [W/(m ² K)]		[W/(m ² K)]
1	1,639	1,	719	1,698	1,692
2	1,431	1,	562	1,634	1,563
3	1,766	1,	969	2,041	1,956
4	0,674	0,	717	0,728	0,711

Tab. 42 - Instationäre U-Werte für Außenwand West (3. und 4. Heizphase 2017), T1

In Abb. 142 sind die instationären U-Werte der vierten Heizphase und die nach DIN EN ISO 6946 berechneten stationären U-Werte (siehe Tab. 2) für die 4 überwachten Versuchsgebäude dargestellt. Es zeigt sich, dass der Wärmeschutz ungedämmter Außenwände mit einer Feuchtigkeitsbelastung im Sorptionsfeuchtebereich (siehe Abb. 130) durch den stationären U-Wert unterschätzt wird. So ist der messtechnisch bestimmte, instationäre U-Wert von Versuchsgebäude 1 um 14,76 % kleiner als der rechnerisch bestimmte, stationäre U-Wert. Beim Versuchsgebäude 2 ist der Unterschied noch erheblicher und beträgt 21,26 %. Anders stellt sich hingegen die Gegenüberstellung der U-Werte beim Versuchsgebäude 4 dar. Hier werden die Dämmeigenschaften der Außenwand West durch den stationären U-Wert überschätzt. Dieser ist um 22,08 % kleiner, als der instationäre U-Wert. Nur das Versuchsgebäude 3 zeigt hinsichtlich der U-Werte eine gute Übereinstimmung.



Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn die stationären U-Werte mit instationären U-Werten verglichen werden, die für beide Heizphasen des Jahres 2017 resultieren. Auch hier ist festzustellen, dass mit den stationären U-Werten der Wärmeschutz der ungedämmten Außenwände unterschätzt und der Wärmeschutz der gedämmten Außenwände überschätzt wird (siehe Abb. 143). So ist der stationäre U-Wert beim Versuchsgebäude 1 um 27,08 %, beim Versuchsgebäude 2 um 34,67 % und beim Versuchsgebäude 3 um 5,76 % höher als der instationäre U-Wert. Das Versuchsgebäude 4 zeigt einen um 19,01 % niedrigeren stationären U-Wert.



Abb. 143 - Instationäre und stationäre U-Werte der Außenwand West (3. und 4. Heizphase 2017), A1

Eine Zusammenfassung der jeweiligen Differenzen zwischen den stationären U-Werten und den instationären U-Werten der Versuchsgebäude befindet sich für die vierte Heizphase und für die Kombination aus dritter und vierter Heizphase in Tab. 43. Dabei wird deutlich, welche erheblichen Abweichungen je nach Bestimmung des U-Wertes (stationär oder instationär) für die energetische Wirksamkeit einer feuchtigkeitsreduzierenden Maßnahme oder eine Dämmmaßnahme vorliegen.

Tab. 43 - Prozentuale Differenzen zwischen den stationären und instationären U-Werten der Außenwand West, T1

	Heizp	hase 4	Heizphase 3 + 4				
Versuchs- gebäude	Differenz der Differenz der stationären U-Werte		Differenz der stationären U-Werte	Differenz der instationären U-Werte			
	[%]	[%]	[%]	[%]			
1 - 2	0	-7,62	0	-5,63			
1 - 3	-3,78 +15,60		-3,78	+15,62			
1 - 4	-72,09	-57,98	-72,09	-56,21			
2 - 3	-3,78	+25,14	-3,78	+22,52			
Anmerkung	Ein negatives Vorzeichen zweitgenannte Versuchsg Ein positives Vorzeichen z zweitgenannte Versuchsg	zeigt einen besseren U-Wer ebäude an (Grundwert ist c zeigt einen schlechteren U-V ebäude an (Grundwert ist c	rt der Außenwand West für das das erstgenannte Versuchsgebäude). Wert der Außenwand West für das das erstgenannte Versuchsgebäude).				

Ergänzend zu den Momentan-Werten der Transmissionswärmeverluste (siehe Abb. 138 bis Abb. 139) und den daraus resultierenden Wärmedämmeigenschaften (siehe Abb. 140 bis Abb. 141) werden im Folgenden die Monats- und Heizphasen-Summen der Transmissionswärmeverluste des Jahres 2016 zusammengefasst (siehe Tab. 44). Die angegebenen Werte beziehen sich jeweils auf eine Fläche von 1 m² der Außenwand West.

uchs- äude	ร์นุวบุ Februar 2016 März 2016		April 2016	Heizphase 1		
Vers geb	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m²]		
1	18,29	15,57	8,97	42,84		
2	18,69	16,48	9,85	45,02		
3	19,22	16,68	9,01	44,90		
4	8,63	7,64	4,44	20,71		
	Oktober 2016 November 2016					
suchs- äude	Oktober 2016	November 2016	Dezember 2016	Heizphase 2		
Versuchs- gebäude	Oktober 2016 [kWh/m²]	November 2016 [kWh/m²]	Dezember 2016 [kWh/m²]	Heizphase 2 [kWh/m²]		
L Versuchs- gebäude	Oktober 2016 [kWh/m ²] 10,80	November 2016 [kWh/m²] 15,82	Dezember 2016 [kWh/m²] 18,07	Heizphase 2 [kWh/m²] 44,69		
7 Versuchs- gebäude	Oktober 2016 [kWh/m²] 10,80 10,80	November 2016 [kWh/m²] 15,82 15,55	Dezember 2016 [kWh/m²] 18,07 17,50	Heizphase 2 [kWh/m ²] 44,69 43,85		
 Versuchs- 8 8 8 9 9<td>Oktober 2016 [kWh/m²] 10,80 10,80 11,58</td><td>November 2016 [kWh/m²] 15,82 15,55 17,72</td><td>Dezember 2016 [kWh/m²] 18,07 17,50 20,38</td><td>Heizphase 2 [kWh/m²] 44,69 43,85 49,68</td>	Oktober 2016 [kWh/m²] 10,80 10,80 11,58	November 2016 [kWh/m²] 15,82 15,55 17,72	Dezember 2016 [kWh/m²] 18,07 17,50 20,38	Heizphase 2 [kWh/m²] 44,69 43,85 49,68		

Tab. 44 - Monats- und Heizphasen-Summen der Transmissionswärmeverluste von Außenwand West (2016), T1

Die Summen-Werte der Transmissionswärmeverluste für das Jahr 2017 können der nachfolgenden Tab. 45 entnommen werden. Auch hier beziehen sich die Monats- und Heizphasen-Summen auf eine Fläche von 1 m² der Außenwand West.

Tab. 45 - Monats- und Heizphasen-Summen der Transmissionswärmeverluste von Außenwand West (2017), T1

suchs- äude	Januar 2017	Februar 2017	März 2017		April 2017	Heizphase 3
Vers geb	[kWh/m²]	[kWh/m²]	[kWh/m ²]		[kWh/m²]	[kWh/m ²]
1	21,12	16,63	13,32		11,15	62,23
2	20,95	16,32	12,73		10,70	60,69
3	25,12	19,75	14,96		12,10	71,92
4	10,05	8,00	6,40		5,29	29,74
suchs- äude	Oktober 2017	Novemb	November 2017		ezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[kWh/m ²]	[kWł	1/m²]	[kWh/m²]		[kWh/m ²]
1	9,16	15	,44	44 18,53		43,14
2	8,30	14	,36		18,12	40,77
3	9,64	17	,61		22,27	49,52
4	4,44	6,	84		8,45	19,73

3.4.4 Oberflächentemperatur

Ergänzend zu den punktuellen Langzeitmessungen der Lufttemperatur im Mauerwerk mittels der Sensorik des Monitoringsystems wurden auch thermografische Aufnahmen aller Versuchsgebäude angefertigt. Damit konnten für die Außenwände Ost, Süd und West die Höhe und die Verteilung der außenseitigen Oberflächentemperaturen bestimmt werden. Die Durchführung der thermografischen Aufnahmen erfolgte im Rahmen von 3 Messfahrten, die im weiteren Verlauf der Arbeit auch als Aufenthalt 1, 2 und 3 bezeichnet werden. In Tab. 46 sind die Zeiträume der Messfahrten und die Häufigkeit aufgeführt, wie oft ein gesamtes Versuchsgebäude während einen solchen Fahrt bzw. während eines solchen Aufenthalts thermografisch aufgenommen wurde.

Aufenthalt	Beginn	Ende	Häufigkeit der Messung					
1	07.03.2017	14.03.2017	1 x					
2	29.05.2017	12.06.2017	3 x					
3	23.10.2017	30.10.2017	3 x					
Anmerkung	Die Häufigkeit der Messung bezieht sich darauf, wie oft ein gesamtes Versuchsgebäude							

Tab	AG Zaitmäuma	dam	Aufomtholto	arm d	Höufighait	1	Magazza	TP 1
Tap.	40 - Zeitraume	uer	Autentiaite	una	пациякен	uer	messung.	11

Im Rahmen des ersten Aufenthalts wurden zunächst umfassende Testmessungen durchgeführt, um dann am 13.03.2017 jedes Versuchsgebäude einmal thermografisch aufzunehmen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im Anhang 5 - Thermografische Aufnahmen, Blatt 13.03.2017, dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Außenwand West des Versuchsgebäudes 2 und die Außenwände Süd und West des Versuchsgebäudes 3 nicht erfasst werden konnten, da diese zum damaligen Zeitpunkt nicht zugänglich waren. Dennoch sind die vor Sonnenaufgang zwischen 06:30 Uhr und 07:00 Uhr erstellten Aufnahmen als besonders repräsentativ zu bewerten, da in diesem Zeitraum eine mittlere Außentemperatur von -0,38 °C am Versuchsstandort vorlag. Die mittlere Innenraumtemperatur der Versuchsgebäude lag in einem Bereich zwischen 19,03 °C und 20,16 °C. Eine genauere Zuordnung der Innenraumtemperaturen kann mittels Abb. 121 und Tab. 21 vorgenommen werden.

Die Messung der Oberflächentemperatur wurde während des zweiten Aufenthalts am 02.06.2017, am 07.06.2017 und am 10.06.2017 durchgeführt (siehe Anhang 5 - Thermografische Aufnahmen). Die für den Zeitraum der Thermografie am Versuchsstandort gemessenen Außentemperaturen und die in den Versuchsgebäuden vorliegenden Innenraumtemperaturen sind als Mittelwerte in Tab. 47 zusammengestellt.

	Außentemperaturen	Innentemperatur des Versuchsgebäudes							
Datum und Uhrzeit der Messung	am Versuchsstandort	1	2	3	4	5			
, i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]			
02.06.2017, 03:00 - 03:45 Uhr	9,78	23,38	22,92	24,35	29,75	22,85			
07.06.2017, 02:30 - 03:15 Uhr	14,10	24,03	23,81	24,70	29,80	23,65			
10.06.2017, 02:30 - 03:15 Uhr	14,00	25,15	24,82	25,46	29,49	24,28			

Tab. 47 - Temperaturen inner- und außerhalb der Versuchsgebäude während der Thermografie (Juni 2017), T1

Im Verlauf des dritten Aufenthalts erfolgte die thermografische Untersuchung der Versuchsgebäude am 24.10.2017, am 26.10.2017 und am 28.10.2017. Die einzelnen Aufnahmen sind mit dem Datum der Anfertigung im Anhang 5 - Thermografische Aufnahmen aufgeführt. Die jeweils vorliegenden Temperaturen inner- und außerhalb der Versuchsgebäude wurden über den Zeitraum der Messung gemittelt und sind in Tab. 48 zusammengestellt.

	Außentemperaturen	Innentemperatur des Versuchsgebäudes						
Datum und Uhrzeit der Messung	am Versuchsstandort	1	2	3	4	5		
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]		
24.10.2017, 06:30 - 07:15 Uhr	8,88	19,36	19,86	19,23	20,07	-		
26.10.2017, 06:00 - 06:45 Uhr	11,02	19,55	19,79	19,20	20,77	-		
28.10.2017, 05:30 - 06:15 Uhr	10,22	19,27	19,86	19,31	19,77	19,33		
	D: (11 1 1 M. 1	, 1 T		. 1 .	C 1			

Гаb.	48 -	Temperaturen	inner- un	d außerhalb	der	Versuchsgebäude	während	der '	Thermografie	(Oktober	2017),	T 1
		1				0			0	•		

Die fehlenden Mittelwerte der Innenraumtemperatur konnten aufgrund eines Messausfalls nicht berechnet werden (siehe Tab. 20 und Abb. 121).

Mit den thermografischen Untersuchungen wurden 2 Zielsetzungen verfolgt. Die erste Zielsetzung beinhaltet den Vergleich der Versuchsgebäude hinsichtlich der Oberflächentemperatur in einem ausgewählten Fassadenbereich. Dabei soll analysiert werden, wie stark sich die Maßnahmen zur Reduzierung und zur Erhöhung von Mauerwerksfeuchtigkeit auf die Oberflächentemperaturen der Außenwände auswirken. Diesbezüglich sind vor allem die thermografischen Aufnahmen des ersten Aufenthalts am Versuchsstandort von Relevanz. Hier waren mit den niedrigen Außentemperaturen und den ähnlichen Innenraumtemperaturen der Versuchsgebäude genau die Bedingungen gegeben, die für eine gebäudeübergreifende Untersuchung der Oberflächentemperaturen erforderlich sind.

Die zweite Zielsetzung beinhaltet die vergleichende Betrachtung von thermografischen Aufnahmen und den im Raster durchgeführten Mikrowellenfeuchtemessungen. Diese Gegenüberstellung erfolgt im Rahmen von Abschnitt 3.4.5 Feuchteindex. Dabei soll ausschließlich grafisch untersucht werden, ob sich ein Zusammenhang zwischen der Verteilung der Oberflächentemperatur und der Verteilung der Feuchtigkeitsbelastung über die Fassaden der Versuchsgebäude zeigt. Da für diesen visuellen Vergleich ähnliche Innenraumtemperaturen nicht von Relevanz sind, werden die Thermogramme der ersten, zweiten und dritten Messfahrt zur Auswertung herangezogen. Die Messungen im Juni und Oktober 2017 sind darüber hinaus von Interesse, da in dieser Zeit die aktive Beregnung des Versuchsgebäudes 5 erfolgte. Es ist jedoch zu beachten, dass mit steigenden Außentemperaturen auch ein Anstieg der Verdunstungs- und Kühlungseffekten verbunden ist, die sich insbesondere auf Bauteile mit einem hohen Wassergehalt auswirken. Weiterhin ist bei den im Juni und Oktober 2017 durchgeführten Messungen zu berücksichtigen, dass die Differenz zwischen der Innenraum- und der Außentemperatur häufig unterhalb des Grenzwertes von 15 °C liegt (siehe Tab. 47 und Tab. 48).⁶³ Je kleiner die Temperaturdifferenz wird, desto schwächer zeichnen sich auf den Thermogrammen die Außenwandbereiche ab, in denen der Wärmetransport aufgrund von Mauerwerksfeuchtigkeit in einem stärkeren Umfang erfolgt.

Anmerkung

⁶³ FOUAD / RICHTER 2006, S. 44

Vgl. VATh-Richtlinie Bauthermografie 2016, S. 11

Bevor ausgewählte thermografische Aufnahmen hinsichtlich der ersten Zielsetzung verglichen und ausgewertet werden, erfolgt die Darlegung allgemeiner Merkmale, die wiederholt und unabhängig vom Wandaufbau der Versuchsgebäude auf diesen Aufnahmen auftraten. Dazu wurden auf zwei Fotografien von Versuchsgebäude 1 und Versuchsgebäude 2 charakteristische Thermogramme vom 10.06.2017 und 26.10.2017 projiziert (siehe Abb. 144 und Abb. 145). Aus Abb. 144 geht hervor, dass sich neben den geometrischen Wärmebrücken in Form der Gebäudeecken, insbesondere das Fugenbild bzw. der Mauermörtel visuell abzeichnet. Im Vergleich zum Ziegelmaterial liegen hier häufig höhere Oberflächentemperaturen vor, die auf einen stärkeren Wärmetransport in Form von Wärmeleitung schließen lassen.⁶⁴ Weiterhin zeigt sich anhand von Abb. 145, dass die Außenwand Ost einen deutlich hervortretenden und somit wärmeren Mauerwerksbereich aufweist (eingefasst durch eine schwarze Strichelung). Die höheren Oberflächentemperaturen in diesem Bereich sind aber nicht material- oder feuchtigkeitsbedingt, sondern können auf die Anlagentechnik im inneren des Versuchsgebäudes zurückgeführt werden. Sowohl durch den aktiven Luftentfeuchter als auch durch den Axialventilator wird die Raumluft so geführt, dass diese gegen den markierten Bereich der Außenwand Ost strömt und jenen stärker erwärmt (siehe Abschnitt 3.2.2 Entfeuchtung).





Abb. 144 - Projektion zweier Thermogramme (10.06.2017) auf die Fassade Süd und Ost des Versuchsgebäudes 1, A1

Abb. 145 - Projektion eines Thermogramms (26.10.2017) auf die Fassade Ost des Versuchsgebäudes 2, A1

Ergänzend zu den gebäudeübergreifenden Merkmalen der thermografischen Aufnahmen ist darauf hinzuweisen, dass einzelne Fassaden, aufgrund der örtlichen Zugänglichkeit nur in einem steilen Beobachtungswinkel aufgenommen werden konnten. Dies betrifft vor allem das Versuchsgebäude 3 mit der westlichen Fassade sowie das Versuchsgebäude 2 mit der südlichen und westlichen Fassade. Bei einem Beobachtungswinkel zwischen 0° (frontale Aufnahme) und 50° kann die Veränderung des Emissionsgrads der Außenwand vernachlässigt werden. Bei einem größeren Beobachtungswinkel (siehe Abb. 146), kommt es hingegen zu einer deutlichen Reduktion des Emissionsgrads und somit auch zu einer zunehmenden Abweichung bei der Messung der Oberflächentemperatur. Da für die Thermogramme mit steilem Beobachtungswinkel kein korrigierter Emissionsgrad verwendet wurde, können die Messwerte unterhalb der tatsächlichen Werte für die Oberflächentemperatur liegen.⁶⁵

65 FOUAD 2012, S. 308

⁶⁴ Die Wärmeleitfähigkeit wurde für ausgewählte Ziegel- und Mörtelproben sowohl im trockenen als auch im feuchten Zustand bestimmt und kann dem Abschnitt 4.2 Beschreibung - Laboruntersuchungen entnommen werden.

Für die verputzten und unverputzten Außenwände wurde gemäß DIN V 18599-2, S. 75 ein Emissionsgrad von 0,9 gewählt.

Zur Auswertung der Oberflächentemperaturen der Versuchsgebäude wurde in jedem Thermogramm mit der Software FLIR Tools+ ein definierter Messbereich festgelegt. Dieser Messbereich trägt die automatisch zugewiesene Bezeichnung Bx1 und umfasst die Ziegel des Mauerwerks, die mit einem kombinierten Temperatur-Feuchte-Sensor des Monitoringsystems ausgestattet worden sind (siehe Abschnitt 3.2.3 Monitoring). Dazu wurden die thermografischen Aufnahmen zunächst so verändert, dass ein möglichst großer Kontrast zwischen den Ziegeln und den Fugen resultiert (siehe Abb. 147). In diesem Farbmodus konnten die entsprechenden Ziegel durch Zählen der Binderreihen und -lagen erfasst und mit einem rechteckigen Messbereich versehen werden. Die für diesen Bereich bestimmte Maximal- und Durchschnittstemperatur ist auf jedem Thermogramm aufgeführt und kann nun den punktuellen Messungen des Monitoringsystems als Vergleichswert gegenübergestellt werden.



Abb. 146 - Thermogramm mit steilem Beobachtungswinkel (Versuchsgebäude 2, Außenwand West, 10.06.2017), A1



Abb. 147 - Veränderter Farbbereich eines Thermogramms (Versuchsgebäude 1, Außenwand Ost, 10.06.2017), A1

Aus den thermografischen Aufnahmen vom 13.03.2017 geht hervor, dass das Versuchsgebäude 5 sowohl an der Süd- als auch an der Westfassade höhere Oberflächentemperaturen aufweist, als das Versuchsgebäude 1. So beträgt die Differenz der durchschnittlichen Oberflächentemperatur im Messbereich Bx1 der Südfassade 0,7 °C und der Westfassade 0,9 °C (siehe Abb. 148 bis Abb. 151). Zudem unterscheiden sich die beiden Versuchsgebäude hinsichtlich der Verteilung der Oberflächentemperaturen. Besonders auffällig ist, dass die Südfassade des Versuchsgebäudes 5 im Gegensatz zum Versuchsgebäude 1 im unteren und schwächer beregneten Fassadenbereich durch abnehmende Temperaturen gekennzeichnet ist. Beim Versuchsgebäude 1 werden diese hier hingegen größer.



Abb. 148 - Thermogramm der westlichen und südlichen Außenwand von Versuchsgebäude 1 (13.03.2017), A1



Abb. 149 - Thermogramm der westlichen und südlichen Außenwand von Versuchsgebäude 5 (13.03.2017), A1

Auf der Westfassade der Versuchsgebäude 1 und 5 zeigen sich die Unterschiede in der Verteilung der Oberflächentemperatur vor allem im oberen Fassadenbereich. Während dieser Bereich beim Versuchsgebäude 1 durch eine eher gleichmäßige Temperaturverteilung gekennzeichnet ist (siehe Abb. 148 und Abb. 150), kann beim Versuchsgebäude 5 in Richtung Dach eine Spreizung der hohen Oberflächentemperaturen festgestellt werden (siehe Abb. 149 und Abb. 151). Zurückzuführen ist dies auf die Höhenlage der Sprinkler, durch die höher gelegene Ziegelschichten stärker benetzt wurden. Hinsichtlich der Temperaturverteilung im unteren Fassadenbereich zeigen die beiden Westfassaden Ähnlichkeiten, die sich aber mit der Position des Elektroradiators erklären lassen.



Abb. 150 - Thermogramm der westlichen Außenwand von Versuchsgebäude 1 (13.03.2017), A1



Abb. 151 - Thermogramm der westlichen Außenwand von Versuchsgebäude 5 (13.03.2017), A1

Im nächsten Schritt soll das Thermogramm der südlichen Fassade von Versuchsgebäude 2 und 4 analysiert werden. Hier zeigt sich, dass die Durchschnittstemperatur des ausgewählten Messbereichs bei beiden Versuchsgebäuden kleiner ist (siehe Abb. 152 und Abb. 153) als beim Versuchsgebäude 1 (siehe Abb. 148). Es resultiert eine Differenz von 0,3 °C zwischen Versuchsgebäude 1 und 2 sowie von 2,8 °C zwischen Versuchsgebäude 1 und 4. Auffällig ist dabei, dass die Durchschnittswerte für die Oberflächentemperatur unterhalb der am Versuchsstandort gemessenen Lufttemperatur liegen. Zurückzuführen ist dies auf den klaren bzw. wolkenfreien Himmel in der Messnacht und den damit verbundenen Abstrahlungs- und Auskühlungseffekten. Zudem wurde die Lufttemperatur in ca. 4 m Höhe über der Geländeoberkante und somit ca. 2 m über dem ausgewählten Messbereich erfasst.



Abb. 152 - Thermogramm der südlichen Außenwand von Versuchsgebäude 2 (13.03.2017), A1



Abb. 153 - Thermogramm der südlichen Außenwand von Versuchsgebäude 4 (13.03.2017), A1

Die für die südlichen Außenwände der Versuchsgebäude 1, 2, 4 und 5 bestimmten Mittelwerte der Oberflächentemperatur sind in der Abb. 154 dargestellt. Unter Berücksichtigung des im Abschnitt 3.4.1 Lufttemperatur beschriebenen Zusammenhangs zwischen dem stationären U-Wert und der Oberflächentemperatur eines Bauteils können nun die südlichen Außenwände der Versuchsgebäude hinsichtlich ihrer Dämmeigenschaften bewertet und verglichen werden. Diesbezüglich geht aus den thermografischen Aufnahmen vom 13.03.2017 hervor, dass die niedrigste Oberflächentemperatur und somit der beste Wärmeschutz bei dem von innen gedämmten Versuchsgebäude 4 gegeben ist. Für die Versuchsgebäude ohne Innendämmung der Außenwände konnte festgestellt werden, dass die Oberflächentemperatur nicht nur höhere Werte annimmt, sondern auch eine Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände aufweist. So ist das hydrophobierte Versuchsgebäude 2 durch eine niedrigere Oberflächentemperatur der südlichen Außenwand gekennzeichnet, als die Versuchsgebäude 1 und 5, die jeweils ungeschütztes Ziegelsichtmauerwerk aufweisen.



Abb. 154 - Durchschnittliche Oberflächentemperaturen für den Messbereich bx1 der südlichen Außenwand, A1

Der Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände bestätigt sich beim Vergleich der im Mauerwerk gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit. So zeigt sich beim Versuchsgebäude 2, dass dieses während der Thermografie am 13.03.2017 in der Bohrtiefe 14,5 cm und 4,0 cm eine niedrigere Feuchtigkeitsbelastung aufweist, als das Versuchsgebäude 1 (siehe Abb. 155). Die weitere Entwicklung der Feuchtigkeitsbelastung beider Versuchsgebäude ist für die Bohrtiefe 4,0 cm in Abb. 131 dargestellt.



Abb. 155 - Durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk der südlichen Außenwand, A1

Auch andere Messgrößen des Monitoringsystems, wie die im Mauerwerk gemessene Lufttemperatur (siehe Abb. 127 und Abb. 128), die Wärmestromdichte (siehe Abb. 139), die instationären U-Werte (siehe Abb. 141) und die Heizphasenverbräuche (siehe Abb. 209) zeigen tendenziell eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen der thermografischen Aufnahmen (siehe Abb. 154).

3.4.5 Feuchteindex

Analog zu den thermografischen Untersuchungen (siehe Abschnitt 3.4.4 Oberflächentemperatur) wurden im Rahmen von 3 Messfahrten an allen Versuchsgebäuden Mikrowellenfeuchtemessungen durchgeführt. Die Zeiträume dieser Messfahrten bzw. Aufenthalte sind in Tab. 49 mit der Häufigkeit angegeben, wie oft ein gesamtes Versuchsgebäude dabei mit der Mikrowellentechnik aufgenommen wurde. Eine vollständige Aufnahme bezieht sich auf die Außenwände Ost, Süd und West.

Aufenthalt	Beginn	Ende	Häufigkeit der Messung
1	07.03.2017	14.03.2017	1 x
2	29.05.2017	12.06.2017	2 x
3	23.10.2017	30.10.2017	1 x
Anmerkung	Die Häufigkeit der Messung b (Außenwand Ost-, Süd- und v erfasst wurde.	oezieht sich darauf, wie oft ein West) bei einem Aufenthalt mit	gesamtes Versuchsgebäude t der Mikrowellentechnik

Tab.	49 -	Zeiträume	der	Aufenthalte	und	Häufigkeit	der	Messung,	T1
	•••								

Mit den Mikrowellenfeuchtemessungen wurde das Ziel verfolgt, die punktuellen Langzeitmessungen des Monitoringsystems durch Kurzzeitmessungen zu ergänzen, die aber über die gesamte Fläche der Außenwände erfolgen. Damit besteht die Möglichkeit, an zuvor festgelegten Messpunkten die Höhe der Feuchtigkeitsbelastung über eine definierte Wand- bzw. Materialtiefe zu bestimmen und aus der Summe der Messpunkte eine Feuchtigkeitsverteilung über die Wandfläche abzuleiten. Zu diesem Zweck kamen bei den Untersuchungen 3 Messköpfe mit verschiedenen Eindring- bzw. Messtiefen und Wechselwirkungsvolumina zum Einsatz (siehe Tab. 50).

Nr.	Bezeichnung	Eindringtiefe	Wechselwirkungsvolumen
1	R1M	ca. 3 cm	bis 20 cm ³
2	DM	ca. 11 cm	bis 2.000 cm ²
3	РМ	ca. 25 cm	bis 15.000 cm ³
Anmerkung	Laut Herstellerangaben bezieht sich die Eindringtiefe und das der Messköpfe auf die nachfolgenden Messbedingungen: 1. Niedriger Wassergehalt der Probe im hygroskopischen Bere		as Wechselwirkungsvolumen

Tab. 50 - Bezeichnungen, Eindringtiefen und Wechselwirkungsvolumen der verwendeten Messköpfe, T3

Nachfolgend wird zunächst das Vorgehen bei der Durchführung der Mikrowellenfeuchtemessungen erläutert. Im Rahmen der sich anschließenden Auswertung der Messergebnisse erfolgt durch die Bildung von Durchschnittwerten die Ermittlung der bauteil- und gebäudebezogenen Feuchtigkeitsbelastung. Je nach Messfahrt wird diese als massebezogener Feuchtegehalt oder als Feuchteindex angegeben, bei dem es sich um einen dimensionslosen Messwert handelt. Im weiteren Verlauf der Auswertung wird die Verteilung der Feuchtigkeitsbelastung über die Außenwandflächen je nach Messkopf bzw. Eindringtiefe des Messkopfes grafisch dargestellt. Ausgewählte Feuchteverteilungen und thermografische Aufnahmen der Außenwände werden daraufhin verglichen. Wie im Abschnitt 3.4.4 Oberflächentemperatur beschrieben, soll damit der Zusammenhang zwischen der Verteilung der Feuchtigkeitsbelastung und der Oberflächentemperaturen grafisch untersucht werden.

Vorgehensweise

Das Mikrowellenmessverfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass die zerstörungsfreie Erfassung der Stofffeuchte entlang eines eigens festgelegten Rasters bzw. Messfelds erfolgt. Vor der Durchführung der Messungen war daher für die Außenwände der Versuchsgebäude ein Messraster zu konzipieren. Wichtige Kriterien bei der Konzeption dieses Messrasters waren eine ausreichende Anzahl und eine gleichmäßige Verteilung der Messpunkte. Des Weiteren sollten die Messpunkte so platziert werden, dass sich diese ausschließlich auf der Kopfseite der Binder befinden. Entsprechend der Lage der Mauerwerkssensoren des Monitoringsystems wurde damit bezweckt, dass bei der Durchführung der Mikrowellenfeuchtemessungen maßgeblich das Ziegelmaterial und weniger der Mauermörtel erfasst wird. Unter Einbeziehung jedes dritten Binders in jeder zweiten Binderschicht resultiert ein Raster mit einem Horizontalabstand von ca. 40 cm und einem Vertikalabstand von ca. 32 cm zwischen den einzelnen Messpunkten. Dabei war zu beachten, dass der Messkopf PM laut den Herstellerangaben ein zylindrisches Messvolumen mit einem Radius von 10 bis 15 cm aufweist. Da das Messvolumen nicht außerhalb des Messguts liegen darf, blieben in den Binderschichten des Messrasters der erste und letzte Ziegel unberücksichtigt. In der Summe setzt sich somit das Messraster auf der Ost- und Westfassade aus 11 x 9 Messpunkten und auf der Südfassade aus 6 x 9 Messpunkten zusammen (siehe Abb. 156 und Abb. 157). Eine Ausnahme bildet jedoch das Versuchsgebäude 3, bei dem die Westfassade aufgrund der örtlichen Zugänglichkeit nur im unteren Bereich mit 11 x 6 Messpunkten aufgenommen werden konnte.



Im nächsten Schritt wurden die aus dem Messraster resultierenden Messpunkte auf die Ost-, Südund Westfassade der Versuchsgebäude übertragen (siehe Abb. 158). Die sich nun anschließenden Messungen mit der Mikrowellentechnik (siehe Abb. 159) erfolgten bei allen Messfahrten einheitlich. Dazu wurde mit dem Versuchsgebäude 1 begonnen und erst dann zum nächsten Versuchsgebäude gewechselt, wenn dieses vollständig mit allen Messköpfen erfasst worden war. Die Aufnahme der Außenwände Ost, Süd und West erfolgte dabei zunächst mit dem Messkopf R1M, anschließend mit dem Messkopf DM und abschließend mit dem Messkopf PM. Gerätebedingt konnte das Raster bei den Messungen nur in vertikaler Richtung abwärts aufgenommen werden, sodass sich ein fester Ablauf eingestellt hat (siehe Abb. 157). Das Messergebnis eines Messpunktes resultierte dabei aus dem Mittelwert dreier Einzelmessungen, die unmittelbar nacheinander mit einem Messkopf an der Außenwand aufgenommen wurden.



Abb. 158 - Messpunkte für die Mikrowellenfeuchtemessung auf der Südfassade von Versuchsgebäude 5, A12



Abb. 159 - Durchführung der Feuchtemessung mit der Mikrowellentechnik am Versuchsgebäude 1, A13

Neben der Festlegung und Übertragung des Messrasters war vor dem Beginn der Feuchtemessungen ein Aufnahmeprofil entsprechend des zu untersuchenden Materials an dem Mikrowellenmessgerät auszuwählen. Dieses Aufnahmeprofil beinhaltet eine material- und messkopfspezifische Kalibrierkurve, die dazu dient, den von dem Messgerät ermittelten Reflexionsfaktor⁶⁶ in einen Wassergehalt zu überführen. Das bereits im Gerätespeicher hinterlegte Profil "Mauerziegel" zeigte dabei eine gute Anwendbarkeit für die Messungen an den Versuchsgebäuden, da die Materialparameter des zur Kalibrierung herangezogenen Ziegels (Trockenrohdichte und freie Wassersättigung) nur in einem Bereich von 2 bis 4 % von den Materialparametern des Referenzziegels abwichen (siehe Tab. 51). Das Aufnahmeprofil "Mauerziegel" wurde daher für die Feuchtemessungen im Rahmen des ersten Aufenthalts ausgewählt.

Materialparameter	Mauerziegel	Referenzziegel	Abweichung
	[kg/m³]	[kg/m³]	[%]
Trockenrohdichte	1.780,00	1.737,31	2,46
Freie Wassersättigung	265,22	276,63	4,13
Anmerkung	Bei der Berechnung der proze	entualen Abweichungen wurde	n die Materialparameter des

Tab. 51 - Materialparameter des Mauerziegels und des Referenzziegels einschließlich Abweichungen, T4

Referenzziegels als Grundwert verwendet.

Für den zweiten und dritten Aufenthalt am Versuchsstandort wurde bei den Mikrowellenmessungen hingegen das weitestgehend materialunabhängige Profil "Feuchteindex" verwendet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die im Rahmen des ersten Aufenthalts mit dem Messkopf DM bestimmten Wassergehalte sehr niedrig ausfielen. Da von diesem Messkopf oft der geringstmögliche Messwert von 0,1 M.-% ausgegeben wurde, war eine Auswertung hinsichtlich der Feuchtigkeitsverteilung nicht mehr oder nur noch sehr eingeschränkt möglich. Das Aufnahmeprofil "Feuchteindex" bietet an dieser Stelle den Vorteil, dass die Feuchtigkeitsbelastung des Bauteils als dimensionsloser Wert in einem Bereich von 0 bis 4000 ausgegeben werden kann. Damit resultiert eine feinere Abstufung bei der Darstellung der Feuchtigkeitsbelastung und kritische Messungen mit zu geringen Messwerten enthalten nun wieder auswertbare Informationen zur Feuchtigkeitsverteilung (siehe Abb. 160).

⁶⁶ Der Reflexionsfaktor ist der Quotient aus der rücklaufenden bzw. von dem Messgut reflektierten elektromagnetischen Welle und der hineinlaufenden bzw. von dem Messkopf ausgesandten elektromagnetischen Welle.



Abb. 160 - Messungen mit den Profilen "Mauerziegel" und "Feuchteindex" für Versuchsgebäude 1, Außenwand Ost, A14

Im Rahmen einer Pilotstichprobe mit 22 Probekörpern konnte ermittelt werden, dass das historische Ziegelmaterial der Versuchsgebäude hinsichtlich der Rohdichte deutliche Schwankungen aufweist (siehe Abschnitt 4.2 Beschreibung - Laboruntersuchungen). Die verwendeten Ziegel sind daher eher als ein inhomogenes Material zu verstehen. Dies hat zur Folge, dass bei der Nutzung des Profils "Mauerziegel" die darin hinterlegte Kalibrierfunktion auch bei den Ziegeln zur Anwendung kommt, die eine deutlich abweichende Rohdichte aufweisen. Aus diesem Grund können die beim ersten Aufenthalt am Versuchsstandort ermittelten Wassergehalte nur als Orientierungswerte angesehen werden. Obwohl sich schwankende Materialeigenschaften (z.B. Rohdichte und Struktur) auch auf die Messungen mit dem Profil "Feuchteindex" auswirken können, ist deren Auswertung hinsichtlich der Feuchtigkeitsverteilung und der mittleren Feuchtigkeitsbelastung von Bauteilen differenzierter möglich und letztlich zuverlässiger als beim Profil "Mauerziegel".

Auswertung der Feuchtigkeitsbelastung

Für die im Zeitraum vom 10.03.2017 bis 13.03.2017 erfolgten Mikrowellenfeuchtemessungen sind die Messergebnisse in Abb. 161 und Tab. 52 als bauteilbezogene und gebäudebezogene Mittelwerte dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich allerdings nur auf den Messkopf PM, da dieser die größte Eindringtiefe aufweist (siehe Tab. 50) und somit die gesamte Feuchtigkeitsbelastung eines Bauteils am repräsentativsten abbilden kann. Bei der Ermittlung der gebäudebezogenen Mittelwerte wurden die Außenwände Ost, Süd und West mit der Anzahl der dort bestimmten Messwerte berücksichtigt. Im vollständig aufgenommenen Zustand gingen somit die Außenwände Ost und West mit 11 x 9 Messwerten und die Außenwand Süd mit 6 x 9 Messwerten in die Berechnung ein. Unberücksichtigt blieben bei den Feuchtigkeitsmessungen des ersten Aufenthalts die Außenwände Süd und West des Versuchsgebäudes 3, da diese nur eingeschränkt zugänglich waren.



Ergänzend zu den Luftfeuchtemessungen des Monitoringsystems, die insbesondere zur Bestimmung der Feuchtigkeitsbelastung im Sorptionsfeuchtebereich geeignet sind, bieten die Messungen mit der Mikrowellentechnik die Möglichkeit auch den Kapillarwasserbereich mit einer hohen Genauigkeit zu erfassen. Wie die Ergebnisse aus Abb. 161 und Tab. 52 zeigen, liegen sowohl die bauteil- als auch die gebäudebezogenen Mittelwerte der Versuchsgebäude in diesem Hochfeuchtebereich, wenn die Rohdichte und die Feuchtespeicherfunktion des Referenzziegels zugrunde gelegt werden.

suchs- äude	Außenwand Ost	Außenwand Süd	Außenwand West	Versuchsgebäude
Vers geb	[M%]	[M%]	[M%]	[M%]
1	0,96	1,49	1,95	1,46
2	0,89	0,90	1,25	1,03
3	2,28	-	-	-
4	1,30	1,23	1,50	1,37
5	2,16	3,55	5,47	3,76

Tab. 52 - Mittelwerte der Mikrowellenfeuchtemessungen mit dem Messkopf PM (10.03.2017 bis 13.03.2017), T1

Zudem bestätigt sich anhand von Abb. 161 und Tab. 52, dass das Versuchsgebäude 5 mit einem gebäudebezogenen Wassergehalt von 3,76 M.-% die mit Abstand höchste Feuchtigkeitsbelastung aufweist. Die niedrigste Feuchtigkeitsbelastung erreicht das hydrophobierte Versuchsgebäude 2 mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 1,03 M.-%. Ebenso wird deutlich, dass bauteilbezogen die höchsten Wassergehaltswerte bei den Außenwänden vorliegen, die nach Westen ausgerichtet und demnach einer hohen Schlagregenbelastung ausgesetzt sind (siehe Abb. 198 und Abb. 199). Obwohl diese aus Richtung Osten deutlich niedriger ausfällt, konnte für die östliche Außenwand des Versuchsgebäudes 3 ein Wassergehalt festgestellt werden, der noch über dem Wassergehalt der aktiv beregneten östlichen Außenwand von Versuchsgebäude 5 liegt. Dies verdeutlicht noch einmal, dass auch die Außenwände mit konstruktivem Feuchteschutz durch hohe Feuchtigkeitsbelastungen gekennzeichnet sein können, wenn dieser nicht oder nicht vollständig funktionsfähig ist.



Abb. 162 - Mittelwerte der Mikrowellenfeuchtemessungen mit dem Messkopf PM (31.05.2017 bis 03.06.2017), A1

Die Ergebnisse der Mikrowellenfeuchtemessungen des zweiten Aufenthalts am Versuchsstandort sind in Abb. 162 und Abb. 163 sowie in Tab. 53 und Tab. 54 als Feuchteindex zusammengestellt. Beim Feuchteindex wird eine niedrige Feuchtigkeitsbelastung als niedriger Zahlenwert und eine hohe Feuchtigkeitsbelastung als hoher Zahlenwert dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass auch im darrtrockenen Zustand, poröse Materialien durch porenbedingte Reflexionen gekennzeichnet sind und daher einen Feuchteindex aufweisen können, der größer als 0 ist. Für Vergleichsmessungen bei gleicher Materialität (Ziegelmauerwerk) ist dies jedoch von geringer Relevanz.

suchs- äude	Außenwand Ost	Außenwand Süd	Außenwand West	Versuchsgebäude
Vers geb	[-]	[-]	[-]	[-]
1	1.070,36	1.021,80	1.253,95	1.132,08
2	1.034,55	1.034,02	1.087,09	1.055,08
3	1.247,41	1.253,06	1.607,52	1.357,33
4	1.094,06	1.070,70	1.062,72	1.076,74
5	1.346,54	1.464,37	1.562,76	1.456,73



Abb. 163 - Mittelwerte der Mikrowellenfeuchtemessungen mit dem Messkopf PM (04.06.2017 bis 08.06.2017), A1

Sowohl bei der ersten Messung (31.05.2017 bis 03.06.2017) als auch bei der zweiten Messung (04.06.2017 bis 08.06.2017) des zweiten Aufenthalts konnte gebäudebezogen der Höchstwert der Feuchtigkeitsbelastung beim Versuchsgebäude 5 festgestellt werden. Der Tiefstwert wurde zunächst von Versuchsgebäude 2 (erste Messung) und daraufhin von Versuchsgebäude 1 (zweite Messung) erreicht. Bei der zweiten Messung betrug die Differenz beider Versuchsgebäude jedoch nur 6,04. Die Feuchtigkeitsbelastung der Versuchsgebäude 1 und 2 kann demnach als näherungsweise gleich bezeichnet werden (siehe Tab. 54).

Wie beim ersten Aufenthalt zeigt sich auch beim zweiten Aufenthalt, dass das Versuchsgebäude 3 durch eine deutlich höhere Feuchtigkeitsbelastung gekennzeichnet ist, als die weiteren nicht aktiv beregneten Versuchsgebäude 1, 2 und 4. Mit einem Wert von 1.607,52 ist der Feuchteindex der westlichen Außenwand bei der ersten Messung (siehe Abb. 162 und Tab. 53) sogar höher, als der Feuchteindex der aktiv beregneten Außenwand Ost und Süd von Versuchsgebäude 5. Zu beachten ist jedoch, dass die Mikrowellenfeuchtemessungen an der Außenwand West von Versuchsgebäude 3 nur 2/3 der Fläche umfassen. Für das obere Drittel der Außenwand können somit keine Aussagen getroffen werden.

Zudem wird mit Abb. 162 und Abb. 163 deutlich, dass die Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände von Versuchsgebäude 1, 2 und 4 im Verlauf des zweiten Aufenthalts sehr ähnliche Werte annimmt.

suchs- äude	Außenwand Ost	Außenwand Süd	Außenwand West	Versuchsgebäude
Vers geb	[-]	[-]	[-]	[-]
1	1.068,94	1.042,04	1.053,02	1.056,92
2	1.038,73	1.040,87	1.099,23	1.062,96
3	1.286,92	1.477,02	1.657,14	1.445,37
4	1.085,63	1.067,78	1.059,73	1.071,63
5	1.446,81	1.701,69	1.725,55	1.610,93

Tab. 54 - Mittelwerte der Mikrowellenfeuchtemessungen mit dem Messkopf PM (04.06.2017 bis 08.06.2017), T1



Abb. 164 - Mittelwerte der Mikrowellenfeuchtemessungen mit dem Messkopf PM (24.10.2017 bis 27.10.2017), A1

Der Vergleich von Abb. 163 (zweiter Aufenthalt) und Abb. 164 (dritter Aufenthalt) zeigt, dass die gebäudebezogene Feuchtigkeitsbelastung der Versuchsgebäude 4 und 5 deutlich zugenommen hat. Bei den weiteren Versuchsgebäuden ist deren Zunahme hingegen sehr gering ausgeprägt, sodass der Höchstwert weiterhin beim Versuchsgebäude 5 und der Tiefstwert beim Versuchsgebäude 2 erreicht wird. Gegenüber dem zweiten Aufenthalt zeichnen sich in den Messergebnissen des dritten Aufenthalts zudem größere Unterschiede in der Feuchtigkeitsbelastung der einzelnen Außenwände von Versuchsgebäude 3 und 4 ab. Bei diesen stellt sich entsprechend der Schlagregeneinwirkungen (siehe Abb. 198 und Abb. 199) der Höchstwert bei der Außenwand West und der Tiefstwert bei der Außenwand Ost ein (siehe Tab. 55).

Werden nun die Messergebnisse der Mikrowellenfeuchtemessungen (Messkopf PM) mit denen des Monitoringsystems am Beispiel der Außenwand West verglichen (siehe Abb. 130), so zeigen sich in Hinblick auf die Entwicklung und Höhe der Feuchtigkeitsbelastung diverse Übereinstimmungen, aber auch Diskrepanzen. Die voneinander abweichenden Ergebnisse können darauf zurückgeführt werden, dass punktuell durchgeführte Langzeitmessungen mit der Monitoringtechnik und flächig durchgeführte Kurzzeitmessungen mit der Mikrowellentechnik nicht uneingeschränkt vergleichbar sind. Deutlich wird dies mit den Visualisierungen im Anhang 6 - Mikrowellenfeuchtemessung, auf denen die Schwankungen der Feuchtigkeitsbelastung über die Wandflächen dargestellt werden.

suchs- äude	Außenwand Ost	Außenwand Süd	Außenwand West	Versuchsgebäude
Vers geb	[-]	[-]	[-]	[-]
1	1.123,43	1.034,80	1.111,30	1.099,67
2	1.091,68	1.084,13	1.101,21	1.093,81
3	1.304,02	1.330,67	1.784,15	1.455,29
4	1.170,43	1.414,96	1.452,74	1.333,74
5	1.861,54	1.866,41	1.908,90	1.881,19

Tab. 55 - Mittelwerte der Mikrowellenfeuchtemessungen mit dem Messkopf PM (24.10.2017 bis 27.10.2017), T1

Im Rahmen des dritten Aufenthalts am Versuchsstandort wurden die Mikrowellenfeuchtemessungen nicht nur flächig entlang des festgelegten Messrasters durchgeführt (siehe Abb. 156 und Abb. 157), sondern auch als Punktmessungen. Diese Punktmessungen erfolgten wiederholt (siehe Tab. 56) an allen Versuchsgebäuden, die mit einer Wärmestrommessplatte ausgestattet wurden. Dabei wurde ausschließlich mit dem Messkopf PM der Mauerwerksbinder aufgenommen, auf dessen Rückseite sich die Wärmestrommessplatte befindet. Wie bei den flächig durchgeführten Messungen ergibt sich das Messergebnis aus dem Mittelwert dreier Einzelmessungen, die zeitlich in einem kurzen Abstand nacheinander durchgeführt wurden.

Nummer	Datum	Zeitraum	Versuchsgebäude
1. Messung	24.10.2017	15:30 bis 16:00 Uhr	
2. Messung	25.10.2017	13:00 bis 13:30 Uhr	
3. Messung	26.10.2017	15:00 bis 15:30 Uhr	1 bis 4
4. Messung	27.10.2017	14:00 bis 14:30 Uhr	
5. Messung	28.10.2017	08:50 bis 09:20 Uhr	

Tab. 56 - Datum und Zeiträume der Punktmessung, T1

Für die Tage, an denen die Punktmessungen mit der Mikrowellentechnik erfolgten, wurden zudem die instationären U-Werte der Außenwand West anhand der aufgezeichneten Wärmestromdichte, der Innenraumtemperatur und Außentemperatur berechnet. Die damit resultierenden Tageswerte sind zusammen mit den Ergebnissen der punktuell durchgeführten Mikrowellenfeuchtemessungen in Tab. 57 zusammengestellt.

ıs- le	Instationäre U-Werte					
rsuch	24.10.2017	25.10.2017	26.10.2017	27.10.2017	28.10.2017	Durchschnitt
Ve ge	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]
1	1,597	2,240	1,817	1,693	2,000	1,834
2	1,471	1,969	1,545	1,472	1,762	1,615
3	1,857	2,489	1,929	1,865	2,282	2,047
4	0,636	0,965	0,697	0,648	0,792	0,729
	Feuchteindex					
ıs- le			Feucht	eindex		
rrsuchs- ebäude	24.10.2017	25.10.2017	Feucht 26.10.2017	eindex 27.10.2017	28.10.2017	Durchschnitt
Versuchs- gebäude	24.10.2017 [-]	25.10.2017 [-]	Feucht 26.10.2017 [-]	eindex 27.10.2017 [-]	28.10.2017 [-]	Durchschnitt [-]
L Versuchs- gebäude	24.10.2017 [-] 1.092	25.10.2017 [-] 1.413	Feucht 26.10.2017 [-] 1.312	eindex 27.10.2017 [-] 1.399	28.10.2017 [-] 1.313	Durchschnitt [-] 1.306
Versuchs- gebäude	24.10.2017 [-] 1.092 916	25.10.2017 [-] 1.413 875	Feucht 26.10.2017 [-] 1.312 877	eindex 27.10.2017 [-] 1.399 842	28.10.2017 [-] 1.313 850	Durchschnitt [-] 1.306 872
- Versuchs- gebäude	24.10.2017 [-] 1.092 916 1.810	25.10.2017 [-] 1.413 875 1.910	Feucht 26.10.2017 [-] 1.312 877 1.851	eindex 27.10.2017 [-] 1.399 842 1.878	28.10.2017 [-] 1.313 850 1.881	Durchschnitt [-] 1.306 872 1.866

Tab. 57 - Instationäre U-Werte (Tageswert) und Feuchtigkeitsbelastung (Feuchteindex), T1

Die für den Zeitraum vom 24.10.2017 bis zum 28.10.2017 bestimmten Durchschnittswerte der Punktmessungen und der instationären U-Werte können Abb. 165 entnommen werden.



Durch die grafische Gegenüberstellung von gemessenen U-Werten und gemessenen Werten für den Feuchteindex verdeutlicht sich der Zusammenhang zwischen beiden Messgrößen (siehe Abb. 165). So zeigt sich bei den ungedämmten Versuchsgebäuden, dass mit höherer Feuchtigkeitsbelastung ein größerer instationärer U-Wert und mit niedrigerer Feuchtigkeitsbelastung ein kleinerer instationärer U-Wert einhergeht. Zugleich kann Tab. 57 entnommen werden, dass sich Mauerwerksfeuchtigkeit bei ungedämmten Außenwänden stärker auf den Wärmeschutz auswirkt, als bei Außenwänden mit einer Innendämmung. Deutlich wird dies anhand von Versuchsgebäude 1 und 4, die mit einem mittleren Feuchteindex von 1306 bzw. 1256 zwar eine ähnliche Feuchtigkeitsbelastung aufweisen, sich aber hinsichtlich der Schwankungen des instationären U-Wertes unterscheiden. So sind diese beim Versuchsgebäude 4 im Mittel um ca. 47 % kleiner, als beim Versuchsgebäude 1. Zudem kann über Tab. 57 die Wirksamkeit der Hydrophobierung nachgewiesen werden. So traten zwischen der ersten und zweiten Messung Regenereignisse auf (siehe Abb. 166), die sich im deutlich gestiegenen Feuchteindex der Versuchsgebäudes 1, 3 und 4 abbilden. Das hydrophobierte Versuchsgebäude 2 weist hingegen ein abfallenden Feuchteindex und somit eine fortschreitende Trocknung auf.



Ergänzend zur Abb. 166 sind in den Abb. 167 bis Abb. 169 alle Regenereignisse zusammengestellt, die während der 3 Aufenthalte bzw. zwischen den Mikrowellenfeuchtemessungen auftraten.








Auswertung der Feuchtigkeitsverteilung

Die flächige Feuchtigkeitsverteilung über verschiedene Messtiefen ist in Abb. 170 für die westliche Außenwand von Versuchsgebäude 1 dargestellt. Die am 10.03.2017 aufgenommenen Messwerte (siehe Abb. 167) zeigen bei gleicher Farbskalierung, dass unabhängig von der Messtiefe bzw. von dem Messkopf eine unregelmäßige aber sehr ähnliche Feuchtigkeitsverteilung über die Wandfläche vorliegt. Zudem wird deutlich, dass die mittlere Feuchtigkeitsbelastung je nach Messkopf schwankt. So weist der Messkopf R1M eine mittlere Feuchtigkeitsbelastung von 1,43 M.-%, der Messkopf DM von 0,35 M.-% und der Messkopf PM von 1,95 M.-% aus.



Abb. 170 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 1 (Messungen vom 10.03.2017), A15

Die am Beispiel der Außenwand West von Versuchsgebäude 1 erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Feuchtigkeitsverteilung und -belastung bestätigen sich auch bei den Außenwänden der weiteren Versuchsgebäude. Vor allem beim Versuchsgebäude 5 zeigt sich bei allen Aufnahmen der westlichen Außenwand (Messkopf R1M, DM und PM) ein charakteristisches Muster der Feuchtigkeitsverteilung bei gleicher Farbskalierung (siehe Abb. 171). Auch deren mittlere Feuchtigkeitsbelastung weist mit 4,77 M.-% beim Messkopf R1M, 2,86 M.-% beim Messkopf DM und 5,47 M.-% beim Messkopf PM eine ähnliche Abstufung auf, wie beim Versuchsgebäude 1.



Abb. 171 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 5 (Messungen vom 11.03.2017), A15

Beim Vergleich der Feuchtigkeitsbelastung gemäß der Mikrowellenfeuchtemessungen (in M-%.) und gemäß der Mauerwerkssensoren des Monitoringsystem (in %) ist ein deutlicher Unterschied in Hinblick auf die Größe der Zahlenwerte gegeben. Zurückzuführen ist dies auf die unterschiedlichen Einheiten. So wird anhand der Feuchtespeicherfunktion des Referenzziegels deutlich, dass bei einer hohen relativen Luftfeuchtigkeit von 80 oder 95 % ein Wassergehalt von 1,940 bzw. 5,694 kg/m³ resultiert (siehe Abschnitt 4.2 Beschreibung - Laboruntersuchungen). Bezogen auf die Rohdichte des Referenzziegels von 1.737,31 kg/m³ entspricht dies 0,112 bzw. 0,328 M.-%. Damit zeigt sich, dass die Mikrowellenfeuchtemessungen die Feuchtemessungen des Monitoringsystems vor allem im kritischen Kapillarwasserbereich (relative Luftfeuchtigkeit größer 95 %) sinnvoll ergänzen können.

Die Veränderung der Feuchtigkeitsverteilung wird für die Außenwand West der Versuchsgebäude 1 und 5 in den Abb. 172 und Abb. 173 dargestellt. Gegenüber den Abb. 170 und Abb. 171 erfolgt dies mit Hilfe des Feuchteindex. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Messköpfe R1M, DM und PM im Messprofil "Feuchteindex" bei gleicher Feuchtigkeitsbelastung eines Stoffes einen unterschiedlichen Reflexionsfaktor ausgeben. Da im Gegensatz zum Messprofil "Mauerziegel" der Reflexionsfaktor nicht mit einer Kalibrierkurve in einen Wassergehalt überführt, sondern lediglich mit dem Faktor 4000 multipliziert wird (siehe Gl. 6), spiegeln sich die unterschiedlichen Reflexionsfaktoren der Messköpfe in dem Feuchteindex wider. Dies ist jedoch nur beim messkopfübergreifenden Vergleich von Einzelwerten von Relevanz, nicht aber beim Vergleich der flächigen Feuchtigkeitsverteilungen.

	$FI = 4.000\rho$	Gl. 6
FI	Feuchteindex	[-]
ρ	Reflexionsfaktor	[-]

Mit der Abb. 170 und Abb. 172 wird deutlich, dass die mit den Messköpfen DM und PM ermittelten Feuchtigkeitsverteilungen vom 10.03.2017 bis 24.10.2017 nur wenigen Veränderungen unterliegen. Lediglich der Messkopf R1M weist für die oberflächennahen Wandbereiche stärkere Veränderungen der Feuchtigkeitsverteilung auf. Beim Versuchsgebäude 5 zeigt sich eine ähnliche Situation, jedoch ist hier, aufgrund der aktiven Beregnung, eine kontinuierliche Vergrößerung von Bereichen hoher Feuchtigkeitsbelastung festzustellen (siehe Abb. 171 und Abb. 173). Auch beim Versuchsgebäude 2 bestätigt sich eine sehr konstante Feuchtigkeitsverteilung für den Messzeitraum (siehe Abb. 174).



Abb. 172 - Veränderung der Feuchtigkeitsverteilung (Versuchsgebäude 1, Außenwand West), A15





Abb. 174 - Veränderung der Feuchtigkeitsverteilung (Versuchsgebäude 2, Außenwand West), A15

Neben einer tendenziell konstanten Feuchtigkeitsverteilung zeichnet sich in den Messergebnissen von Messkopf DM und PM auch ein horizontaler Streifen mit einer erhöhten Feuchtigkeitsbelastung beim Versuchsgebäude 4 ab (siehe Abb. 175). Zurückzuführen ist dies auf den Bauprozess in dem Bereiche der Außenwand Ost und West zur Unterfangung einer Arbeitsbühne offenbelassen und erst nach deren Rückbau ausgemauert wurden (siehe Abb. 45). Dadurch konnte Feuchtigkeit, z.B. infolge von Regenereignissen, punktuell in tiefere Wandbereiche eindringen.



Abb. 175 - Veränderung der Feuchtigkeitsverteilung (Versuchsgebäude 4, Außenwand West), A15

Im Gegensatz zu den ziegelsichtigen Versuchsgebäuden zeigt sich bei dem von außen verputzten Versuchsgebäude 3 eine Feuchtigkeitsbelastung, die nicht punktuell, sondern gleichmäßiger verteilt über die gesamte Wandfläche auftritt. Besondern deutlich wird dies anhand der Messergebnisse der Messköpfe DM und PM (siehe Abb. 176).



Abb. 176 - Veränderung der Feuchtigkeitsverteilung (Versuchsgebäude 3, Außenwand West), A15

Vergleich von Oberflächentemperatur- und Feuchtigkeitsverteilungen

Ergänzend zu der separaten Auswertung der thermografischen Aufnahmen (siehe Abschnitt 3.4.4 Oberflächentemperatur) sowie der separaten Auswertung der Mikrowellenfeuchtemessungen (siehe Abschnitt 3.4.5 Feuchteindex) werden diese im Folgenden miteinander verglichen. Dazu wird zuerst Bezug genommen auf das Versuchsgebäude 5, da dieses aktiv beregnet wurde (siehe Tab. 16 und Tab. 17) und durch die größte Feuchtigkeitsbelastung der Umfassungswände gekennzeichnet ist (siehe Abb. 161 bis Abb. 164). Für alle aktiv beregneten Außenwände dieses Versuchsgebäudes zeigt sich dabei, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur- und der Feuchtigkeitsverteilung besteht. Besonders deutlich wird dies bei den thermografischen Aufnahmen und den Mikrowellenfeuchtemessungen vom 02.06.2017 und 07.06.2017, die nachfolgend in der Abb. 177 und Abb. 178 dargestellt sind. Die Rahmenbedingungen bei denen die Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen erfolgten können Tab. 47 und Abb. 168 entnommen werden.



Abb. 177 - Thermografische Aufnahmen (oben) und Mikrowellenfeuchtemessungen (unten) von Versuchsgebäude 5, A16

Zu beachten ist bei Abb. 177 und Abb. 178, dass die Außenwand Ost durch die ausgeblasene Luft des aktiven Luftentfeuchters und des Axialventilators direkt angeströmt wird (siehe Abschnitt 3.2.2 Entfeuchtung). Insbesondere die durch den Kondensator des Luftentfeuchters erwärmte Luft hat zur Folge, dass sich der angeströmte Bereich der Außenwand auf den thermografischen Aufnahmen durch eine höhere Oberflächentemperatur abzeichnet. Während die feuchtigkeitsbedingte Erhöhung der Oberflächentemperaturen keilförmig im oberen Teil der Außenwand deutlich wird, stellt sich die gerätebedingte Erhöhung der Oberflächentemperaturen hingegen oval unterhalb dieser Keilform dar. Eine Übereinstimmung mit der Feuchtigkeitsverteilung ist hier nicht gegeben. Des Weiteren ist daraufhin hinzuweisen, dass sich die stark durchfeuchteten Mauerwerksbereiche durch eine höhere und nicht durch eine niedrigere Oberflächentemperatur von den trockeneren Mauerwerksbereichen auf den Thermogrammen absetzen. Dies deutet darauf hin, dass die Verdunstung von Wasser an der Außenwandoberfläche und der damit verbundene Kühleffekt von einem stärkeren Wärmetransport aufgrund der Bauteildurchfeuchtung zumindest ausgeglichen wird. Einfluss auf diesen Vorgang hat jedoch auch die durch die Feuchtigkeit erhöhte spezifische Wärmekapazität des Mauerwerks.



Abb. 178 - Thermografische Aufnahmen (oben) und Mikrowellenfeuchtemessungen (unten) von Versuchsgebäude 5, A16

Zur besseren Verdeutlichung des Zusammenhangs zwischen der Oberflächentemperatur- und der Feuchtigkeitsbelastung wurde auf eine Fotografie des Versuchsgebäudes 5 zwei Thermogramme und zwei Visualisierungen der Feuchtigkeitsverteilung von Außenwand Süd und West projiziert (siehe Abb. 179 und Abb. 180). Die Thermogramme wurden am 10.06.2017 und die Messwerte für die Visualisierung der Feuchtigkeitsverteilung am 07.06.2017 mit dem Messkopf PM aufgenommen (siehe Tab. 47 und Abb. 168).



Abb. 179 - Thermogramm auf der Süd- und Ostfassade des Versuchsgebäudes 5, A17

Abb. 180 - Visualisierung der Feuchtigkeitsverteilung auf der Süd- und Ostfassade des Versuchsgebäudes 5, A17

Neben dem Versuchsgebäude 5 zeichnen sich auch beim Versuchsgebäude 4 Außenwandbereiche mit erhöhter Feuchtigkeitsbelastung auf den thermografischen Aufnahmen ab. Besonders deutlich wird dies in Teilen der westlichen und östlichen Außenwand, die im Verlauf des Bauprozesses zur Unterfangung einer Arbeitsbühne verwendet und erst später vermauert wurden (siehe Abb. 45 und Abb. 181). Die klimatischen Bedingungen unter denen die Messungen durchgeführt wurden, sind in Tab. 47 und Abb. 168 zusammengestellt.



Abb. 181 - Thermografische Aufnahmen (oben) und Mikrowellenfeuchtemessungen (unten) von Versuchsgebäude 4, A16

Auch beim Versuchsgebäude 4 wurden zur Verdeutlichung der hygrothermischen Verhältnisse der Außenwände ausgewählte Thermogramme und Visualisierungen der Feuchtigkeitsverteilung auf die Fassaden projiziert (siehe Abb. 182 und Abb. 183). Gut sichtbar ist hier die feuchtigkeitsbedingte Erhöhung der Oberflächentemperatur im mittleren Bereich der Westfassade. Die partiell höheren Oberflächentemperaturen in der unteren Hälfte der Südfassade zeigen hingegen keinen eindeutigen Zusammenhang mit der dort gegebenen Feuchtigkeitsbelastung. Da sich diese insbesondere bei den untersten Ziegelschichten auf allen thermografischen Aufnahmen der Südfassade darstellen, ist hier von einer materialbedingten Erhöhung der Oberflächentemperatur auszugehen.



Abb. 182 - Thermogramm auf der Süd- und Westfassade des Versuchsgebäudes 4, A17



Abb. 183 - Visualisierung der Feuchtigkeitsverteilung auf der Süd- und Westfassade des Versuchsgebäudes 4, A17

Das Aufnahmedatum und weitere Informationen zu den projizierten Messungen aus Abb. 182 und Abb. 183 können der Abb. 181 entnommen werden. Zudem befindet sich eine Zusammenstellung aller Projektionen, aber auch aller Mikrowellenfeuchtemessungen und Thermogramme im Anhang zu diesem Forschungsbericht.

3.5 Messung - Außenklima

3.5.1 Datenanalyse

Nachfolgend werden die wichtigsten Messdaten des Ausklimas grafisch dargestellt, die im Zeitraum vom 16.01.2016 (00:00 Uhr) bis zum 01.01.2018 (00:00 Uhr) am Versuchsstandort durch das dort betriebene meteorologische Messsystem aufgezeichnet wurden. In den Diagrammen zur

- Windrichtung, Windgeschwindigkeit,
- Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck,
- Globalstrahlung, Direktstrahlung, Diffusstrahlung
- und Niederschlagshöhe (flüssige und feste Niederschläge)

sind die in einem 10-Minuten-Zyklus erfassten Daten als gemittelte oder summierte Stundenwerte in hellblau aufgetragen. In allen Diagrammen mit einer Zeitachse werden zudem die gleitenden Wochenmittelwerte in dunkelblau dargestellt. Ebenso sind in einzelnen Diagrammen die Zeiträume farblich gekennzeichnet, in denen es zu einem Ausfall des Messsystems kam (Markierung in orange) oder in denen Wetterdaten falsch aufgezeichnet wurden (Markierung in grau). Bei den in diesen Zeiträumen dargestellten Messwerten handelt es sich immer um Kompensationsdaten, die entweder von einer anderen Wetterstation stammen oder mit Hilfe von Bestandsdaten linear interpoliert wurden. Eine detaillierte Aufführung dieser Zeiträume, einschließlich der Quelle der dazugehörigen Kompensationsdaten, kann dem Abschnitt 3.5.2 Datenkompensation entnommen werden.

Das Auftreten bestimmter Windrichtungen ist in Abhängigkeit von den kumulierten Stundenwerten in Abb. 184 und in Abhängigkeit von der kumulierten Niederschlagshöhe (Niederschlag auf einer horizontalen Empfangsfläche) in Abb. 185 dargestellt. Mit einer Dauer von 232 Stunden wurde somit die Windrichtung 220° (Wind aus Richtung Süd-West) am häufigsten am Versuchsstandort aufgezeichnet. Auch bei Regenereignissen ist diese Windrichtung am stärksten vertreten, was an der kumulierten Niederschlagshöhe von 288,62 mm bei 225° deutlich wird (siehe Abb. 185).





Abb. 184 - Verteilung der Windrichtung in Abhängigkeit von den kumulierten Stundenwerten, A1

Abb. 185 - Verteilung der Windrichtung in Abhängigkeit von der kumulierten Niederschlagshöhe, A1

In Abb. 186 sind die Stunden- und die gleitenden Wochenmittelwerte für die Windgeschwindigkeit dargestellt. Für den gesamten Zeitraum der Datenaufzeichnung resultieren ein Mittelwert für die Windgeschwindigkeit von 1,25 m/s und ein Maximalwert von 8,08 m/s (mit Kompensationsdaten) bzw. 5,83 m/s (ohne Kompensationsdaten). Letzterer wurde am 27.12.2016 um 06:00 Uhr erfasst.



Die am Versuchsstandort aufgezeichneten Messwerte der Lufttemperatur können der nachfolgenden Abb. 187 entnommen werden. Als gemittelte Lufttemperatur resultiert für den gesamten Zeitraum der Messung ein Wert von 10,69 °C. Die erfasste Minimal- und Maximaltemperatur beträgt -7,40 °C am 16.01.2017 um 21:00 Uhr und 33,47 °C am 24.06.2016 um 15:00 Uhr. Zudem konnten infolge der vor Ort durchgeführten Wetteraufzeichnung 78 Frosttage (niedrigste Lufttemperatur < 0 °C) und 8 Eistage (höchste Lufttemperatur < 0 °C) festgestellt werden.



Für die relative Luftfeuchtigkeit sind die Stunden- und gleitenden Wochenmittelwerte in Abb. 188 aufgetragen. Für den gesamten Zeitraum der Messung ergeben sich ein Mittelwert von 78,03 %, ein Minimalwert von 19,62 % und ein Maximalwert von 100,00 % (mit Kompensationsdaten) bzw. 98,4 % (ohne Kompensationsdaten). Der Minimalwert wurde am 07.06.2016 um 14:00 Uhr und der Maximalwert (ohne Kompensationsdaten) am 21.07.2017 um 04:00 und 05:00 Uhr erreicht.



Der Verlauf der Stunden- und gleitenden Wochenmittelwerte ist für die absolute Luftfeuchtigkeit in Abb. 189 aufgeführt. Daraus ergibt sich für den gesamten Zeitraum der Messung ein Mittelwert von 7,94 g/m³. Der mit 1,95 g/m³ kleinste Stundenwert konnte am 11.02.2017 um 07:00 Uhr gemessen werden. Der größte Stundenwert für die absolute Luftfeuchtigkeit beträgt 17,85 g/m³ und wurde am 30.07.2017 um 12:00 Uhr erfasst.



Die Ergebnisse zur Luftdruckmessung sind in Abb. 190 aufgeführt. Der Mittelwert für die gesamte Messdauer beträgt 1.014,45 mbar. Auf 1.040,68 mbar beläuft sich der größte Stundenwert, der am 06.01.2017 um 10:00 Uhr am Versuchsstandort bestimmt werden konnte. Der kleinste Stundenwert beträgt 975,03 mbar und wurde am 10.02.2016 um 01:00 Uhr gemessen.



Die auf einer horizontalen Empfangsfläche gemessenen Werte der Globalstrahlung sind in Abb. 191 dargestellt. Für den Messzeitraum vom 16.01.2016 bis 31.12.2016 resultiert damit eine Summe der Globalstrahlung von 1.111,05 kWh/m². In dem folgenden und vollständig erfassten Jahr 2017 ist die Summe der Globalstrahlung hingegen kleiner und beträgt 1.043,54 kWh/m². Für den gesamten Messzeitraum ergibt sich damit ein gemittelter Momentanwert von 125,38 W/m². Das Maximum des Momentanwerts wurde mit 985,50 W/m² am 15.06.2017 um 12:00 Uhr erreicht.



Abb. 191 - Stundenmittel- und gleitende Wochenmittelwerte für die Globalstrahlung, A1

Die ebenfalls auf einer horizontalen Empfangsfläche gemessene Direktstrahlung ist mit Stundenund gleitenden Wochenmittelwerten in Abb. 192 dargestellt. Für den Messzeitraum im Jahr 2016 resultiert eine Strahlungssumme von 727,32 kWh/m². Im Jahr 2017 beträgt diese 651,22 kWh/m². Für den gesamten Zeitraum der Messung ergibt sich somit ein durchschnittlicher Momentanwert von 80,22 W/m². Der Maximalwert wurde mit 908,17 W/m² am 09.06.2016 um 12:00 Uhr erreicht.



Die Differenz der Messwerte von Global- und Direktstrahlung ist in Abb. 193 aufgetragen. Es ergibt sich damit die Diffusstrahlung, die für den Messzeitraum im Jahr 2016 eine Strahlungssumme von 383,74 kWh/m² und im Jahr 2017 von 392,32 kWh/m² aufweist. Über den gesamten Zeitraum der Messung konnte ein gemittelter Momentanwert von 45,16 W/m² bestimmt werden. Der Maximalwert wurde am 08.06.2017 um 13:00 Uhr mit 371,83 W/m² erreicht.



Abb. 193 - Stundenmittel- und gleitende Wochenmittelwerte für die Diffusstrahlung, A1

In den Abb. 194 und Abb. 195 ist die Richtungsverteilung der am Versuchsstandort gemessenen Sonnenstrahlung für die Jahre 2016 und 2017 jeweils als Strahlungsrose dargestellt. Diese zeigt die Jahressummen der Globalstrahlung für unterschiedlich geneigte und ausgerichtete Empfangsflächen an. Die Ausrichtung dieser Empfangsflächen resultiert aus den in der Strahlungsrose angegebenen Himmelsrichtungen. Deren Neigung ergibt sich über die einzelnen Ringe und den dazugehörigen Winkelangaben. Das Zentrum der Strahlungsrose bezieht sich somit auf eine Empfangsfläche mit der Neigung von 0°, wohingegen der äußerste Ring eine um 90° geneigte Empfangsfläche darstellt. Für vertikale Flächen ist zudem die Jahressumme der Globalstrahlung im Bereich der Haupt- und Nebenhimmelsrichtungen als umlaufende Beschriftung angegeben.⁶⁷



strahlung im Jahr 2016, A9

Abb. 195 - Strahlungsrose für die Summen der Globalstrahlung im Jahr 2017, A9

Die Strahlungsrosen beziehen sich jeweils auf ein vollständiges Jahr. Der nicht erfasste Zeitraum vor dem 16.01.2016 beinhaltet daher Kompensationsdaten (siehe Abschnitt 3.5.2 Datenkompensation). Aus diesem Grund ergibt sich für horizontale Empfangsflächen im Jahr 2016 eine etwas höhere Jahressumme der Globalstrahlung, als aus der Erläuterung zu Abb. 191 hervorgeht. Für das Jahr 2017 stimmen die Angaben überein, da dieses messtechnisch vollständig erfasst wurde. Den beiden Strahlungsrosen kann zudem entnommen werden, dass für vertikale Empfangsflächen die größte Jahressumme der Globalstrahlung bei einer Ausrichtung nach Süden vorliegt. Im Jahr 2016 ist diese mit 928 kWh/m² etwas höher, als im Jahr 2017 mit 842 kWh/m². Die am Versuchsstandort nach Westen und Osten ausgerichteten vertikalen Empfangsflächen weisen deutlich niedrigere, aber sehr ähnliche Werte für die Jahressumme der Globalstrahlung auf. Für das Jahr 2016 und 2017 beträgt diese bei nach Westen ausgerichteten Flächen. Der Minimalwert der aufsummierten Globalstrahlung ergibt sich bei einer nach Norden ausgerichteten Fläche mit einer Neigung von über 82°. Der Maximalwert resultiert hingegen bei Flächen, die nach Süden ausgerichtet sind und eine Neigung zwischen 22° und 38 ° aufweisen (siehe Abb. 194 und Abb. 195).

⁶⁷ Online-Hilfe zur Software WUFI Pro 6.0, Thema 72

In Abb. 196 sind die auf eine horizontale Fläche bezogenen Stundensummen der Niederschlagshöhe einschließlich des gleitenden Wochenmittels dargestellt. Die einzelnen Messwerte enthalten neben flüssigen Niederschlägen, auch feste Niederschläge, die auf eine Wasserhöhe im geschmolzenen Zustand umgerechnet wurden. Für den Messzeitraum im Jahr 2016 resultiert damit eine kumulierte Niederschlagshöhe von 487,08 mm. Im vollständig aufgezeichneten Jahr 2017 ist diese erheblich größer und beträgt 869,18 mm. Der maximale Stundenwert der Niederschlagshöhe konnte am 05.10.2017 um 14:00 Uhr mit 12,87 mm gemessen werden.



Abb. 196 - Stundensummen und gleitende Wochenmittelwerte für die Niederschlagshöhe, A1

Um die am Versuchsstandort aufgezeichneten Niederschlagshöhen für die Jahre 2016 und 2017 besser zuordnen zu können, werden mit Abb. 197 die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagshöhen von Mecklenburg-Vorpommern dargestellt. Anhand des langjährigen Mittels von 610,23 mm (Zeitraum 1935 bis 2017) wird deutlich, dass das Jahr 2016 mit 517,90 mm eher niederschlagsarm und das Jahr 2017 mit 801,50 mm sehr niederschlagsreich für diese Region war.



Auf Grundlage der am Versuchsstandort gemessenen Windrichtungen, Windgeschwindigkeiten und Niederschlagshöhen (siehe Abb. 184, Abb. 186 und Abb. 196) wurden die resultierenden Mengen an Schlagregen für die Jahre 2016 und 2017 berechnet. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Form einer Schlagregenrose, aus der die jährliche Schlagregensumme für freistehende und senkrechte Empfangsflächen in Abhängigkeit von der Ausrichtung hervorgeht (siehe Abb. 198 und Abb. 199). Die Berechnung erfolgte nach Gl. 4 mit den Schlagregenkoeffizienten R₁ von 0 s/m (bei senkrechten Empfangsflächen) und R₂ von 0,2 s/m (bei exponierten Empfangsflächen).⁶⁸





Abb. 198 - Schlagregenrose für die Schlagregensumme auf vertikale Empfangsflächen im Jahr 2016, A9

Abb. 199 - Schlagregenrose für die Schlagregensumme auf vertikale Empfangsflächen im Jahr 2017, A9

Zu beachten ist bei den dargestellten Schlagregenrosen, dass diese nicht die Richtungsverteilung des Schlagregens darstellen, sondern die Schlagregenbelastung auf unterschiedlich ausgerichtete und senkrechte Empfangsflächen. Weiterhin beziehen sich diese auf ein ganzes Jahr, sodass für den Zeitraum vor dem 16.01.2016 Kompensationsdaten einer anderen Wetterstation verwendet wurden (siehe Abschnitt 3.5.2 Datenkompensation). Wie bereits aus Abb. 185 hervorgeht, zeigt sich auch an den Schlagregenrosen, dass in beiden Jahren die größte Schlagregenbelastung auf vertikale Bauteile mit einer Süd-West-Ausrichtung einwirkt. So beläuft sich hier die Summe der Schlagregenbelastung im Jahr 2016 auf 100 mm und im Jahr 2017 auf 190 mm. Sehr geringe Feuchtigkeitseinwirkungen durch Schlagregen zeigen Empfangsflächen, die nach Norden ausgerichtet sind. Die Summe der Schlagregenbelastung betrug hier im Jahr 2016 lediglich 14 mm und im Folgejahr 34 mm.⁶⁹

Ergänzend zu den grafischen Darstellungen der am Versuchsstandort aufgezeichneten Wetterdaten (siehe Abb. 184 bis Abb. 199), sind in Tab. 58 und Tab. 59 die Monatsmittelwerte für ausgewählte Messgrößen tabellarisch zusammengefasst. Darin enthalten sind auch die Monatssummen für die Niederschlagshöhe. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass sich die angegebenen Werte für den Monat Januar 2016 ausschließlich auf den Zeitraum vom 16.01.2016 bis 31.01.2016 beziehen.

⁶⁸ Online-Hilfe zur Software WUFI Pro 6.0, Thema 65 und 72

⁶⁹ Wie Fußnote 68.

Messgröße	Einheit	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
Windgeschwindigkeit	[m/s]	1,33	1,49	1,15	1,48	1,61	1,16
Lufttemperatur	[°C]	2,28	4,32	5,17	8,92	15,41	18,65
Rel. Luftfeuchtigkeit	[%]	84,10	80,79	79,11	68,01	66,32	68,88
Abs. Luftfeuchtigkeit	[g/m³]	4,98	5,27	5,40	5,88	8,58	10,80
Luftdruck	[mbar]	1016,52	1006,95	1013,40	1010,47	1013,67	1012,35
Globalstrahlung	[W/m ²]	29,53	53,74	95,40	179,43	263,33	257,60
Niederschlagshöhe	[mm]	21,80	46,60	23,60	24,97	21,90	52,31
Messgröße	Einheit	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Windgeschwindigkeit	[m/s]	1,07	1,01	0,90	1,16	1,19	1,29
Lufttemperatur	[°C]	19,17	18,27	17,58	9,36	4,56	4,60
Rel. Luftfeuchtigkeit	[%]	70,95	72,20	71,36	86,10	85,18	87,06
Abs. Luftfeuchtigkeit	[g/m³]	11,42	11,04	10,50	7,76	5,75	5,85
Luftdruck	[mbar]	1014,09	1016,46	1017,55	1020,98	1013,70	1024,25
Globalstrahlung	[W/m ²]	209,22	188,89	156,73	46,61	34,12	16,83
Mindau alda ada ita							

Tab. 58 - Mittelwerte und Summenwerte (nur Niederschlagshöhe) für das Außenklima im Jahr 2016, A1

Tab. 59 - Mittelwerte und Summenwerte (nur Niederschlagshöhe) für das Außenklima im Jahr 2017, A1

Messgröße	Einheit	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
Windgeschwindigkeit	[m/s]	1,15	1,66	1,28	1,54	1,19	1,21
Lufttemperatur	[°C]	0,52	2,50	7,06	8,04	14,23	17,45
Rel. Luftfeuchtigkeit	[%]	85,82	81,07	76,48	74,70	72,88	74,04
Abs. Luftfeuchtigkeit	[g/m³]	4,36	4,79	5,93	6,19	8,88	10,91
Luftdruck	[mbar]	1020,01	1016,15	1014,08	1016,09	1016,82	1011,51
Globalstrahlung	[W/m ²]	27,03	46,17	104,65	156,73	230,47	237,62
Niederschlagshöhe	[mm]	71,17	53,07	50,68	73,71	84,17	101,16
Messgröße	Einheit	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Windgeschwindigkeit	[m/s]	0,94	1,24	1,06	1,17	1,28	1,51
Lufttemperatur	[°C]	17,68	18,51	14,33	12,03	6,67	4,32
Rel. Luftfeuchtigkeit	[%]	77,78	73,41	80,55	85,08	87,25	86,48
Abs. Luftfeuchtigkeit	[g/m³]	11,58	11,40	9,84	9,17	6,68	5,69
Luftdruck	[mbar]	1012,25	1015,31	1013,21	1012,83	1010,59	1007,92
Globalstrahlung	[W/m ²]	209,11	194,47	119,07	58,46	25,37	15,39
Niederschlagshöhe	[mm]	106,37	57,25	41,28	118,13	69,72	42,47

3.5.2 Datenkompensation

Im Verlauf der Aufzeichnung des Außenklimas wurden einzelne Messgrößen zweitweise fehlerhaft von dem meteorologischen Messsystem am Versuchsstandort erfasst. In Tab. 60 sind die betroffenen Zeiträume und Messgrößen einschließlich der Quellen der Kompensationsdaten zusammengefasst. Bei den Kompensationsdaten handelt es sich um Messdaten, die von einer in unmittelbarer Nähe zum Versuchsstandort gelegenen Wetterstation stammen und anstelle der fehlerhaft gemessenen Daten zur Auswertung des Außenklimas herangezogen wurden.

Nr.	Beginn	Ende	Messgröße	Kompensationsdaten
1	16.01.2016, 00:00 Uhr	05.04.2016, 14:10 Uhr	Windrichtung Niederschlagshöhe	DLR / GFZ
2	06.04.2016, 10:40 Uhr	22.04.2016, 07:40 Uhr	Niederschlagshöhe	DLR / GFZ

Tab. 60 - Fehlerhafte Aufzeichnung von Messgrößen und Kompensationsdaten, T1

Neben der temporär fehlerhaften Aufzeichnung einzelner Messgrößen kam es aufgrund von Stromausfällen, Wartungsarbeiten oder sonstigen Ereignissen auch zu Ausfällen einer oder beider Komponenten des meteorologischen Messsystems. Eine Dokumentation dieser Messausfälle und der Quellen der verwendeten Kompensationsdaten kann Tab. 61 entnommen werden.

Tab. 61 - Ausfälle bei der Aufzeichnung von Messgrößen und Kompensationsdaten, T1

Nr.	Beginn	Ende	Messgröße	Kompensationsdaten
1	05.04.2016, 14:20 Uhr	06.04.2016, 10:30 Uhr		DLR / GFZ
2	22.04.2016, 07:50 Uhr	22.04.2016, 09:40 Uhr		DLR / GFZ
3	03.05.2016, 20:00 Uhr	07.05.2016, 12:40 Uhr	Windrichtung Windgeschwindigkeit	DLR / GFZ
4	15.11.2016, 11:00 Uhr	16.11.2016, 10:10 Uhr	Lufttemperatur Relative Luftfeuchtigkeit	DLR / GFZ
5	26.11.2016, 11:10 Uhr	26.11.2016, 13:50 Uhr	Luftdruck Niederschlagshöhe	DLR / GFZ
6	03.08.2017, 14:40 Uhr	07.08.2017, 10:00 Uhr		DWD / Interpolation
7	23.08.2017, 08:40 Uhr	23.08.2017, 10:40 Uhr		DWD / Interpolation
/	23.08.2017, 08:40 Uhr	23.08.2017, 10:40 Uhr	Solarstrahlung (global, direkt, diffus)	Interpolation

Die vor dem 16.01.2016 noch nicht aufgezeichneten, aber benötigten Messgrößen sind in Tab. 62 mit den Quellen der Kompensationsdaten zusammengestellt. Diese Daten wurden ausschießlich für die mit der Software WUFI Pro 6.0 generierten Strahlungs- und Schlagregenrosen herangezogen. Softwarebedingt konnten dabei nur 365 Tage für ein Jahr berücksichtigt werden. Da das Jahr 2016 ein Schaltjahr war, kamen lediglich die Kompensationsdaten vom 02.01.2016 bis zum 15.01.2016 für die Erstellung der Strahlungs- und Schlagregenrosen zur Anwendung.

Nr.	Beginn	Ende	Messgröße	Kompensationsdaten
1	02.01.2016, 00:00 Uhr	15.01.2016, 23:50 Uhr	Windrichtung Windgeschwindigkeit Niederschlagshöhe	DLR / GFZ
1	02.01.2016, 00:00 Uhr	15.01.2016, 23:50 Uhr	Solarstrahlung (global, direkt, diffus)	Eigene Messdaten aus dem Jahr 2017

Tab. 62 - Benötigte Messgrößen für den Monat Januar 2016 und Kompensationsdaten, T1

Bei den in Tab. 60 bis Tab. 62 genannten Quellen für die Kompensationsdaten handelt es sich um das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und um den Deutschen Wetterdienst (DWD). Von dem DLR wird gemeinsam mit dem Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) im Umfeld des Versuchsstandorts (siehe Abb. 17 und Abb. 18) ein automatisches agrarmeteorologisches Messnetz betrieben. Die mit 3,14 km am dichtesten am Versuchsstandort in Loitz gelegene Station dieses Wettermessnetzes befindet sich in der Nähe von Zeitlow auf einer Höhe von ca. 13 m über Normalhöhennull (siehe Abb. 200). Der Aufbau einer solchen agrarmeteorologischen Station ist in Abb. 201 mit den Montagehöhen der Messwertgeber, jeweils bezogen auf die Geländeoberkante, exemplarisch dargestellt. Alle fehlerhaft aufgzeichneten Messgrößen (siehe Tab. 60) und alle Messausfälle im Jahr 2016 (siehe Tab. 61) konnten mit Hilfe der Wetterdaten der Messstation Zeitlow kompensiert werden.



Abb. 200 - Lage der DLR / GFZ Wetterstation Zeitlow und Entfernung zur Wetterstation am Versuchsstandort, A10



Abb. 201 - Aufbau einer vom DLR und GFZ betriebenen agrarmeteorologischen Messstation bei Heydenhof, A11

Die ebenfalls zur Kompensation von Messausfällen herangezogenen Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (siehe Tab. 61) stammen von der Wetterstation Greifswald (siehe Abb. 20). Diese ist Bestandteil des hauptamtlichen DWD-Stationsnetzes und weist eine Entfernung von 21,8 km zum Versuchsstandort auf. Die Höhenlage der Station beträgt 2 m über Normalhöhennull. Mit Hilfe der von dieser Wetterstation stammenden Daten konnten die Messausfälle im Jahr 2017 (siehe Tab. 61) nahezu vollständig kompensiert werden. Lediglich die Daten für den Luftdruck und die Solarstrahlung (Global-, Direkt- und Diffusstrahlung) waren nicht verfügbar und mussten deshalb anhand von Bestandsdaten linear interpoliert werden.

3.6 Messung - Stromverbrauch

3.6.1 Bilanzierung

Die Bilanzierung der Energieverbräuche für die Konditionierung des Innenraumklimas auf 20 °C erfolgt bei allen Versuchsgebäuden sowohl heizphasen- als auch monatsbezogen. Einen Überblick zu den Heizphasen, die für den Zeitraum der Versuchsdurchführung (16.01.2016 bis 01.01.2018) definiert wurden, gibt Tab. 63. Die erste Heizphase ist verkürzt, da die Verbrauchswerte für den Monat Januar 2016 nicht vollständig vorliegen.

Jahr	Heizphase	Zeitraum
2016	1	01.02.2016 bis 30.04.2016
2010	2	01.10.2016 bis 31.12.2016
2017	3	01.01.2017 bis 30.04.2017
2017	4	01.10.2017 bis 31.12.2017

Für die 4 definierten Heizphasen und deren Monate wird der Energieverbrauch zur Beheizung der Versuchsgebäude anhand von gemessenen Verbrauchswerten und berechneten Korrekturwerten bestimmt. Bei den gemessenen Werten handelt es sich um den Stromverbrauch der Heizungsanlage (Elektroradiatoren) und um den Stromverbrauch der Luftentfeuchter, die je Versuchsgebäude in der Summe die zugeführte Wärmemenge beschreiben. Der Stromverbrauch der Luftentfeuchter wird in die Bilanzierung einbezogen, da sich die Geräte innerhalb der thermischen Gebäudehülle befinden und im laufenden Betrieb Abwärme erzeugen, die nicht mehr durch die Heizungsanlage zuzuführen ist. Die Nutzung des Stromverbrauchs der Geräte ist in diesem Zusammenhang möglich, da die dem Innenraum zugeführte Abwärme im Wesentlichen der aufgenommenen elektrischen Leistung des Geräte-Kompressors entspricht (siehe Gl. 7). Die Teil-Stromverbrauch des Gerätekompressors den Gesamtverbrauchs bilden, werden dabei ebenfalls als Abwärme angesetzt. Eine Zusammenstellung der Verbrauchsdaten befindet sich in Abschnitt 3.6.2 Luftentfeuchtung.

$\dot{Q}_{Cond} = \dot{Q}_{Evap} + P_{Comp}$				
\dot{Q}_{Cond}	Wärmeleistung des Kondensators	[W]		
\dot{Q}_{Evap}	Wärmeleistung des Verdampfers	[W]		
\dot{Q}_{Comp}	Elektrische Leistung des Kompressors	[W]		

Da die heizphasen- und monatsbezogenen Stromverbräuche der Versuchsgebäude aus geregelter Beheizung und aktiver Luftentfeuchtung verschiedenen Innenraumtemperaturen zuzuordnen sind (siehe Tab. 19 und Tab. 21), können diese nicht direkt miteinander verglichen werden. Aus diesem Grund erfolgt bei allen Versuchsgebäuden eine Korrektur der Innenraumtemperatur auf 20 °C und die Berechnung des Strombedarfs der Heizung, der zum Erreichen dieser Temperatur notwendig wäre (siehe Abschnitt 3.6.3 Temperaturkorrektur). Unberücksichtigt bleiben bei der Bilanzierung hingegen Latentwärmeeffekte, die im Innenraum der Versuchsgebäude stattfinden, da sich diese in den Heizphasen weitestgehend ausgleichen und messtechnisch nicht genau quantifizierbar sind.

3.6.2 Luftentfeuchtung

Die monatlichen Stromverbräuche der Luftentfeuchter in den Versuchsgebäuden 1 bis 5 sind für die zweite bis vierte Heizphase in Abb. 202 dargestellt. Die erste Heizphase entfällt, weil in dieser die Entfeuchtung der Raumluft ausschließlich passiv über Salze erfolgte (siehe Tab. 22).



Abb. 202 - Monatlicher Stromverbrauch der aktiven Luftentfeuchtung, A1

Korrelierend zu den monatlichen Entfeuchtungsmengen (siehe Abb. 124 und Tab. 25) konnten beim Versuchsgebäude 5 die höchsten und beim Versuchsgebäude 4 die niedrigsten Monatswerte für den Stromverbrauch der Luftentfeuchter erfasst werden (siehe Abb. 202 und Tab. 64). Die Verbrauchswerte der Versuchsgebäude 1, 2 und 3 liegen in der Heizphase 2 noch dicht zusammen, jedoch fächern sich diese im weiteren Versuchsverlauf auf. Insbesondere in den kälteren Monaten der dritten und vierten Heizphase zeigt sich diese Entwicklung. So weist das Versuchsgebäude 2 im Dezember 2017 einen 31,09 % niedrigeren Stromverbrauch des Luftentfeuchters auf, als das Versuchsgebäude 1 (siehe Tab. 65). Diese Differenz lässt sich mit einem weiter fortgeschrittenen Trocknungsprozess der hydrophobierten Außenwände erklären. Die noch niedrigeren Verbrauchswerte des Luftentfeuchters in Versuchsgebäude 4 sind hingegen auf die kapillaraktive und sehr sorptionsfähige Innendämmung aus Calciumsilikatplatten zurückzuführen.

suchs- äude	Oktober 2016	November 2016	Dezember 2016	Heizphase 2
Vers geb	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
1	165,94	137,80	136,10	439,84
2	168,74	138,58	132,53	439,84
3	163,58	139,75	139,94	443,27
4	150,86	60,64	23,40	234,89
5	183,35	167,29	158,76	509,39

Tab. 64 - Monatlicher Stromverbrauch der aktiven Luftentfeuchtung (2. Heizphase 2016), T1

suchs- äude	Januar 2017	Februar	2017	März 201	.7	April 2017	Heizphase 3
Vers geb	[kWh]	[kWł	1]	[kWh]		[kWh]	[kWh]
1	132,62	122,1	.1	143,17		140,20	538,10
2	123,73	115,3	81	144,51		141,22	524,77
3	137,00	125,5	53	145,50		142,59	550,61
4	8,09	31,1	2	92,82		114,90	246,94
5	150,96	135,3	81	156,16		152,92	595,35
suchs- äude	Oktober 2017	Novem		oer 2017	Ι	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[kWh]		[kV	Vh]		[kWh]	[kWh]
1	141,62		130,03			130,62	402,28
2	142,74		114	114,50		90,01	347,24
3	143,36		134	1,72	137,19		415,27
4	107,65		35	,46		0,00	143,12
_							

Tab. 65 - Monatlicher Stromverbrauch der aktiven Luftentfeuchtung (3. und 4. Heizphase 2017), T1

Der kumulierte Stromverbrauch für die aktive Luftentfeuchtung in den Versuchsgebäuden 1 bis 5 ist in Abb. 203 dargestellt. Wie bei den kumulierten Entfeuchtungsmengen (siehe Abb. 125) zeichnet sich das Versuchsgebäude 5 durch die Maximal- und das Versuchsgebäude 4 durch die Minimalwerte ab. Die Kurvenverläufe der Versuchsgebäude 1, 2 und 3 befinden sich dazwischen und liegen über die zweite und dritte Heizphase sehr dicht zusammen. In der Heizphase 4 kommt es hingegen zu einem Abfallen der Kurvenverläufe von Versuchsgebäude 1 und 2, was sich bereits anhand der Monatsverbräuche für November und Dezember 2017 angedeutet hat (siehe Abb. 202).



3.6.3 Temperaturkorrektur

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Stromverbräuche der Versuchsgebäude erfolgte eine Korrektur der Innenraumtemperatur auf 20 °C und die Berechnung des zusätzlichen Strombedarfs, um diese Temperatur durch Beheizen zu erreichen. Dieser Berechnungsvorgang wird im Rahmen des Berichts als Temperaturkorrektur bezeichnet. Dazu wurden zuerst für alle Versuchsgebäude und Heizphasen Regressionskurven gebildet (siehe Abb. 204 bis Abb. 207). Die Regressionskurven leiten sich jeweils aus einer Datenwolke ab, deren Datenpunkte durch einen Abszissen- und durch einen Ordinatenwert gekennzeichnet sind. Der Abszissenwert beinhaltet die Differenz zwischen dem Tagesmittel der Innenraumtemperatur der Versuchsgebäude und der Außentemperatur. Der Ordinatenwert enthält hingegen den jeweiligen Tagesstromverbrauch der Versuchsgebäude. Für die erste Heizphase lagen 90 Datenpunkte vor (siehe Abb. 204).



Abb. 204 - Regressionskurven der 5 Versuchsgebäude für die 1. Heizphase 2016, A1

Im Rahmen einer Regressionsanalyse konnte mit Hilfe einer exponentiellen Regression bei allen Versuchsgebäuden das höchste Bestimmtheitsmaß erzielt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der ersten Heizphase der jeweilige Ordinaten- bzw. der Tagesverbrauchswert nur aus dem Stromverbrauch durch Beheizung gebildet wird. In den folgenden Heizphasen 2, 3 und 4 ergeben sich die Ordinatenwerte hingegen aus der Summe des Tagesstromverbrauchs durch Beheizung und durch aktive Luftentfeuchtung. Mit den gebildeten Regressionskurven kann nun für eine beliebige Differenz zwischen Innenraum- und Außentemperatur, die im Wertebereich der Datenpunkte liegt, der Tagesverbrauch für die Versuchsgebäude berechnet werden. In Rahmen der durchgeführten Temperaturkorrektur wurde diese Temperaturdifferenz monatsweise sowohl mit der Ist- als auch mit der Soll-Innenraumtemperatur gebildet. Mit beiden Werten der Temperaturdifferenz erfolgte die Berechnung des jeweiligen Tagesverbrauchs der Versuchsgebäude. Die sich daraus wiederum ableitende Tagesverbrauchs-Differenz ergibt durch Multiplikation mit der Tagesanzahl pro Monat den zusätzlichen Stromverbrauch, um durch Beheizung die gewünschte Innenraumtemperatur von 20,0 °C zu erreichen. Die zusätzlichen Stromverbräuche, die mit Hilfe der Regressionskurven aus Abb. 204 für die erste Heizphase bestimmt wurden, können Tab. 66 entnommen werden.

uchs- äude	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1
Vers geb	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
1	71,72	65,08	35,82	172,61
2	59,87	51,22	21,79	132,88
3	66,81	61,06	36,51	164,38
4	1,64	0,05	-1,50	0,19
5	112,78	90,59	47,92	251,29

Tab. 66 - Zusätzlicher Strombedarf durch Temperaturkorrektur in der 1. Heizphase 2016, T1

Für die zweite Heizphase sind die Regressionskurven der 5 Versuchsgebäude in Abb. 205 dargestellt. Es wird deutlich, dass das Bestimmtheitsmaß bei den Versuchsgebäuden 1, 2, 3 und 5 zunimmt. Nur das Versuchsgebäude 4 ist durch ein geringeres Bestimmtheitsmaß als in der ersten Heizphase gekennzeichnet. Zurückzuführen ist diese Abnahme vor allem auf die aktive Luftentfeuchtung, die unabhängig von der Differenz zwischen Innenraum- und Außentemperatur Abwärme generiert und dem Versuchsgebäude zuführt. Aufgrund der besseren Wärmedämmeigenschaften der Außenwände tritt bei höheren Außentemperaturen, wie z.B. im Oktober, die Situation ein, dass die Wärmezufuhr des Luftentfeuchters ausreichend ist, um die Soll-Innenraumtemperatur von 20 °C zu erreichen oder gar zu überschreiten. Solche Tage an denen der Stromverbrauch für die Beheizung 0 kWh beträgt, wurden aus der Datenwolke entfernt, da kein Zusammenhang zwischen dem Tagesverbrauchswert für die Beheizung einschließlich der Luftentfeuchtung und der Temperaturdifferenz besteht. Für Tage, bei denen diese Situation nicht eintritt, ist hingegen zu beachten, dass je größer der Verbrauchsanteil durch aktive Luftentfeuchtung an dem gesamten Tagesstromverbrauch ist, desto kleiner wird der Einfluss der Temperaturdifferenz auf den Tagesstromverbrauch.



Abb. 205 - Regressionskurven der 5 Versuchsgebäude für die 2. Heizphase 2016, A1

Der zusätzliche Strombedarf, der mit den jeweiligen Regressionskurven aus Abb. 205 für die zweite Heizphase berechnet wurde, kann Tab. 67 entnommen werden.

suchs- äude	Oktober 2016	November 2016	Dezember 2016	Heizphase 2
Vers geb	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
1	33,81	53,88	57,54	145,23
2	16,97	39,47	43,30	99,74
3	39,32	52,50	58,01	149,83
4	-21,74	2,11	2,40	-17,22
5	41,19	64,16	68,72	174,07

Tab. 67 - Zusätzlicher Strombedarf durch Temperaturkorrektur in der 2. Heizphase 2016, T1

Die Regressionskurven für die dritte Heizphase sind in Abb. 206 zusammengestellt. Im Vergleich zur zweiten Heizphase zeigt sich beim Versuchsgebäude 1, 2, 3 und 4 ein größeres Bestimmtheitsmaß. Beim Versuchsgebäude 5 ist dieses hingegen kleiner. Als Grund für die gegensätzliche Entwicklung kann das hygrothermische Einschwingen der Außenwände genannt werden. Versuchsgebäude mit einem höheren Bestimmtheitsmaß als in der zweiten Heizphase, haben sich dem hygrothermisch eingependelten Zustand stärker angenähert. Zudem sind die Außenwände dieser Versuchsgebäude durch geringere Schwankungen in der Feuchtigkeitsbelastung gekennzeichnet als die Außenwände des Versuchsgebäudes 5. Diese wurden bis zum 31. Oktober 2016 aktiv beregnet. Es ist daher zu erwarten, dass deren Feuchtigkeitsbelastung in der dritten Heizphase mit einer Trocknungszeit von 4 Monaten einer größeren Veränderung unterlag als in der zweiten Heizphase durch Wetterbedingungen gekennzeichnet, die zumindest auf den schlagregenabgewandten Gebäudeseiten ein schnelleres Trocknen der Außenwände begünstigen dürften. So steigen die Außentemperatur und die solare Strahlung tendenziell an, wohingegen die relative Luftfeuchtigkeit tendenziell abnimmt.



Abb. 206 - Regressionskurven der 5 Versuchsgebäude für die 3. Heizphase 2017, A1

Der mit den jeweiligen Regressionskurven der dritten Heizphase berechnete Strombedarf ist für die Versuchsgebäude 1 bis 5 in Tab. 68 zusammengestellt.



Abb. 207 - Regressionskurven der 5 Versuchsgebäude für die 4. Heizphase 2017, A1

Für die vierte Heizphase sind die Regressionskurven der 5 Versuchsgebäude in Abb. 207 dargestellt. Bei allen Kurven ist das Bestimmtheitsmaß gegenüber der dritten Heizphase nochmals angestiegen. Der Höchstwert resultiert beim Versuchsgebäude 2, dessen hydrophobierte Umfassungswände die kleinsten Schwankungen der Feuchtigkeitsbelastung zeigen (siehe Tab. 32 bis Tab. 34). Der Tiefstwert liegt weiterhin beim Versuchsgebäude 4 vor, bei dem der Tagesstromverbrauch am stärksten durch den Stromverbrauch des Luftentfeuchters beeinflusst wird. Der mit den Regressionskurven aus Abb. 207 berechnete Strombedarf der 5 Versuchsgebäude kann Tab. 68 entnommen werden.

suchs- äude	Januar 2017	ar 2017 Februar 2017		April 2017	Heizphase 3
Vers geb	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
1	73,95	61,93	44,37	30,71	210,96
2	56,82	45,91	28,27	16,20	147,19
3	69,66	57,89	46,05	35,70	209,30
4	4,24	3,50	-1,45	-10,61	-4,32
5	106,15	84,45	53,93	35,85	280,39
suchs- äude	Oktober 2017	Novemb	per 2017	Dezember 2017	Heizphase 4
Vers geb	[kWh]	[kV	Vh]	[kWh]	[kWh]
1	23,74	52	,05	58,93	134,71
2	8,01	36	,76	47,18	91,95
3	33,68	54	,01	59,53	147,22
4	-24,90	1,	35	1,80	-21,76
5	25,64	72	,32	85,66	183,62

Tab. 68 - Zusätzlicher Strombedarf durch Temperaturkorrektur in der 3. und 4. Heizphase 2017, T1

3.6.4 Heizphasenverbräuche

In Abb. 208 ist der nach Tab. 69 berechnete Gesamt-Stromverbrauch der 5 Versuchsgebäude für die erste und zweite Heizphase dargestellt. In der ersten Heizphase setzt sich dieser lediglich aus dem gemessenen Stromverbrach für die Beheizung und dem berechneten zusätzlichen Strombedarf für die Korrektur der Innenraumtemperatur zusammen. Mit dem Beginn der zweiten Heizphase wird in dem Gesamt-Stromverbrauch auch der Stromverbrauch für die aktive Luftentfeuchtung einbezogen.



Abb. 208 - Gesamt-Stromverbräuche der Versuchsgebäude 1 bis 5 für die Heizphase 1 und 2, A1

Für die erste Heizphase zeigt sich, dass die Teil-Stromverbräuche für die Beheizung der baugleichen Versuchsgebäude 1 und 5 sehr dicht zusammenliegen (siehe Tab. 69). Werden aber zugleich deren Innenraumtemperaturen betrachtet (siehe Abb. 120), dann verdeutlicht sich ein klarer Versatz zur Soll-Temperatur (20,0 °C) und damit auch die Relevanz einer Temperaturkorrektur. Wird diese in den Gesamt-Stromverbrauch einbezogen, so ist das Versuchsgebäude 5 durch einen 3,20 % höheren Verbrauch gekennzeichnet. Als mögliche Ursache für den Mehrverbrauch kann der höhere n_{50} -Wert von Versuchsgebäude 5 genannt werden (siehe Tab. 5). Denkbar sind auch produktionsbedingte Unterschiede in den Eigenschaften der Materialien der thermischen Gebäudehülle (z.B. der Ziegel).

Der Gesamt-Stromverbrauch von Versuchsgebäude 2, der im Vergleich zum Versuchsgebäude 1 um 2,54 % größer ausfällt, ist jedoch nicht auf einen höheren n_{50} -Wert (siehe Tab. 5), sondern auf die Hydrophobierung zurückzuführen. Diese erhöht den Dampfdiffusionswiderstand des Mauerwerks (siehe Tab. 77) und verlangsamt somit das Abführen der darin noch enthaltenen Baufeuchtigkeit. Dies bestätigt sich anhand von Abb. 129. Hier wird sichtbar, dass die hydrophobierte Außenwand ein langsameres Trocknungsverhalten zeigt, als die unbehandelte Außenwand von Versuchsgebäude 1. Damit ist für die erste Heizphase eine höhere Feuchtigkeitsbelastung der Umfassungswände von Versuchsgebäude 2 zu erwarten, die sich sowohl in einem höheren U-Wert (siehe Abb. 140) als auch in einem höheren Gesamt-Stromverbrauch (siehe Abb. 208) widerspiegelt.

Die niedrigeren Gesamt-Stromverbräuche der Versuchsgebäude 3 und 4 sind hingegen auf bessere n_{50} -Werte (siehe Tab. 5) und auf die zusätzliche Materialschicht der Außenwände zurückzuführen.

Infolge der aktiven Beregnung des Versuchsgebäudes 5 vom 02. Mai 2016 bis 31. Oktober 2016 stellt sich in der zweiten Heizphase bei diesem ein deutlich höherer Gesamt-Stromverbrauch ein, als beim Versuchsgebäude 1. Der Mehrverbrauch beträgt hier 305,33 kWh bzw. 13,02 % (bezogen auf den Grundwert von 2.344,90 kWh).

Weiterhin zeigt sich beim Vergleich der Gesamt-Stromverbräuche von Versuchsgebäude 1 und 2, dass sich diese im Verlauf der zweiten Heizphase auf einen Unterschied von 16,25 kWh angenähert haben. Das entspricht einem Mehrverbrauch von Versuchsgebäude 2 um 0,69 % (bezogen auf den Grundwert von 2.344,90 kWh). Zurückzuführen ist diese Entwicklung insbesondere auf die aktive Luftentfeuchtung, die es ermöglicht, dass die Außenwände der Versuchsgebäude nun auch verstärkt nach innen trocknen können. Die damit verbundene Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften verdeutlicht sich beim Vergleich der gemessenen Wärmestromdichte und dem daraus berechneten instationären U-Wert der unbehandelten und der hydrophobierten Außenwand West (siehe Tab. 39 und Abb. 140). Gegenüber der ersten Heizphase liegt nun bei der hydrophobierten Außenwand ein niedrigerer instationärer U-Wert vor. Dennoch muss aufgrund des vorhandenen Mehrverbrauchs von Versuchsgebäude 2 davon ausgegangen werden, dass dessen Außenwände im Durchschnitt noch immer einen schlechteren instationären U-Wert aufweisen, als beim Versuchsgebäude 1.

Beim Versuchsgebäude 3 zeigt sich eine ähnliche Situation. Hier liegt in der zweiten Heizphase im Vergleich zum Versuchsgebäude 1 ein 11,47 % höherer instationärer U-Wert bei der Außenwand West vor (siehe Abb. 140). Zugleich ist der Gesamt-Stromverbrauch um 136,65 kWh bzw. 5,83 % niedriger als beim Versuchsgebäude 1 (siehe Abb. 208 und Tab. 69). Als mögliche Ursache für diese gegensätzlichen Messdaten kann der unterschiedliche n₅₀-Wert der Versuchsgebäude (siehe Tab. 5) und der über alle Außenwände gemittelte instationäre U-Wert genannt werden. So liegt es nahe, dass der schlechtere U-Wert der westlichen Außenwand von Versuchsgebäude 3 durch die U-Werte weniger feuchtigkeitsbelasteter Außenwände kompensiert wird. Über alle Außenwände gemittelt kann entgegen der Ergebnisse nach Abb. 140 ein besserer instationärer U-Wert resultieren als beim Versuchsgebäude 1, der dann wiederum zu einem niedrigeren Gesamt-Stromverbrauch führt.

	0		. ,		
Verbräuche in der Heizphase 1	Versuchs- gebäude 1	Versuchs- gebäude 2	Versuchs- gebäude 3	Versuchs- gebäude 4	Versuchs- gebäude 5
петерназе т	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Heizung	2.171,24	2.270,51	2.004,48	774,67	2.167,54
Luftentfeuchtung	-	-	-	-	-
Temperaturkorrektur	172,61	132,88	164,38	0,19	251,29
Gesamt-Stromverbrauch bzw. Heizwärmeverbrauch	2.343,85	2.403,39	2.168,86	774,86	2.418,83
Verbräuche in der	Versuchs- gebäude 1	Versuchs- gebäude 2	Versuchs- gebäude 3	Versuchs- gebäude 4	Versuchs- gebäude 5
neizpiiase z	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Heizung	1.759,83	1.821,57	1.615,15	552,57	1.966,77
Luftentfeuchtung	439,84	439,84	443,27	234,89	509,39
Temperaturkorrektur	145,23	99,74	149,83	-17,22	174,07
Gesamt-Stromverbrauch bzw. Heizwärmeverbrauch	2.344,90	2.361,15	2.208,25	770,24	2.650,23

Tab. 69 - Stromverbräuche der Versuchsgebäude 1 bis 5 für die Heizphase 1 und 2, A1



Abb. 209 - Gesamt-Stromverbräuche der Versuchsgebäude 1 bis 5 für die Heizphase 3 und 4, A1

Die Gesamt-Stromverbräuche der dritten und vierten Heizphase sind für die 5 Versuchsgebäude in Abb. 209 und Tab. 70 dargestellt. Für die dritte Heizphase liegen tendenziell ähnliche Ergebnisse vor, wie für die zweite Heizphase. Anders stellen sich hingegen die Messergebnisse in der vierten Heizphase dar. So zeigt sich beim aktiv beregneten Versuchsgebäude 5 ein Mehrverbrauch von 339,14 kWh bzw. 16,1 % gegenüber dem Versuchsgebäude 1. Unter Berücksichtigung, dass es sich dabei um baugleiche Versuchsgebäude handelt, die sich lediglich in der Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände unterscheiden, zeigt dieser Wert die Relevanz von Feuchtigkeit und Feuchteschutz bei der energetischen Bewertung von Gebäuden. Zudem wird erstmals in der vierten Heizphase beim Versuchsgebäude 2 ein niedrigerer Gesamt-Stromverbrauch erreicht, als beim Versuchsgebäude 1. Die Einsparung beträgt 55,95 kWh bzw. 2,66 % (bezogen auf den Grundwert von 2.106,11 kWh).

Verbräuche in der	Versuchs- gebäude 1	Versuchs- gebäude 2	Versuchs- gebäude 3	Versuchs- gebäude 4	Versuchs- gebäude 5
neizpiiase 5	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Heizung	2.502,01	2.620,10	2.325,07	888,03	2.665,40
Luftentfeuchtung	538,10	524,77	550,61	246,94	595,35
Temperaturkorrektur	210,96	147,19	209,30	-4,32	280,39
Gesamt-Stromverbrauch bzw. Heizwärmeverbrauch	3.251,07	3.292,05	3.084,98	1.130,65	3.541,13
Verbräuche in der	Versuchs- gebäude 1	Versuchs- gebäude 2	Versuchs- gebäude 3	Versuchs- gebäude 4	Versuchs- gebäude 5
neizpiiase 4	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Heizung	1.569,13	1.610,96	1.398,51	568,89	1.757,19
Luftentfeuchtung	402,28	347,24	415,27	143,12	504,44
Temperaturkorrektur	134,71	91,95	147,22	-21,76	183,62
Gesamt-Stromverbrauch bzw. Heizwärmeverbrauch	2.106,11	2.050,16	1.961,00	690,25	2.445,25

Tab. 70 - Stromverbräuche der Versuchsgebäude 1 bis 5 für die Heizphase 3 und 4, A1



Abb. 210 - Abweichungen des Gesamt-Stromverbrauchs gegenüber Versuchsgebäude 1, A1

In Abb. 210 und Tab. 71 sind die Abweichungen des Gesamt-Stromverbrauchs der Versuchsgebäude 2, 3 und 4 gegenüber dem Versuchsgebäude 1 dargestellt. Es zeigt sich im Verlauf der Heizphasen, dass das aktiv beregnete Versuchsgebäude 5 gegenüber dem Versuchsgebäude 1 tendenziell durch eine Steigerung der Abweichungen (relativ und absolut) gekennzeichnet ist. Im Gegensatz dazu kann beim hydrophobierten Versuchsgebäude 2 tendenziell eine Reduktion beider Abweichungen festgestellt werden. Die Versuchsgebäude 3 und 4 zeigen entsprechend Abb. 210 bei den relevanten relativen Abweichungen keine eindeutige Tendenz.

	Heizphase 1	Heizphase 2	Heizphase 3	Heizphase 4	
/ersuch: gebäude	01. Februar bis 30. April 2016	01. Oktober bis 31. Dezember 2016	01. Januar bis 30. April 2017	01. Oktober bis 31. Dezember 2017	
> %	[%]	[%]	[%]	[%]	
2	2,54	0,69	1,26	-2,66	
3	-7,47	-5,83	-5,11	-6,89	
4	-66,94	-67,15	-65,22	-67,23	
5	3,20 13,02		8,92	16,10	
(h _ 1)	Heizphase 1	Heizphase 2	Heizphase 3	Heizphase 4	
ersuchs- gebäude	Heizphase 1 01. Februar bis 30. April 2016	Heizphase 2 01. Oktober bis 31. Dezember 2016	Heizphase 3 01. Januar bis 30. April 2017	Heizphase 4 01. Oktober bis 31. Dezember 2017	
Versuchs- gebäude	Heizphase 1 01. Februar bis 30. April 2016 [kWh/d]	Heizphase 2 01. Oktober bis 31. Dezember 2016 [kWh/d]	Heizphase 3 01. Januar bis 30. April 2017 [kWh/d]	Heizphase 4 01. Oktober bis 31. Dezember 2017 [kWh/d]	
5 Versuchs- gebäude	Heizphase 1 01. Februar bis 30. April 2016 [kWh/d] 0,66	Heizphase 2 01. Oktober bis 31. Dezember 2016 [kWh/d] 0,18	Heizphase 3 01. Januar bis 30. April 2017 [kWh/d] 0,34	Heizphase 4 01. Oktober bis 31. Dezember 2017 [kWh/d] -0,61	
c Versuchs- gebäude	Heizphase 101. Februar bis 30. April 2016[kWh/d]0,66-1,94	Heizphase 2 01. Oktober bis 31. Dezember 2016 [kWh/d] 0,18 -1,49	Heizphase 3 01. Januar bis 30. April 2017 [kWh/d] 0,34 -1,38	Heizphase 4 01. Oktober bis 31. Dezember 2017 [kWh/d] -0,61 -1,58	
 Versuchs- 8 8 8 9 9<th>Heizphase 1 01. Februar bis 30. April 2016 [kWh/d] 0,66 -1,94 -17,43</th><th>Heizphase 2 01. Oktober bis 31. Dezember 2016 [kWh/d] 0,18 -1,49 -17,12</th><th>Heizphase 3 01. Januar bis 30. April 2017 [kWh/d] 0,34 -1,38 -17,67</th><th>Heizphase 4 01. Oktober bis 31. Dezember 2017 [kWh/d] -0,61 -1,58 -15,39</th>	Heizphase 1 01. Februar bis 30. April 2016 [kWh/d] 0,66 -1,94 -17,43	Heizphase 2 01. Oktober bis 31. Dezember 2016 [kWh/d] 0,18 -1,49 -17,12	Heizphase 3 01. Januar bis 30. April 2017 [kWh/d] 0,34 -1,38 -17,67	Heizphase 4 01. Oktober bis 31. Dezember 2017 [kWh/d] -0,61 -1,58 -15,39	

Tab. 71 - Abweichungen des Gesamt-Stromverbrauchs gegenüber Versuchsgebäude 1, T1

3.6.5 Monatsverbräuche



Abb. 211 - Monatliche Gesamt-Stromverbräuche der Versuchsgebäude 1 bis 5 in den Heizphasen 1 und 2, A1

Die Monatsverbräuche der 5 Versuchsgebäude sind für die erste und zweite Heizphase in Abb. 211 und Tab. 72 aufgeführt. Nochmals deutlicher als bei den heizphasenbezogenen Stromverbräuchen (siehe Abb. 208) stellen sich hier die Auswirkungen der aktiven Beregnung von Versuchsgebäude 5 dar. So beträgt dessen Mehrverbrauch gegenüber dem Versuchsgebäude 1 im Oktober 105,41 kWh. Dies entspricht einer Steigerung um 18,01 % (siehe Tab. 73).

suchs- säude	Februar 2016	März 2016	April 2016	Heizphase 1	
Ver gel	[kWh] [kWh]		[kWh]	[kWh]	
1	966,94	867,43	509,48	2.343,85	
2	975,81	891,15	536,43	2.403,39	
3	884,82	807,86	476,18	2.168,86	
4	313,76	287,50	173,60	774,86	
5	996,92	889,04	532,88	2.418,83	
suchs- säude	Oktober 2016	November 2016	Dezember 2016	Heizphase 2	
Ver gel	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
1	585,18	853,17	906,54	2.344,90	
2	582,77	866,80	911,58	2.361,15	
3	539,80	804,37	864,08	2.208,25	
4	171,76	289,86	308,63	770,24	
5	690,59	956,14	1.003,51	2.650,23	

Tab. 72 - Monatliche Gesamt-Stromverbräuche der Versuchsgebäude 1 bis 5 in den Heizphasen 1 und 2, T1



Abb. 212 - Monatliche Abweichungen des Gesamt-Stromverbrauchs gegenüber Versuchsgebäude 1, A1

Die monatlichen Abweichungen des Gesamt-Stromverbrauchs der Versuchsgebäude 2, 3, 4 und 5 gegenüber dem Versuchsgebäude 1 sind in Abb. 212 und Tab. 73 zusammengestellt. Dabei wird vor allem die aktive Beregnung von Versuchsgebäude 5 durch einen Sprung zwischen den prozentualen Abweichungen der Monate April und Oktober 2016 deutlich. Der in der ersten Heizphase zunächst ansteigende Mehrverbrauch von Versuchsgebäude 2 fällt hingegen durch die aktive Entfeuchtung in der zweiten Heizphase ab, sodass im Oktober 2016 erstmals eine Verbrauchseinsparung gegenüber dem Versuchsgebäude 1 eintritt. Bei den Versuchsgebäuden 3 und 4 kann im Vergleich zur ersten Heizphase keine anhaltende Verbesserung der prozentualen Abweichungen festgestellt werden.

suchs- säude	Februar 2016		März	2016	April 2016	
Vers geb	[%]	[kWh/d]	[%]	[kWh/d]	[%]	[kWh/d]
2	0,92	0,31	2,73	0,77	5,29	0,90
3	-8,49	-2,83	-6,87	-1,92	-6,54	-1,11
4	-67,55	-22,52	-66,86	-18,71	-65,93	-11,20
5	3,10	1,03	2,49	0,70	4,59	0,78
suchs- säude	Oktober 2016		November 2016		Dezember 2016	
Ver gel	[%]	[kWh/d]	[%]	[kWh/d]	[%]	[kWh/d]
2	-0,41	-0,08	1,60	0,45	0,56	0,16
3	-7,75	-1,46	-5,72	-1,63	-4,68	-1,37
4	-70,65	-13,34	-66,03	-18,78	-65,96	-19,29
5	18,01	3,40	12,07	3,43	10,70	3,13

Tab. 73 - Monatliche Abweichungen des Gesamt-Stromverbrauchs gegenüber Versuchsgebäude 1, T1



Abb. 213 - Monatliche Gesamt-Stromverbräuche der Versuchsgebäude 1 bis 5 in den Heizphasen 3 und 4, A1

Für die dritte und vierte Heizphase sind die monatlichen Gesamtverbräuche der 5 Versuchsgebäude in Abb. 213 und Tab. 74 dargestellt. Der höchste Mehrverbrauch von Versuchsgebäude 5 gegenüber dem Versuchsgebäude 1 liegt im Monat Dezember 2017 vor und beträgt 149,37 kWh bzw. 16,40 %. Ebenso zeigt sich die energetische Wirksamkeit der Hydrophobierung von Versuchsgebäude 2. So ist der Gesamt-Stromverbrauch im Monat Oktober 2017 um 25,1 kWh bzw. um 5,65 % niedriger als beim unbehandelten Versuchsgebäude 1.

suchs- säude	Januar 2017	Februar 2017	März 2017	April 2017	Heizphase 3
Ver geb	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
1	1.107,29	909,18	689,44	545,15	3.251,07
2	1.136,06	911,16	692,13	552,70	3.292,05
3	1.068,30	860,42	648,69	507,57	3.084,98
4	389,03	338,71	240,37	162,54	1.130,65
5	1.234,64	996,76	736,68	573,05	3.541,13
suchs- päude	Oktober 2017	Novemb	per 2017	Dezember 2017	Heizphase 4
Versuchs- gebäude	Oktober 2017 [kWh]	Novemb [kV	oer 2017 Vh]	Dezember 2017 [kWh]	Heizphase 4 [kWh]
L Versuchs- gebäude	Oktober 2017 [kWh] 443,99	Novemb [kv 751	vh] .,08	Dezember 2017 [kWh] 911,04	Heizphase 4 [kWh] 2.106,11
7 Versuchs- gebäude	Oktober 2017 [kWh] 443,99 418,89	Novemb [kv 751 714	vh]	Dezember 2017 [kWh] 911,04 916,74	Heizphase 4 [kWh] 2.106,11 2.050,16
Versuchs- gebäude	Oktober 2017 [kWh] 443,99 418,89 395,64	Novemb [kv 751 714 696	ber 2017	Dezember 2017 [kWh] 911,04 916,74 868,48	Heizphase 4 [kWh] 2.106,11 2.050,16 1.961,00
Versuchs-1234	Oktober 2017 [kWh] 443,99 418,89 395,64 105,92	Novemb [kv 751 714 696 270	ber 2017 (March 1997) (March 19	Dezember 2017 [kWh] 911,04 916,74 868,48 313,43	Heizphase 4 [kWh] 2.106,11 2.050,16 1.961,00 690,25

Tab. 74 - Monatliche Gesamt-Stromverbräuche der Versuchsgebäude 1 bis 5 in den Heizphasen 3 und 4, T1



Abb. 214 - Monatliche Abweichungen des Gesamt-Stromverbrauchs gegenüber Versuchsgebäude 1, A1

Die Entwicklung der monatlichen Abweichungen des Gesamtverbrauchs der Versuchsgebäude geht aus Abb. 214 und Tab. 75 hervor. Wie zwischen der ersten und zweiten Heizphase zeigt sich auch zwischen der dritten und vierten Heizphase ein Sprung bei den prozentualen Abweichungen von Versuchsgebäude 5, der auf die aktive Beregnung zurückzuführen ist. Beim Versuchsgebäude 2 setzt sich die tendenziell größer werdende Einsparung gegenüber dem Versuchsgebäude 1 fort. Bei den Versuchsgebäuden 3 und 4 zeichnen sich in den wärmeren Monaten beider Heizphasen größere prozentuale Einsparungen ab als in den kälteren Monaten. Als mögliche Ursache können höhere Außentemperaturen genannt werden, mit denen die Wärmedämmeigenschaften der zusätzlichen Materialschicht (Außenputz bzw. Innendämmung) stärker zum Tragen kommen (siehe Tab. 42).

suchs- säude	Januar 2017		Februar 2017		März 2017		April 2017	
Ver: geb	[%]	[kWh/d]	[%]	[kWh/d]	[%]	[kWh/d]	[%]	[kWh/d]
2	2,60	0,93	0,22	0,07	0,39	0,09	1,39	0,25
3	-3,52	-1,26	-5,36	-1,74	-5,91	-1,31	-6,89	-1,25
4	-64,87	-23,17	-62,74	-20,37	-65,14	-14,49	-70,19	-12,75
5	11,50	4,11	9,63	3,13	6,85	1,52	5,12	0,93
suchs- äude	O]	ktober 2017		November 2017			Dezember	2017
Vera	[%]	[kW	h/d]	[%]	[kWh/d]	[0	%]	[kWh/d]
2	-5,65	-0,	81	-4,87	-1,22	0,	63	0,18
3	-10,89	-1,	56	-7,22	-1,81	-4	,67	-1,37
4	-76,14	-10	,91	-63,93	-16,01	-65	5,60	-19,28
5	15,76	2,	26	15,95	3,99	16	,40	4,82

Tab. 75 - Monatliche Abweichungen der Gesamt-Stromverbräuche gegenüber Versuchsgebäude 1, T1

3.7 Auswertung - feuchtebedingte Wärmeverluste

3.7.1 Quantifizierung

Auf Grundlage der Messergebnisse der Freilandversuche können die nachfolgenden Aussagen zur Quantifizierung der energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit getroffen werden:

- 1. Die Langzeitmessung der relativen Luftfeuchtigkeit im Mauerwerk und der Wärmestromdichte bestätigen unter realen Wetterbedingungen den Forschungsansatz, dass die sich einstellende Feuchtigkeitsbelastung von ungedämmten Außenwänden aus einschaligem Ziegelmauerwerk deren Wärmedämmeigenschaften und Transmissionswärmeverluste in einem relevanten Umfang beeinflussen kann. Durch den gemessenen Gesamt-Stromverbrauch für die Beheizung konnten zudem die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit nicht nur bauteilbezogen, sondern auch gebäudebezogen nachgewiesen und quantifiziert werden.
- 2. Besonders deutlich wird der Einfluss von Mauerwerksfeuchtigkeit auf den Gesamt-Strom- bzw. Heizwärmeverbrauch unter modifizierten Außenklimabedingungen. Am Versuchsgebäude 5, bei dem die Außenwände aktiv beregnet wurden, zeigt sich ein Mehrverbrauch in der vierten Heizphase von 16,10 % gegenüber dem Versuchsgebäude 1 und von 19,27 % gegenüber dem Versuchsgebäude 2. Ohne eine aktive Beregnung reduziert sich der Mehrverbrauch deutlich, wie sich in der ersten Heizphase zeigt. Hier beträgt dieser nur 3,20 % gegenüber Versuchsgebäude 1 und nochmals kleinere 0,64 % gegenüber Versuchsgebäude 2.
- 3. Bauteilbezogen wird die energetische Relevanz von Mauerwerksfeuchtigkeit insbesondere an Versuchsgebäude 3 deutlich. Hier zeigt sich, dass unter realen baupraktischen Bedingungen, ohne modifiziertes Außenklima, eine Feuchtigkeitsbelastung der Außenwand West resultiert, die mit einer signifikanten Veränderung der Wärmedämmeigenschaften verbundenen ist. In der vierten Heizphase folgt dadurch für die Außenwand ein instationärer U-Wert, der um 15,60 % größer ist als beim Versuchsgebäude 1 und um 25,14 % größer als beim Versuchsgebäude 2. Dies ist umso beachtlicher, da das Versuchsgebäude 3 einen 2 cm starken Außenputz aufweist.
- 4. Gebäudebezogen reduziert sich aber die energetische Relevanz von Mauerwerkfeuchtigkeit, da unter realen Wetterbedingungen nicht alle Außenwände einer starken Schlagregeneinwirkung ausgesetzt sind. Deutlich wird dies anhand der vor Ort aufgezeichneten Wetterdaten. Hier zeigt sich, dass die Höchstwerte der Schlagregeneinwirkungen bei der Außenwand West vorliegen und die weiteren Außenwände erheblich kleinere Einwirkungen durch Schlagregen aufweisen. Die damit verbundenen Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch werden am Beispiel von Versuchsgebäude 3 deutlich. Obwohl der Wärmeschutz der Außenwand West stark reduziert ist erreicht dieses in der vierten Heizphase einen Heizwärmeverbrauch, der um 6,89 % kleiner ist als beim Versuchsgebäude 1 und um 4,35 % kleiner als beim Versuchsgebäude 2.
- 5. An den Messdaten der Versuchsgebäude 1 und 4 zeigt sich, dass mit der Innendämmung eine höhere Feuchtigkeitsbelastung der ziegelsichtigen Außenwände resultiert, als bei den ungedämmten ziegelsichtigen Außenwänden. Weiterhin wird mit dem Vergleich von Versuchsgebäude 1 und 4 deutlich, dass sich die prozentualen Abweichungen zwischen den instationären U-Werten und zwischen den Heizwärmeverbräuchen der vier Heizphasen nur geringfügig ändern. Dies lässt darauf schließen, dass Feuchtigkeit im Mauerwerk ungedämmter Außenwände energetisch von größerer Relevanz ist, als Feuchtigkeit im Mauerwerk gedämmter Außenwände.

3.7.2 Reduzierung

Auf Grundlage der Messergebnisse der Freilandversuche können die nachfolgenden Aussagen zu den energetischen Auswirkungen von feuchtigkeitsreduzierenden Maßnahmen getroffen werden:

- 1. Aus den normativ berechneten U-Werten für die Außenwände der Versuchsgebäude 1 und 2 geht hervor, dass mit einer Hydrophobierung der Wandaußenoberfläche keine Verbesserung der Dämmeigenschaften zu erwarten ist. Die gemessenen instationären U-Werte zeigen aber, dass die hydrophobierte Außenwand West von Versuchsgebäude 2 gegenüber der unbehandelten Außenwand West von Versuchsgebäude 1 im Verlauf der Heizphasen eine stetige Verbesserung der Dämmeigenschaften aufweist. Ausgehend von einem um 3,69 % schlechteren U-Wert in der ersten Heizphase reduziert sich dieser mit fortschreitender Trocknung des Mauerwerks, sodass in der vierten Heizphase ein um 7,62 % besserer U-Wert resultiert.
- 2. Die Entwicklung des instationären U-Wertes der hydrophobierten Außenwand West spiegelt sich auch in deren Transmissionswärmeverlusten und in den erfassten Heizwärmeverbräuchen des Versuchsgebäudes wider. Gebäudebezogen ist der energetische Einfluss der Hydrophobierung jedoch gedämpfter als bauteilbezogen. So beträgt der Mehrverbrauch von Versuchsgebäude 2 gegenüber Versuchsgebäude 1 in der ersten Heizphase 2,54 % und der Minderverbrauch in der vierten Heizphase 2,66 %. Zurückzuführen ist dieser Effekt darauf, dass nicht alle Außenwände einer starken Schlagregeneinwirkung ausgesetzt sind. Auf Gebäudeseiten, die nur selten durch Schlagregen beansprucht werden und eine geringe solare Einstrahlung aufweisen, kommen der Feuchteschutz und die energetischen Effekte der Hydrophobierung weniger zum Tragen.
- 3. Am Beispiel von Versuchsgebäude 3 wird die Diskrepanz zwischen dem theoretisch ermittelten stationären U-Wert und dem real gemessenen instationären U-Wert noch klarer. So ergibt der Vergleich mit dem Versuchsgebäude 1, dass die Außenwand West von Versuchsgebäude 3 einen 3,78 % besseren stationären U-Wert aufweist. Der an den westlichen Außenwänden gemessene instationäre U-Wert zeigt hingegen keinen besseren, sondern einen um 15,60 % schlechteren Wärmeschutz beim Versuchsgebäude 3 an. Zugleich konnte bei dieser Außenwand eine starke und sich wiederholende Auffeuchtung erfasst werden, die sich z.B. bei der Außenwand West von Versuchsgebäude 2 nicht zeigte. Es ist daher davon auszugehen, dass die Kombination aus Außenputz und hydrophober Fassadenfarbe in dem am Versuchsgebäude vorliegenden Zustand nicht zur Reduzierung von feuchtebedingten Wärmeverlusten beiträgt. Deutlich wird dadurch hingegen, dass diese Art von Wärmeverlusten nicht nur bei ungedämmten und ziegelsichtigen, sondern auch bei ungedämmten und verputzten Außenwänden von Relevanz sein kann.
- 4. Die Messergebnisse der Freilandversuche zeigen, dass die theoretisch bzw. normativ ermittelten U-Werte nur bedingt zur Beurteilung der realen Dämmeigenschaften von feuchtigkeitsbelasteten und ungedämmten Wänden aus einschaligem Ziegelmauerwerk geeignet sind. Die energetischen Auswirkungen feuchtereduzierender Maßnahmen können hingegen mit stationären U-Werten überhaupt nicht quantifiziert werden, obwohl diese infolge der Freilandversuche bauteil- und gebäudebezogen nachgewiesen wurden. Dabei zeigte sich auch, dass größere und relevante Einsparungen beim Heizwärmeverbrauch dann zu erwarten sind, wenn mehrere Außenwände eine starke Schlagregenbelastung aufweisen. Ist diese auf eine Außenwand begrenzt, so können bauteilbezogen die Transmissionswärmeverluste in einem relevanten Umfang reduziert werden, jedoch spiegelt sich die damit erzielte Einsparung nur gedämpft im Heizwärmeverbrauch wider.

4. Untersuchungskonzept 2 – Berechnen und Auswerten

4.1 Beschreibung - Materialparameter

Im Rahmen des "Untersuchungskonzepts 2 - Berechnen und Auswerten" erfolgt die Untersuchung der Versuchsgebäude mittels hygrothermischen Simulationen. Sowohl für die Bauteilsimulationen als auch für die Gebäudesimulationen kommt die Software "WUFI Plus 3.1" zur Anwendung.

Das Programm ist für die hygrothermische Untersuchung von Bauteilen und Gebäuden aus porösen Baustoffen konzipiert und eignet sich daher zur Anwendung im Rahmen des Forschungsprojektes. Dabei ist zu berücksichtigen, dass realistische Ergebnisse der Simulationsberechnungen maßgeblich davon abhängig sind, wie genau das zu untersuchende Bauteil (Bauteilsimulation) und Bauwerk (Gebäudesimulation) in der Simulationssoftware abgebildet wird. Bezüglich der Bauteilsimulation greift die Software auf bauteilbezogene Randbedingungen zurück, wie den Bauteil-Schichtaufbau, den Materialparametern der Bauteilschichten, die Orientierung und Höhenlage des Bauteils, aber auch auf das am Bauteil einwirkende Außen- und Innenklima. Hinsichtlich der hygrothermischen Gebäudesimulation werden die zuvor genannten Randbedingungen noch um eine Vielzahl weiterer Abfragen ergänzt, wie z.B. zur Gebäudegeometrie oder Anlagentechnik. Da die Bauteilsimulation ein Bestandteil der Gebäudesimulation darstellt, kann diese nicht solistisch bzw. unabhängig in der Simulationssoftware "WUFI Plus 3.1" erfolgen. Obwohl für die Simulationen teilweise sehr spezielle Eingaben notwendig sind, können die Versuchsgebäude präzise in der Software abgebildet werden.

Als Herausforderung für die Simulationen stellt sich neben der Aufzeichnung und Abbildung des örtlichen Wetters (in dieser Arbeit auch als Außenklima bezeichnet), vor allem die richtige Eingabe der Außenwände dar. Dies ist deshalb schwierig, weil das Mauerwerk der Außenwände aus zwei Komponenten besteht (Mauermörtel und Ziegel), die durch unterschiedliche Materialparameter gekennzeichnet sind. Zudem handelt es sich bei den verbauten Ziegeln um historisches Material, dessen Eigenschaften (Materialparameter) sehr stark schwanken können. Da die Bestimmung der Materialparameter im Labor z.T. sehr zeit- und kostenaufwändig ist, können diese nur an wenigen Proben vorgenommen werden. Um dennoch die Eigenschaften des Ziegelmauerwerks genau in der Software abzubilden, war ein möglichst repräsentativer Ziegel (Referenzziegel) als Stellvertreter für das Mauerwerk (ohne Fugen) auszuwählen. Die Beschreibung der Vorgehensweise zur Auswahl dieses Referenzziegels erfolgt im Abschnitt 4.2.1 Vorarbeiten. Daraufhin wird auf die Bestimmung der Materialparamater von Proben des Referenzziegels, aber auch von Proben des Mauermörtels eingegangen, die im Rahmen von Laboruntersuchungen am Dahlberg-Institut in Wismar und am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der TU Darmstadt erfolgten. Alle Laboruntersuchungen wurden zudem durch zwei Masterarbeiten der Studierenden Anna-Lena Fischer und Sandra Jessica Sorge begleitet und dokumentiert:

- 1. FISCHER, Anna-Lena: Analyse von Materialparametern für hygrothermische Simulationsberechnungen von 5 Versuchsgebäuden (Masterthesis). Darmstadt 2016.
- 2. SORGE, Sandra Jessica: Materialparameter-Studie für hygrothermische Simulationsberechnungen von 5 Versuchsgebäuden (Masterthesis). Darmstadt 2017.

Ausgewählte Inhalte der Masterarbeiten sind im Abschnitt 4.2 Beschreibung - Laboruntersuchungen eingeflossen, allerdings nicht nochmals separat zitiert worden.
4.2 Beschreibung - Laboruntersuchungen

4.2.1 Vorarbeiten

Zu den Vorarbeiten der Laboruntersuchungen gehörten neben der Auswahl des Referenzziegels infolge einer Pilotstichprobe, auch die Anfertigung von Proben des Mauermörtels, die Ermittlung der Eindringtiefe der Hydrophobierung anhand von Bestandsproben des Versuchsgebäudes 2 sowie die Vorbereitung von hydrophobierten Proben des Referenzziegels und des Mauermörtels.

Für die Pilotstichprobe lagen insgesamt 22 Ziegel vor, die aus dem gleichen Bestandsbauwerk wie die Ziegel der Versuchsgebäude stammen. Als Untersuchungsmerkmal wurde die Trockenrohdichte gewählt, da diese im Allgemeinen mit einem minimalen messtechnischen Aufwand ermittelt werden kann. Für die Berechnung sind die Trockenmasse und das Volumen des Untersuchungsgegenstands erforderlich. Da die einzelnen Ziegel unregelmäßige Oberflächen aufweisen, konnte das Volumen nicht eindeutig durch Abmessen ermittelt werden. Aus diesem Grund wurde von jedem Ziegel eine 1 cm dicke Scheibe abgesägt und mittels Unterwasserwägungen das Volumen der Probe bestimmt. Die Messwerte der Ziegelproben und die daraus berechneten Rohdichten sind in Tab. 76 aufgeführt.

Drobokörnor	1. Messung	2. Messung	3. Messung	Volumen	Rohdichte		
Probekorper	m _d [g]	m _w [g]	m _a [g]	V [mm ³]	$ ho_R$ [kg/m ³]		
Z-1	175,54	100,03	193,55	93707,41	1873,28		
Z-2	62,76	37,2	76,38	39258,52	1598,63		
Z-3	59,14	35,3	70,77	35541,08	1663,99		
Z-4	70,87	40,54	81,55	41092,18	1724,66		
Z-5	111,32	65,59	131,28	65821,64	1691,24		
Z-6	120,5	70,11	139,65	69679,36	1729,35		
Z-7	85,71	49,73	99,1	49468,94	1732,60		
Z-8	104,35	61,23	123,42	62314,63	1674,57		
Z-9	97,99	56,67	112,98	56422,85	1736,71		
Z-10	117,4	67,05	129,94	63016,03	1863,02		
Z-11	88,57	51,18	97,56	46472,95	1905,84		
Z-12	107,22	60,84	120,93	60210,42	1780,75		
Z-13	177,78	102,02	191,46	89619,24	1983,73		
Z-14	121,97	68,98	129,4	60541,08	2014,67		
Z-15	99,85	60,06	118,75	58807,62	1697,91		
Z-16	157,82	91,66	182,32	90841,68	1737,31		
Z-17	68,83	41,05	83,52	42555,11	1617,43		
Z-18	48,04	28,77	56,55	27835,67	1725,84		
Z-19	53,28	31,77	65,16	33456,91	1592,50		
Z-20	140,55	80,67	156,39	75871,74	1852,47		
Z-21	168,71	97,06	177,31	80410,82	2098,10		
Z-22	111,08	67,01	132,9	66022,04	1682,47		
m_d = Trockenmasse, m_s = Masse der gesättigten Probe über Wasser, m_{ss} = Masse der gesättigten Probe unter Wasser							

Tab. 76 - Messergebnisse der Pilotstichprobe zur Ziegelauswahl, T7

Zur Veranschaulichung der Messergebnisse aus Tab. 76 sind diese auch in einem Histogramm mit einer Klassenbreite von 50 kg/m³ aufgetragen (siehe Abb. 215). Die Summenhäufigkeit ergibt sich durch schrittweises Addieren der relativen Häufigkeiten und wurde als Kurve abgebildet. Die größte Häufigkeit mit 6 von 22 Ziegeln befand sich in der Klasse zwischen 1.700 kg/m³ und 1.750 kg/m³. Das arithmetische Mittel der Grundgesamtheit betrug 1.771,68 kg/m³. Die kleinste Rohdichte zeigte Ziegel Z-19 mit 1.592,50 kg/m³. Die größte Rohdichte konnte beim Ziegel Z-21 mit 2.098,10 kg/m³ festgestellt werden. Insgesamt ergab sich eine Spannweite von 505,60 kg/m³.



Ausgehend vom Stichprobenumfang (22 Ziegel) stellt das arithmetische Mittel die durchschnittliche Rohdichte der untersuchten Ziegel dar. Ziegel Z-12 mit einer Rohdichte von 1.780,75 kg/m3 kam dem Mittelwert am nächsten. Aufgrund der Vielzahl von Versuchen und den damit einhergehenden Maßnahmen zur Probekörpervorbereitung (Zuschnitt, Konditionierung usw.) war es aus praktischen Gründen nicht möglich, die Untersuchungen ausschließlich an einem Ziegel vorzunehmen. Das Ziel bestand daher darin, einen Referenz- und zwei Ersatzziegel auszuwählen, die möglichst ähnliche Eigenschaften besitzen, d.h. eine geringe Rohdichtedifferenz untereinander aufwiesen und zugleich mit ihrer Rohdichte möglichst nahe am Mittelwert der Stichprobe lagen. In der Klasse 1.750 kg/m³ bis 1.800 kg/m³, in der Ziegel Z-12 lag, befanden sich keine weiteren Ziegel. Die Differenz zwischen Z-12 und anderen Ziegeln war in Hinblick auf die Zielsetzung daher zu groß. Aus diesem Grund wurde in Richtung der größten Häufigkeit die nächste Klasse betrachtet. Der Ziegel Z-16 mit einer Rohdichte von 1.737,31 kg/m³, der Ziegel Z-9 mit einer Rohdichte von 1.736,71 kg/m³ und der Ziegel Z-7 mit einer Rohdichte von 1.732,60 kg/m3 lagen am nächsten am arithmetischen Mittel und wiesen untereinander eine maximale Differenz von 4,71 kg/m³ auf. Gleichzeitig lagen diese Ziegel in der Klasse mit der größten Häufigkeit. Infolge der Unterwasserwägung konnte zudem die Wasseraufnahme bis hin zur freien Wassersättigung in Bezug auf das Volumen des Probekörpers ermittelt werden. Die Auswertung über dieses Merkmal ergab eine ähnliche Häufigkeitsverteilung und bestätigte somit die Auswahl des Referenzziegels Z-16 und der Ersatzziegel Z-9 und Z-7. Für alle untersuchten Ziegel ist eine ausführliche Dokumentation mit Fotografien der vollständigen Ziegel und der Schnittfläche nach der Probenentnahme sowie mit Schemazeichnungen einschließlich der Ziegelabmessungen im Anhang 8 - Ziegelsteckbriefe der Pilotstichprobe aufgeführt.

Um gleichermaßen eine normkonforme und flexible Durchführung der Laboruntersuchungen am Mauermörtel gewährleisten zu können, wurden Probekörper in derselben Rezeptur wie beim Bau der Versuchsgebäude angefertigt. Die Abmessungen orientieren sich dabei an den Gerätevorgaben des Dahlberg-Instituts und an den Abmessungen des Referenzziegels (zur besseren Vergleichbarkeit). Auf diese Weise wurden zwei Mörtelproben (M_{P1}-1 und Ersatz-Probe M_{P7}-1) in den Abmessungen 200 mm x 200 mm x 30 mm und fünf Mörtelproben (M_{P2}-1, M_{P3}-1, M_{P4}-1, M_{P5}-1 und M_{P6}-1) in den Abmessungen 240 mm x 125 mm x 65 mm hergestellt.

Eindringtiefe der Hydrophobierung

Um die Eindringtiefe der Hydrophobierung zu bestimmen, wurden aus dem Versuchsgebäude 2 sowohl die Mörtelproben ($M_{in situ}$) als auch ein Bestandsziegel ($Z_{in situ}$) mit hydrophobierter Binderund Läuferseite ausgebaut. Im ersten Schritt wurde ein sogenannter "Tröpfchen-Test" durchgeführt, um das Kernmaterial hinsichtlich der Ausbildung von hydrophoben Eigenschaften zu untersuchen. Hierfür wurde ein Stück des Bestandsziegels abgebrochen und auf diesem punktuell Tinte vom Randbereich in Richtung des Kerns getropft. Die Ziegelbereiche, in die das Hydrophobierungsmittel eingedrungen war, konnten nicht bzw. nicht vollständig vom aufgebrachten Tintentropfen benetzt werden. Es bildete sich ein nahezu runder Tropfen aus, der bei Bewegung der Probe teilweise von dieser abperlte. Nicht hydrophobe Bereiche saugten die Tinte hingegen sofort nach Aufbringen des Tropfens auf. Dadurch konnte eine Grenze zwischen hydrophobierten und nicht hydrophobierten Ziegelbereichen identifiziert werden. Diese optische Grenze wurde zur Bestimmung der exakten Eindringtiefe der Hydrophobierung mittels mikroskopischer Vermessung genutzt. Das arithmetische Mittel der dabei erzielten Messwerte beträgt 1,7 mm. Die nachfolgend aufgeführten Abbildungen (siehe Abb. 216 bis Abb. 218) veranschaulichen die Versuchsdurchführung.



Abb. 216 - Durchführung des "Tröpfchen-Tests" an dem Bruchstück des Bestandsziegels, A20



Abb. 217 - Hydrophober Randbereich am Bruchstück des Bestandsziegels, A20



Abb. 218 - Mikroskopische Vermessung des hydrophoben Randbereichs des Bestandsziegels, A20

Parallel zur Bestimmung der Eindringtiefe wurde ebenfalls die Wirkung der Hydrophobierung an der Oberfläche des ausgebauten Bestandsziegels untersucht. Anhand von Abb. 219 wird deutlich, dass die Binderseite des Bestandziegels gemäß dem "Tröpfchen-Test" (hier jedoch mit Wasser) als hydrophob einzustufen ist.



Abb. 219 - Gleichmäßige Ausbildung der hydrophoben Eigenschaften auf der Binderseite, A20



Abb. 220 - Ungleichmäßige Ausbildung der hydrophoben Eigenschaften auf der Läuferseite, A20

Im Gegensatz dazu zeigte die Untersuchung der hydrophobierten Läuferseite des Bestandsziegels, dass partiell keine hydrophoben Eigenschaften ausgebildet wurden und die Oberfläche in kleineren Bereichen die aufgesetzten Wassertropfen aufsaugt (siehe Abb. 220). Unterhalb dieser Bereiche konnten auch im Kernmaterial des Ziegels keine hydrophoben Eigenschaften nachgewiesen werden. Obwohl sich Ziegel in der Regel gut hydrophobieren lassen, ist die Wirksamkeit der Maßnahme stark von der Oberflächenbeschaffenheit des Materials abhängig. So können Verschmutzungen, aber auch eine partiell stärker ausgeprägte Brennhaut mögliche Ursachen für die stellenweise schwache oder fehlende hydrophobe Wirkung darstellen. Des Weiteren sind auch das Porengefüge und die chemisch-mineralogische Zusammensetzung des Ziegels für die Wirksamkeit der Hydrophobierung von Relevanz. Unabhängig von dem Laborergebnis für die Läuferfläche des Bestandsziegels, konnte aber direkt an den Außenwänden des Versuchsgebäudes 2 die Wirksamkeit der Hydrophobierung unmittelbar nach Regenereignissen großflächig im Ziegel- und Fugenbereich nachgewiesen werden (siehe Abb. 57 bis Abb. 60).⁷⁰

Zur Prüfung der Eindringtiefe der Hydrophobierung in den Mauermörtel wurden zunächst kleine Bruchstücke des Bestandsmörtels (siehe Abb. 216) und später die noch anhaftende Mörtelschicht des Bestandsziegels untersucht (siehe Abb. 220). Der Tröpfchen-Test zeigte, dass alle verfügbaren Bruchstücke als vollständig hydrophob eingestuft werden konnten. Im Allgemeinen wiesen diese sowohl an der Oberfläche als auch im Inneren hydrophobe Eigenschaften auf. Die aufgesetzten Tröpfchen bildeten sich hier jedoch deutlich runder aus, als beim Bestandsziegel und wurden auch nach längerer Zeit nicht aufgesaugt. An der anhaftenden Mörtelschicht des Bestandsziegels wurde anschließend die Eindringtiefe der Hydrophobierung mittels mikroskopischer Vermessung exakt bestimmt. Als arithmetisches Mittel der Messwerte ergab sich eine repräsentative Eindringtiefe der Hydrophobierung von 14,4 mm.

⁷⁰ WTA-MERKBLATT 3-17, S. 6

Vorbereitung der hydrophobierten Proben

Zur Bestimmung der Materialparameter für die hydrophobierte Mauerwerksschicht mussten sowohl Ziegel- als auch Mörtelproben für die Laboruntersuchungen präpariert werden. In einem ersten Durchgang wurde die Ziegelprobe Z_{16} -1.1 in einer Form aufgeständert (siehe Abb. 221) und für eine Woche in der Hydrophobierungscreme gelagert, die auch am Versuchsgebäude 2 zum Einsatz kam. Die Einwirkzeit von einer Woche wurde gewählt, um eine vollständige Hydrophobierung des Kernmaterials zu erreichen.



Abb. 221 - Lagerung der Ziegelprobe Z_{16} -1.1 in einer Form mit Hydrophobierungscreme, A20



Abb. 222 - Hydrophobe Schnittfläche der Ziegelprobe Z₁₆-1.1.2-hyd, A20

Im Anschluss an die Lagerung in der Hydrophobierungscreme wurde die Probe Z_{16} -1.1 aufgesägt, um die hydrophoben Eigenschaften im Kernmaterial zu prüfen. Nach 14 Trocknungstagen konnte festgestellt werden, dass die Schnittfläche, die mit der Creme nicht direkt in Berührung kam, als hydrophob eingestuft werden konnte (siehe Abb. 222). Nach diesem erfolgreichen Testlauf wurden weitere Ziegel- und Mörtelproben präpariert. Entsprechend den Herstellerempfehlungen sind die Proben diesmal jedoch nicht in der Hydrophobierungscreme gelagert worden. Stattdessen wurde die Creme insgesamt zwei Mal im Abstand von 24 Stunden mit einem Pinsel in die Probekörper eingearbeitet. Dabei wurde maximal eine Menge von 300 g/m² pro Einstreichvorgang aufgetragen. Mit dem Halbieren von zur selben Zeit und in selber Weise hydrophobierten Testproben, konnten die hydrophoben Eigenschaften in deren Kernbereich etwa 7 bis 10 Tage nach dem Einstreichen nachgewiesen werden (siehe Abb. 223 und Abb. 224).



Abb. 223 - Hydrophobes Kernmaterial einer Ziegelprobe (Testprobe), A20



Abb. 224 - Hydrophobes Kernmaterial einer Mörtelprobe (Testprobe), A20

4.2.2 Grundkennwerte

Zur Ausführung der Bauteil- und Gebäudesimulationen ist in der Simulationssoftware zumindest die Eingabe der Grundkennwerte für die Materialien der Gebäudehülle erforderlich. Hierzu gehören die Trockenrohdichte, die offene Porosität, die spezifische Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Materialzustand bei 10 °C sowie die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (trocken). Nachfolgend wird die labortechnische Bestimmung der Grundkennwerte für ausgewählte Proben des Referenzziegels und der Ersatzziegel, aber auch für die angefertigten Mörtelproben beschrieben.

Rohdichte

Die (Trocken-)Rohdichte eines Prüfkörpers ergibt sich aus dem Quotient der Trockenmasse und des Volumens. Die Bestimmung der Rohdichte für die Auswahl des Referenzziegels erfolgte im Rahmen der zuvor beschriebenen Pilotstichprobe entsprechend der DIN EN 772-13 bzw. DIN EN 1015-10. Die erforderliche hydrostatische Wägung der sehr unregelmäßig geformten Ziegelproben wurde dabei in Anlehnung an die DIN EN 772-3 durchgeführt. Die einzelnen Untersuchungsschritte, die im Rahmen der Pilotstichprobe erfolgten, werden in Abb. 225 bis Abb. 228 dargestellt.



Abb. 225 - Zuschnitt eines Ziegels, A19



Abb. 227 - Ermittlung der Trockenmasse einer Probe, A19



Abb. 226 - Ziegel mit den entnommenen Proben, A19



Abb. 228 - Unterwasserwägung einer Probe, A19

Die Ergebnisse der Pilotstichprobe wurden in Tab. 76 des Abschnitts 4.2.1 Vorarbeiten aufgezeigt. Als repräsentativster Vertreter des Mauerwerks wurde dabei der Ziegel Z-16 mit einer Rohdichte von 1.737,31 kg/m³ identifiziert (gefolgt von den Ziegeln Z-9 und Z-7). Für die Bestimmung der Rohdichte des Mauermörtels wurden die angefertigten Proben M_{P1}-1, M_{P4}-1 und M_{P7}-1 bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Nach Wägung und Bestimmung der Volumina ergab sich die mittlere Rohdichte dieser Probekörper zu 1.768,38 kg/m³.

Offene Porosität

Die offene Porosität eines Stoffes beschreibt das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen und wird aus dessen Rohdichte sowie Reindichte ermittelt. Die Bestimmung der Reindichte erfolgte gemäß der DIN 66317-2 mit einem Heliumpyknometer am Institut für Werkstoffe im Bauwesen.⁷¹ Dieses Messverfahren nutzt den Umstand, dass das Feststoffvolumen einer Probe gasverdrängend ist, während offene Poren oder sonstige Hohlräume der Probe ungehindert von einem Gas gefüllt werden können. Die durchgeführten Messungen mit dem Heliumpyknometer erfolgten an 2 Proben des Referenzziegels Z-16 und an der Mörtelprobe M-1 (Rohdichte: 1.884,92 kg/m³), die zuvor an einem der Versuchsgebäude entnommen wurde (siehe Abb. 229 und Abb. 230). Für die Messungen wurden die ofentrockenen Proben in einem sogenannten Vessel eingewogen (siehe Abb. 231) und anschließend in das Gerät eingesetzt (siehe Abb. 232). Das Heliumpyknometer gab nach Abschluss der Messung direkt die Reindichte der jeweiligen Probe aus.⁷²



Abb. 229 - Entnommene Proben des Referenzziegels Z-16 für die Bestimmung der offenen Porosität, A19



Abb. 231 - Einwaage des Vessels inkl. Ziegelprobe, A19



Abb. 230 - Mauermörtelprobe M-1 für die Bestimmung der offenen Porosität, A19



Abb. 232 - Genutztes Heliumpyknometer, A19

Die Reindichte des Ziegels Z-16 ergab sich zu 2.726,80 kg/m³ und die der Mörtelprobe M-1 zu 2.647,73 kg/m³. Aus dem Verhältnis von Trockenrohdichte zu Reindichte ließ sich daraufhin die offene Porosität der beiden Materialien ableiten. Diese beläuft sich für den Ziegel Z-16 auf 36,29 % und für den Mörtel M-1 auf 28,81 %.

⁷¹ FISCHER 2016, S. 29 - 33

⁷² Die Messung der offenen Porosität wurde an der Bestandsmörtelprobe M-1 durchgeführt, da zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung nur diese verfügbar war. Die Proben M_{P1}-1 bis M_{P7}-1 wurden erst später für die Untersuchungen am Dahlberg-Institut angefertigt.

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität c gibt an, welche Wärmemenge ein Stoff mit der Masse von 1 kg aufnimmt oder abgibt, wenn dessen Temperatur um 1 K erhöht bzw. gesenkt wird. Diese Stoffgröße beschreibt damit die Fähigkeit zur Wärmespeicherung und wird in der Regel in der Einheit J/(kgK) angegeben. Baustoffe, die eine niedrige spezifische Wärmekapazität aufweisen, können folglich mit einem kleineren Energieaufwand erwärmt werden als solche, die durch eine höhere spezifische Wärmekapazität gekennzeichnet sind. Da ein hoher Wert der spezifischen Wärmekapazität auch eine längere Speicherung von Wärme ermöglicht, wird eine schnelle Auskühlung vermieden, sodass diese Materialien bei Temperaturschwankungen puffernd bzw. ausgleichend wirken. Bei porösen Stoffen, wie Ziegeln, Beton oder Naturstein, ist die spezifische Wärmekapazität zudem stark vom Wassergehalt abhängig, da Wasser eine spezifische Wärmekapazität in Höhe von 4.190 J/(kgK) aufweist, während jene von Luft nur 1.000 J/(kgK) beträgt.⁷³

Der Versuch zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität erfolgte nach dem kalorimetrischen Verfahren am Dahlberg-Institut. Dabei wurde die Methode der Mischungskalorimetrie angewendet, bei der Wasser, dessen spezifische Wärmekapazität bekannt ist, als Hilfsstoff dient. Das Kalorimeter stellt dabei ein abgeschlossenes System dar, in dem ein Austausch von Wärmeenergie zwischen Probekörper und Wasser stattfindet. Der Endzustand ist gemäß dem Energieerhaltungssatz dann gegeben, wenn alle Systembestandteile die gleiche Mischungstemperatur erreicht haben.

Versuchsdurchführung am Ziegel

Zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität des Referenzziegels Z-16 wurden 2 Proben aus repräsentativem Kernmaterial genutzt (siehe Abb. 233). Die Abmessungen der beiden Ziegelproben wurden dabei so gewählt, dass diese einfach in die Messkammer des Kalorimeters eingelegt werden können und gleichzeitig eine ausreichende Größe besitzen, um während des Versuchs genügend Wärme zu speichern bzw. abzugeben.



Abb. 233 - Für die Messungen verwendete Ziegelproben Z_{16} -1.2.2.1 (unten) und Z_{16} -1.3.2.1 (oben), A20



Abb. 234 - Genutztes Kalorimeter mit Temperaturfühler am Dahlberg-Institut, A20

⁷³ SORGE 2015, S. 8

Vgl. WESCHE 1996, S. 152; DUZIA 2014, S. 43

Infolge eines Vorversuchs wurde die Wärmekapazität des verwendeten Kalorimeters (siehe Abb. 234) bestimmt. Diese fließt als Korrekturfaktor bei der Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität der Proben ein. Zunächst wurde hierfür warmes und dann kaltes Wasser mit jeweils einer bestimmten Temperatur in das Kalorimeter eingefüllt und die Mischungstemperatur erfasst. Die Reihenfolge des Befüllvorgangs ist hinsichtlich der Aufstellung des Energieerhaltungssatzes von Relevanz.

Anschließend konnten die kalorimetrischen Messungen an den Ziegelprobekörpern vorgenommen werden. Diese wurden zuvor im Trockenschrank bis zum Erreichen der Massenkonstanz bei 105 °C getrocknet und dann in das mit kaltem Wasser befüllte Kalorimeter gegeben. Mit geschlossenem Deckel und unter ständigem Rühren stellte sich nach wenigen Minuten eine bestimmte Mischungstemperatur ein. Über einen Messfühler, der durch eine Öffnung im Deckel in die Messkammer des Kalorimeters geführt wurde, konnte die exakte Temperatur des durch die Ziegelprobe erwärmten Wassers im geschlossenen System ermittelt werden.

Über den Energieerhaltungssatz erfolgte nun die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität der Ziegelproben. Der Versuch wurde für jede Ziegelprobe wiederholt. Über das arithmetische Mittel der vier Messwerte ergab sich schließlich eine repräsentative spezifische Wärmekapazität für den Ziegel Z-16 von 695,00 J/(kgK).

Versuchsdurchführung am Mörtel

Die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität des Mauermörtels erfolgten analog zu der Versuchsreihe mit den Ziegelproben. Abb. 235 zeigt die verwendeten Mörtelproben M_{P5} -1.1.2 und M_{P5} -1.2.2. In Abb. 236 ist wiederum das Kalorimeter mit einer eingebrachten Mörtelprobe dargestellt.



Abb. 235 - Mörtelproben M_{P5} -1.1.2 und M_{P5} -1.2.2 im Vergleich zu den Ziegelproben, A20



Abb. 236 - Genutztes Kalorimeter mit Temperaturfühler und eingebrachter Mörtelprobe, A20

Weil die beiden Mörtelproben jeweils zwei Mal mit dem Kalorimeter untersucht wurden, standen insgesamt vier Messwerte zur Verfügung. Die spezifische Wärmekapazität des Mauermörtels ergab sich nun über das arithmetische Mittel dieser vier Messwerte zu 859,00 J/(kgK).

Die Ergebnisse, die über das kalorimetrische Verfahren für die Ziegel- und Mörtelproben ermittelt wurden, konnten zudem durch die Anwendung des Hot-Disk-Verfahrens plausibilisiert werden, das nicht nur zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, sondern auch zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität geeignet ist. Die Messungen mit diesem Verfahren werden nachfolgend dargelegt.

Wärmeleitfähigkeit, trocken

Die Wärmeleitfähigkeit λ gibt an, welche Wärmemenge Q innerhalb von einer Stunde bei einer Temperaturdifferenz von 1 K durch eine 1 m dicke Schicht mit einer Fläche von 1 m² transportiert wird. Ihre Angabe erfolgt in der Einheit W/(mK).⁷⁴ Bei nicht porösen, isotropen und homogenen Materialien, wie z.B. reinen Metallen, ist der Wärmetransport aufgrund des hohen Feststoffanteils ausschließlich durch Wärmeleitung gekennzeichnet. Nach CAMMERER kann die dabei resultierende Wärmeleitfähigkeit auch als "echte Wärmeleitfähigkeit" bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu wird in porösen Materialien der Wärmetransport durch weitere Transportmechanismen beeinflusst. Neben der Wärmeleitung im Feststoffgerüst erfolgt im Porenraum der Transport von Wärme ebenso durch Wärmeleitung (in der Porenluft), aber auch durch Wärmeleitfähigkeit des porösen Baustoffes abnimmt. Dieser Zusammenhang ist darin begründet, dass die Porenluft, deren Wärmeleitfähigkeit wesentlich geringer ist, als die des Feststoffs, den Wärmetransport stark beeinflusst. Die bei porösen Stoffen resultierende Wärmeleitfähigkeit entspricht somit einer "effektiven Wärmeleitfähigkeit".⁷⁶

Das Messprinzip zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit beruht bei Verwendung eines Plattengerätes auf der Herstellung eines gleichmäßigen und in eine Richtung wirkenden Wärmestroms durch die zu prüfende Probe. Im Rahmen der Vorbereitung der Laboruntersuchungen wurden verschiedene Verfahren zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit in Betracht gezogen. So kam neben dem Zwei-Platten-Verfahren und dem Ein-Platten-Verfahren, auch das Hot-Disk-Verfahren in Frage. Die drei Messverfahren wurden im Rahmen der Laboruntersuchungen erprobt. Als Referenzverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde schließlich das Hot-Disk-Verfahren gewählt, da es im Vergleich zum Ein- und Zwei-Platten-Verfahren die genaueren Ergebnisse lieferte.

Versuchsdurchführung am Ziegel

Für die Durchführung der Versuche wurde das Gerät "Hot Disk TPS 1500" des Herstellers Hot Disk genutzt. Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte an drei identisch zugesägten Probenpaaren des Ziegels Z_{16} (Z_{16} -A/-B, Z_{16} -C/-D und Z_{16} -E/-F). In der Vorbereitungsphase der Versuche wurden die Ziegelproben bei 105 °C bis zum Erreichen der Massenkonstanz getrocknet und anschließend zum Auskühlen in einen Exsikkator gelegt (siehe Abb. 237). Da bei der Hot-Disk-Messung die zu prüfenden Proben die gleiche Temperatur, wie Prüfumgebung aufweisen müssen, wurden diese zuvor über mehrere Tage im genau temperierten Prüfraum des Labors (im Exsikkator lagernd) auf eine Labortemperatur von 20 °C (siehe Abb. 238) konditioniert.

In den Geräteeinstellungen wurde die kürzest mögliche Messdauer von 20 Sekunden ausgewählt, sodass sich mit dem Kalibrierungsvorgang des Geräts eine Gesamtprüfdauer von ca. 2 Minuten und 20 Sekunden ergab. In der Summe waren die Ziegelproben unter Berücksichtigung des Ein- und Ausbauvorgangs maximal 5 Minuten der Umgebungsluft ausgesetzt, sodass sie kaum Feuchtigkeit durch Adsorption aufnehmen konnten.

⁷⁴ WILLEMS 2006, S. 2.3

 $^{^{75}}$ CAMMERER 1995, S. 26, S. 36 - 37, S. 41 und S. 67

⁷⁶ WILLEMS 2013, S. 10

Zudem musste in den Geräteeinstellungen eine ausreichend hohe Wärmeleistung zur Durchführung der Prüfung ausgewählt werden. Hierfür erwies sich ein Niveau von 100 mW als zielführend, da bei höheren Leistungswerten zu hohe Temperaturen im Rahmen des Messvorgangs auftraten.



Abb. 237 - Lagerung der Ziegelproben im Exsikkator vor der Messung nach dem Hot-Disk-Verfahren, A20



Abb. 238 - Lufttemperatur im klimatisierten Prüfraum des Labors, A20

Im nächsten Schritt wurde zwischen den zu prüfenden Ziegelpaaren ein flächiger Sensor, der als Wärmequelle und Temperaturfühler diente, eingebaut (siehe Abb. 240 bis Abb. 242). Dabei war zu beachten, dass die Proben eine möglichst plane Oberfläche besitzen und direkt aufeinanderliegen, um die Messung nicht durch Luftentschlüsse zu beeinflussen. Die Maße der Proben betrugen in der Länge 7,15 cm bis 7,50 cm, in der Breite 3,70 cm bis 6,70 cm und in der Höhe 1,90 cm bis 2,00 cm. Zudem wurde die Position des Sensors auf allen Ziegelproben markiert (siehe Abb. 239), damit bei den nachfolgenden Messungen zur Wärmeleitfähigkeit (trocken und feucht) die gleiche Mess- bzw. Sensorposition gegeben ist. Damit sollte auch der Einfluss von Materialinhomogenitäten auf die Messergebnisse reduziert werden.



Abb. 239 - Probenpaar Z₁₆-A/-B mit Kennzeichnung der Mess- bzw. Sensorposition, A20



Abb. 240 - Einbau der Probe $\rm Z_{16}\text{-}A$ in die Halterung des Hot-Disk-Gerätes, A20

In der Summe wurden zwei Messreihen mit den 3 Probenpaaren (Z_{16} -A/-B, Z_{16} -C/-D und Z_{16} -E/-F) durchgeführt. Aus dem arithmetischen Mittel der sechs Messwerte ergab sich nun die repräsentative Wärmeleitfähigkeit des Referenzziegel Z-16 für den Zustand trocken und die Messtemperatur 20 °C zu 0,732 W/(mK).



Abb. 241 - Einbau der Probe Z_{16} -A/-B in die Halterung des Hot-Disk-Gerätes, A20

Versuchsdurchführung am Mörtel



Abb. 242 - Durchführung der Hot-Disk-Messung mit dem dazugehörigen Deckel, A20

Die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung für die Proben des Mauermörtels erfolgten analog zu den Messungen am Referenzziegel. Es standen insgesamt zwei Probenpaare, die aus dem Zuschnitt der Probe M_{P1} -1 resultierten, zur Verfügung. Eines der beiden Probenpaare (M_{P1} -A/-B) ist mit der eingezeichneten Sensorposition auf Abb. 243 dargestellt. Die Abmessungen der einzelnen Proben betrugen in der Länge 5,60 cm bis 11,40 cm, in der Breite 4,00 cm bis 4,30 cm und in der Höhe 2,90 cm. Der Versuchsaufbau infolge der Hot-Disk-Messung kann am Beispiel des Probenpaars M_{P1} -A/-B der Abb. 244 entnommen werden. Insgesamt erfolgten mit den Probenpaaren des Mauermörtels vier Messreihen. Über das arithmetische Mittel der acht Messwerte ließ sich die repräsentative Wärmeleitfähigkeit des Mörtels für den Zustand trocken und die Messtemperatur 20 °C mit 0,853 W/(mK) bestimmen.



Abb. 243 - Probenpaar M_{P1} -A/-B mit Kennzeichnung der Mess- bzw. Sensorposition, A20



Abb. 244 - Einbau des Probenpaars M_{P1} -A/-B in die Halterung des Hot-Disk-Gerätes, A20

Nachbereitung

Da in der Simulationssoftware die Eingabe der Wärmeleitfähigkeit (trockener Materialzustand) für 10 °C erforderlich ist, die Hot-Disk-Messungen jedoch bei 20 °C erfolgten, müssen die Messwerte in Hinblick auf die Temperaturabhängigkeit korrigiert werden. Diese Temperaturkorrektur auf 10 °C erfolgte mit dem Anpassungsfaktor α in Höhe von 0,0002 W/(mK²). Die mit dem Anpassungsfaktor korrigierte Wärmeleitfähigkeit (trocken, 10 °C) beläuft sich beim Referenzziegel auf 0,730 W/(mK) und beim Mauermörtel auf 0,851 W/(mK).

Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, trocken

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (trocken) μ ist ein Materialparameter zur Beurteilung der Dampfdichtheit eines Stoffes. Sie dient als einheitslose Vergleichszahl, die angibt, um wie viel Mal der Diffusionswiderstand einer Materialschicht größer ist, als der Diffusionswiderstand einer gleich dicken Luftschicht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit der Änderung des Wassergehaltes eines Stoffes auch dessen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl variiert, sodass sich ein oberer und ein unterer Grenzwert ergeben. Der höhere μ -Wert beschreibt dabei den trockenen Zustand mit einem größeren Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion. Der niedrigere μ -Wert entspricht der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl eines Stoffes im feuchten Zustand und steht somit für einen kleineren Dampfdiffusionswiderstand.⁷⁷

Zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl für den trockenen Stoffzustand kann das sogenannte Dry-Cup-Verfahren gemäß DIN EN ISO 12572 sowohl bei hygroskopischen als auch bei nicht hygroskopischen Baustoffen angewendet werden. Dabei wird eine zu prüfende Probe in der offenen Seite eines Prüfgefäßes, das ein Trockenmittel enthält, befestigt. Das Prüfgefäß mit der befestigten Probe ist daraufhin in einen Klimaschrank zu stellen. In diesem sind die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit regulierbar, sodass unterschiedliche Wasserdampfteildrücke zwischen dem Luftraum im Prüfgefäß und dem Luftraum im Klimaschrank erzeugt werden können. Der sich einstellende Dampfdruckunterschied verursacht nun einen Wasserdampfdiffusionsstrom durch die dampfdurchlässige Probe in das Prüfgefäß. Mit Hilfe von periodischen Wägungen des Prüfgefäßes kann nun die Wasserdampfdiffusionsstromdichte im stationären Zustand ermittelt werden, aus der sich wiederum die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ergibt.⁷⁸

Die Probekörper wurden hierfür zunächst in einer geeigneten Größe aus dem zu untersuchenden Material geschnitten. Bei der Vorbereitung der Probekörper sollte die Oberfläche möglichst nicht verändert werden, sodass deren Oberflächenbeschaffenheit (z.B. Brennhaut beim Ziegel) möglichst erhalten blieb.⁷⁹ Jedoch wurden die Ziegel- und Mörtelproben nicht nur im unbehandelten, sondern auch im hydrophobierten Zustand hinsichtlich der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (trocken) untersucht. Die erforderlichen Wägungen der Prüfgefäße sind dabei in regelmäßigen Abständen solange durchgeführt worden, bis sich bei fünf aufeinanderfolgenden Wägungen eine Schwankung der Messwerte um weniger als 5 % zum Mittelwert der Messwerte einstellte.

Versuchsdurchführung am unbehandelten Ziegel

Für die Versuchsdurchführung am unbehandelten Ziegel, war es nicht möglich auf eine Probe des Referenzziegels Z-16 zurückzugreifen, sodass zwei Proben des Ziegels Z-9, der eine vergleichbare Rohdichte besitzt, verwendet werden mussten. Beide Proben (Z_9 -1.1.1 und Z_9 -1.1.2) mit einem Durchmesser von 6,5 cm und einer Höhe von 3,4 cm kamen sowohl im unbehandelten als auch im hydrophobierten Zustand zum Einsatz.

⁷⁷ CAMMERER 1995, S. 116 - 117

Vgl. KRUS 1995, S. 12 -13; HEGGER 2007, S. 265

⁷⁸ DIN EN ISO 12572, S. 5, 7

⁷⁹ DIN EN ISO 12572, S. 8

Vor dem Beginn des Dry-Cup-Versuchs wurden die Ziegelproben bei einer Temperatur von 23 °C und bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % in einem Klimaschrank konditioniert. Nach der Auswahl der Prüfgefäße erfolgte die Vorbereitung des Trocknungsmittels (Silicagel). Eine kräftig orangene Färbung des Silicagels bedeutet, dass die Substanz trocken ist. Verblasste oder gar weiße Kügelchen weisen hingegen auf eine bereits stattgefundene Aufnahme von Feuchtigkeit hin. Um zu gewährleisten, dass das Silicagel beim Befüllen des Prüfgefäßes voll feuchtigkeits-aufnahmefähig ist und über einen ausreichend langen Zeitraum eine relative Luftfeuchtigkeit von 0 % im Prüfgefäß sicherstellen konnte, wurde dieses für mehrere Stunden bei 105 °C getrocknet. In einem Exsikkator konnte das Silicagel schließlich auf Raumtemperatur abkühlen. Die Ziegelproben wurden für den Versuch zunächst an der Mantelfläche mit Wachs bestrichen (siehe Abb. 245) und anschließend in die mit dem abgekühlten Silicagel gefüllten Prüfgefäße gedrückt. Dabei wurde die unbehandelte Ziegeloberfläche nach oben in die Gefäße eingebracht, sodass der Diffusionsstrom diese Schicht, wie in der realen Anwendung auch, zuerst durchdringen musste (siehe Abb. 246). Durch Ausfüllen der Fuge zwischen Probe und Gefäß mit Wachs konnte eine wasserdampfundurchlässige Dichtung hergestellt werden. Die fertigen Dry-Cups (siehe Abb. 246) wurden anschließend gewogen, in einen Klimaschrank gestellt und bei einer Temperatur von 23 °C sowie einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % über mehrere Tage konditioniert. Die Wägungen erfolgten regelmäßig im Abstand von 24 Stunden. Über das arithmetische Mittel der zwei Messergebnisse der Ziegelproben ergab sich eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in Höhe von 12,72.



Abb. 245 - Einstreichen der Mantelfläche einer der beiden Ziegelproben mit Wachs, A20



Abb. 246 - Fertiggestellte Dry-Cups mit Ziegelproben vor dem Hineinstellen in einen Klimaschrank, A20

Versuchsdurchführung am hydrophoben Ziegel

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (trocken) für den hydrophobierten Zustand wurde mit denselben Ziegelproben Z₉-1.1.1 und Z₉-1.1.2 bestimmt. Dadurch sollte einerseits der Einfluss von Materialinhomogenitäten auf die Ergebnisse der Messungen reduziert und andererseits eine bessere Vergleichbarkeit zwischen dem behandelten und unbehandelten Zustand erzielt werden. Nach der Hydrophobierung und Trocknung der beiden Ziegelproben erfolgten die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung sowie die Versuchsauswertung in der gleichen Form, wie für die Proben im unbehandelten Zustand. Aus dem arithmetischen Mittel der beiden Messergebnisse ergab sich die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in Höhe von 18,64. Gegenüber dem unbehandelten Zustand ist diese somit etwas höher.

Versuchsdurchführung am unbehandelten Mörtel

Für die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (trocken) am Mauermörtel standen insgesamt sechs Proben zur Verfügung. Aufgrund des Zuschnitts der Mörtelproben M_{P3} -1 und M_{P6} -1 ergaben sich jeweils drei Proben mit glatter sowie rauer Oberseite (siehe Abb. 247). Im Rahmen der Versuchsdurchführung am unbehandelten Mauermörtel kamen die Proben M_{P3} -1.2.1, M_{P6} -1.2.1 und M_{P6} -1.2.3 mit einem Durchmesser von 7,6 cm und einer Höhe von 3,3 cm zum Einsatz.



Abb. 247 - Zylinderförmige Mörtelproben, A20



Abb. 248 - Dry-Cups mit Mörtelproben, A20

Die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung erfolgten nach demselben Prinzip wie bei den Ziegelproben. Auf Abb. 248 sind die eingedichteten Mörtelproben dargestellt. Die Probe M_{P3} -1.2.1 wurde dabei mit der glatten Oberfläche und die Proben M_{P6} -1.2.1 sowie M_{P6} -1.2.3 mit der rauen Oberfläche nach oben zeigend in das Prüfgefäß eingesetzt. Über das arithmetische Mittel der drei Messungen ergibt sich eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in Höhe von 14,90 für den Mörtel im unbehandelten Zustand.

Versuchsdurchführung am hydrophoben Mörtel

Beim hydrophobierten Mörtel erfolgten die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung analog zu den Versuchen an den hydrophobierten Ziegelproben. Nach der Hydrophobierung und Trocknung wurden die Proben M_{P3} -1.2.2-hyd sowie M_{P3} -1.2.3-hyd mit der glatten Oberfläche und die Probe M_{P6} -1.2.2-hyd mit der rauen Oberfläche nach oben zeigend in das Prüfgefäß eingedichtet. Die hydrophobierten Proben hatten mit einem Durchmesser von 7,7 cm und einer Höhe von 3,3 cm in etwa die gleichen Abmessungen, wie die unbehandelten Mörtelproben. Nach dem Abschluss der Untersuchungen ergab sich die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des hydrophobierten Mauermörtels aus dem arithmetischen Mittel der drei Messergebnisse zu 20,80. Alle gemessenen μ -Werte für den Ziegel und den Mauermörtel sind in Tab. 77 zusammengefasst.

Tab. 77 - Übersicht der ermittelten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl für die Ziegel- und Mörtelproben, T8

Probe. Probenzustand	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ
	[-]
Ziegel, unbehandelt	12,72
Ziegel, hydrophobiert	18,64
Mörtel, unbehandelt	14,90
Mörtel, hydrophobiert	20,80

4.2.3 Hygrothermische Funktionen

Durch die Angabe von hygrothermischen Funktionen in der Simulationssoftware "WUFI Plus" kann das hygrothermische Verhalten von Bauteilen noch genauer untersucht werden. Es handelt sich dabei um die Feuchtespeicherfunktion, die Flüssigtransportkoeffizienten, die feuchteabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, die feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit sowie um die temperaturabhängige Enthalpie. Im Gegensatz zu den Grundkennwerten ist jedoch die Angabe von hygrothermischen Funktionen für die Simulationen nicht zwingend notwendig, da diese in der Simulationssoftware "WUFI Plus" auch über die sogenannten Approximationsparameter (siehe Abschnitt 4.2.4 Approximationsparameter) mit guter Näherung generiert werden können. Hinsichtlich der angestrebten Genauigkeit der Simulationsergebnisse ist allerdings eine individuelle Abwägung zwischen experimenteller Messung und Approximation notwendig.

Feuchtespeicherfunktion

Die Feuchtespeicherfunktion eines hygroskopischen Stoffs beschreibt den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und dem sich im Stoff einstellenden Wassergehalt bis hin zur freien Wassersättigung. Zum Aufstellen der Feuchtespeicherfunktion sind Messungen im hygroskopischen Feuchtigkeitsbereich bzw. im Sorptionsfeuchtebereich (relative Luftfeuchtigkeit bis 95 %) und im Kapillarwasserbereich (relative Luftfeuchtigkeit über 95 %) erforderlich. Wassergehalte oberhalb freier Wassersättigung liegen im Übersättigungsbereich, der beim maximalen Wassergehalt endet.⁸⁰

Die Feuchtespeicherfunktion setzt sich zusammen aus der Sorptionsisotherme für Wassergehalte bis etwa 95 % relativer Luftfeuchtigkeit sowie der Saugspannungskurve für Wassergehalte über 95 % relativer Luftfeuchtigkeit. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die Sorptionsisotherme für eine ausgewählte Probe des Referenzziegels Z-16 und des Mauermörtels (angefertigt und Bestand) experimentell mittels DVS-Messungen und gravimetrischen Kontrollmessungen am Dahlberg-Institut bestimmt. Der weitere Verlauf der Feuchtespeicherfunktion wird im Kapillarwasserbereich durch die freie Wassersättigung definiert. Die Abb. 249 bis Abb. 251 zeigen das verwendete DVS-Messgerät.



Abb. 249 - DVS-Messgerät zur Ermittlung der Sorptionsisothermen, A20



Abb. 250 - Bereich zum Einlegen der Probe im DVS-Messgerät, A20



Abb. 251 - Eingelegte Mörtelprobe im DVS-Messgerät, A20

⁸⁰ FOUAD 2015, S. 175

Vgl. KÜNZEL 1994, S. 8

Versuchsdurchführung am unbehandelten Ziegel

Für die DVS-Messungen wurde ein Bruchstück der Probe Z_{16} -1.3 (Kernmaterial von Ziegel Z-16), eine Bestandsprobe aus einer Mörtelfuge der Versuchsgebäude sowie ein Bruchstück die Probe M_{P3}-1 verwendet. Zur Verdeutlichung der Probengröße sind diese in Abb. 252 und Abb. 253 dargestellt.



Abb. 252 - Größenvergleich der Proben Z₁₆-1.3 (links), Bestandsmörtel (mittig) und M_{P3}-1 (rechts), A20



Abb. 253 - Größenvergleich der Proben Z₁₆-1.3 (links), Bestandsmörtel (mittig) und M_{P3}-1 (rechts), A20

Im Rahmen der Vorbereitung der DVS-Messungen wurde die Ziegelprobe Z₁₆-1.3 zunächst bis zur Massenkonstanz getrocknet. Daraufhin erfolgte die Entnahme eines Bruchstücks, das im Anschluss in das DVS-Messgerät eingesetzt wurde. Nach einer erneuten Trocknung der Probe im Messgerät ist die eigentliche Messung bei einer Temperatur von 23 °C durchgeführt worden. Die Messergebnisse sind in Abb. 254 und Abb. 255 dargestellt. Abb. 254 veranschaulicht die Änderung der Probenmasse und der relativen Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Dauer der Messung. In Abb. 255 sind die Sorptionsisotherme (Feuchteaufnahme) und die Desorptionsisotherme (Feuchteabgabe) dargestellt.



Luftfeuchtigkeit für die Ziegelprobe Z₁₆-1.3, A20



Aus dem Messprotokoll zur relativen Luftfeuchtigkeit und der damit verbundenen Massenänderung konnte der Wassergehalt der Probe in kg/m³ abgeleitet werden. In Kombination mit dem Messwert der freien Wassersättigung (siehe Abschnitt 4.2.4 Approximationsparameter) wurde im Folgenden die Feuchtespeicherfunktion entwickelt. Die einzelnen Punkte diese Feuchtespeicherfunktion sind in Tab. 78 für das Bruchstück der Ziegelprobe Z₁₆-1.3 dargestellt. Der Bezugsfeuchtegehalt (violett) wurde dabei mittels linearer Interpolation aus den Messergebnissen abgeleitet. Der Messwert für die freie Wassersättigung, der einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % entspricht, ist blau hinterlegt.

Relative Luftfeuchtigkeit	Wassergehalt	Wassergehalt		
[%]	[M%]	[kg/m³]		
0,000	0,000	0,000		
10,217	0,011	0,189		
21,750	0,019	0,325		
32,050	0,028	0,481		
42,450	0,037	0,651		
52,550	0,049	0,854		
63,117	0,064	1,111		
73,700	0,086	1,501		
80,000	0,112	1,940		
83,550	0,126	2,188		
92,950	0,238	4,130		
97,800	0,451	7,829		
100,000	15,923	276,630		

Tab. 78 - Feuchtespeicherfunktion für den Referenzziegel Z-16 basierend auf DVS-Messungen mit Z₁₆-1.3, T8 Bruchstück aus Z₁₆-1.3 (Rohdichte: 1737.31 kg/m³, DVS-Messung bei 23 °C)

Versuchsdurchführung am unbehandelten Mörtel

Die DVS-Messung für den Mauermörtel wurde an zwei unterschiedlichen Proben vorgenommen. Hierbei wurden ein Bruchstück des Bestandsmörtels aus Versuchsgebäude 2 (nicht hydrophobiert) und ein Bruchstück aus der Mörtelprobe M_{P3}-1 (Kernmaterial) geprüft. Die Vorbereitung und die eigentliche DVS-Messung erfolgten nach demselben Prinzip wie bei der Ziegelprobe Z₁₆-1.3. In der Abb. 256 und der Abb. 257 sind die Änderungen der Probenmasse und die dazugehörige relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Messzeit aufgeführt. Aus der Abb. 258 und der Abb. 259 können die Sorptionsisotherme (Feuchteaufnahme) und die Desorptionsisotherme (Feuchteabgabe) für beide Mauermörtelproben entnommen werden. Gegenüber der Ziegelprobe zeigt sich hier eine deutlich größere Hysterese zwischen Sorptions- und Desorptionsisotherme.



Abb. 256 - Änderung der Probenmasse und der relativen Luftfeuchtigkeit für den Bestandsmörtel, A20



Abb. 257 - Änderung der Probenmasse und der relativen Luftfeuchtigkeit für die Mörtelprobe M_{P3}-1, A20



Abb. 258 - Sorptions- und Desorptionsisotherme für den Bestandsmörtel, A20



Abb. 259 - Sorptions- und Desorptionsisotherme für die Mörtelprobe M_{P3} -1, A20

Analog zur Ziegelprobe Z₁₆-1.3 erfolgte nach der DVS-Messung für die beiden Mauermörtelproben die Entwicklung der Feuchtespeicherfunktion (Tab. 79 und Tab. 80). Da die DVS-Messung für den Bestandsmörtel nur als Vergleichsmessung genutzt und nicht in die Simulationssoftware überführt werden sollte, wurde auf die Bestimmung der freien Wassersättigung verzichtet. Die in der Tab. 79 aufgeführte Feuchtespeicherfunktion endet daher bei 98 % relativer Luftfeuchtigkeit. Für die Probe des Referenz-Mörtels (M_{P3}-1) ist hingegen die Feuchtespeicherfunktion um den Bezugsfeuchtegehalt (violett) sowie um die freie Wassersättigung (blau) erweitert worden, da diese in den Simulationen zur Anwendung kommen soll. Der Bezugsfeuchtegehalt wurde dabei durch Interpolation ermittelt, wohingegen die Bestimmung der freien Wassersättigung durch experimentelle Messungen erfolgte (siehe 4.2.4 Approximationsparameter). Hinsichtlich der Feuchtespeicherfunktionen von Mörtel und Ziegel (siehe Tab. 78 und Tab. 80) ist jedoch zu beachten, dass diese nur auf den Messwerten sehr kleiner Bruchstücke basieren. Es empfehlt sich daher die Messwerte punktuell zu überprüfen.

Bestandsmörtel aus Versuchsgebäude 2 (Rohdichte: 1884,92 kg/m ³ , DVS-Messung bei 23 °C)				
Relative Luftfeuchtigkeit	Wassergehalt	Wassergehalt		
[%]	[M%]	[kg/m³]		
0,000	0,000	0,000		
0,400	0,001	0,019		
10,250	0,032	0,602		
21,800	0,050	0,937		
32,100	0,083	1,571		
42,517	0,129	2,435		
52,683	0,190	3,575		
63,233	0,275	5,181		
73,783	0,390	7,348		
83,567	0,564	10,636		
93,100	1,070	20,172		
98,000	1,717	32,361		

Tab. 79 - Feuchtespeicherfunktion des Bestandsmörtels in einem Bereich bis 98 % relativer Luftfeuchtigkeit, T8

bruchstuck aus mp3-1 (Rondichet, 1706,56 kg/m, 5705-MeSsung ber 25 C)				
Relative Luftfeuchtigkeit	Wassergehalt	Wassergehalt		
[%]	[M%]	[kg/m³]		
0,000	0,000	0,000		
0,400	0,000	0,008		
10,150	0,089	1,565		
21,750	0,136	2,401		
32,050	0,190	3,362		
42,500	0,250	4,427		
52,633	0,318	5,624		
63,200	0,410	7,249		
73,767	0,545	9,633		
80,000	0,704	12,449		
83,700	0,798	14,120		
93,250	1,416	25,038		
98,133	2,061	36,441		
100,000	14,764	261,09		

Tab. 80 - Feuchtespeicherfunktion des Mauermörtels basierend auf DVS-Messungen mit M_{P3}-1, T8

Bruchstück aus M_{P3}-1 (Rohdichte: 1768,38 kg/m³, DVS-Messung bei 23 °C)

Nachbereitung für den Ziegel

Eine Möglichkeit die DVS-Messungen punktuell zu überprüfen bieten gravimetrische Messungen von größeren Proben, die mit Hilfe des Klimakammer-Verfahrens bei einer Temperatur von 23 °C und ausgewählten Werten der relativen Luftfeuchtigkeit konditioniert wurden. Entsprechend dieser Methode wurde der Ausgleichsfeuchtegehalt bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % und bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90 % für den Referenzziegel Z-16 als Vergleichswerte ermittelt (siehe Abschnitt 4.2.4 Approximationsparameter). In Tab. 81 sind die Ergebnisse dieser Messungen den Ergebnissen der DVS-Messung gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Abweichung 8,25 % bei 80 % relativer Luftfeuchtigkeit und 17,92 % bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit beträgt (Grundwert ist die DVS-Messung). Wird nun die gemessene und die approximierte Feuchtespeicherfunktion des Referenzziegel Z-16 den Messwerten nach dem Klimakammer-Verfahren gegenübergestellt, so wird deutlich, dass die DVS-Messung als repräsentativ eingestuft werden kann (siehe Abb. 260).

Tab.	81 -	Ausgleichsfeuchtegehalt o	es Referenzziegels Z-16 bei	80 % und 90 % relativer Lu	ftfeuchtigkeit, T8
		0 0	0		0 /

Magyarfahran	Relative Luftfeuchtigkeit	Ausgleichsfeuchtegehalt	
Messverfahren	[%]	[kg/m ³]	
DVS-Messung	00	1,94	
Klimakammer-Verfahren	80	2,10	
DVS-Messung	00	3,52	
Klimakammer-Verfahren	90	2,89	



Abb. 260 - Gemessene und approximierte Feuchtespeicherfunktion mit Vergleichswerten für den Referenzziegel Z-16, A20

Nachbereitung für den Mörtel

Im Vergleich zum Referenzziegel resultieren beim Referenz-Mörtel größere Abweichungen zwischen der DVS-Messung und den Messungen entsprechend dem Klimakammer-Verfahren (siehe Tab. 82). Diese belaufen sich auf 37,59 % bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % und auf 31,52 % bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90 % (Grundwert ist die DVS-Messung).

Tab. 82 - Ausgleichsfeuchtegehalt des Referenz-Mörtels bei 80 % und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit, T8

Maggyorfahran	Relative Luftfeuchtigkeit Ausgleichsfeuchtegehalt	
INIESSVEITalli Ell	[%]	[kg/m³]
DVS-Messung	80	12,45
Klimakammer-Verfahren	80	7,77
DVS-Messung	00	21,32
Klimakammer-Verfahren	90	14,60

Mit Abb. 261 wird deutlich, dass der Ausgleichsfeuchtegehalt bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit (entsprechend Klimakammer-Verfahren) näher an der approximierten Feuchtespeicherfunktion des Referenz-Mörtels liegt, als an dessen gemessene Feuchtespeicherfunktion. Zugleich ist dem Verlauf der gemessenen Feuchtespeicherfunktion aber auch zu entnehmen, dass die materialspezifischen Eigenschaften darin besser abgebildet werden, als in der approximierten Feuchtespeicherfunktion. Trotz der Abweichungen ist daher die gemessene Variante als repräsentativer einzuschätzen.



Abb. 261 Gemessene und approximierte Feuchtespeicherfunktion mit Vergleichswerten für den Referenz-Mörtel, A20

Flüssigtransportkoeffizienten

Bei der experimentellen Bestimmung des Flüssigtransportkoeffizienten, wird zwischen dem Vorgang des Saugens und dem Vorgang des Weiterverteilens unterschieden. Der Flüssigtransportkoeffizient für den Saugvorgang D_{ws} beschreibt die kapillare Wasseraufnahme bei vollständiger Benetzung der Bauteiloberfläche (z.B. bei einem Regenereignis). So stellt sich bei kapillarporösen Stoffen unter konstanter Wasserzufuhr eine kontinuierliche Feuchtigkeitsverteilung in Saugrichtung ein, da die größeren Kapillaren aufgrund ihres geringeren Strömungswiderstandes mit größerer Geschwindigkeit das Wasser aufsaugen, als die kleineren Kapillaren. Zugleich besitzen jedoch kleinere Kapillaren eine größere Saugkraft, als die größeren Kapillaren. Dies führt dazu, dass bei einer Unterbrechung der Wasserzufuhr, z.B. bei Ende der Beregnung, die kleineren und noch nicht gefüllten Kapillaren die größeren leer sagen und es zu einer Weiterverteilung der bereits aufgenommenen Flüssigkeit kommt. Dieser Vorgang des Weiterverteilens wird durch den zweiten Flüssigtransportkoeffizienten D_{ww} beschrieben. Weil das Weiterverteilen der Flüssigkeit jedoch deutlich langsamer abläuft als der Saugvorgang, fällt D_{ww} kleiner aus als D_{ws} .⁸¹ Die Bestimmung der beiden Transportkoeffizienten erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes in unterschiedlicher Form. Für den Saugvorgang ist der Koeffizient D_{ws} vereinfacht durch Approximation ermittelt worden. Der zur Beschreibung der Weiterverteilung erforderliche Koeffizient D_{ww} wurde hingegen mittels Trocknungsversuchen und iterativ durchgeführten Simulationsberechnungen mit der Software "WUF Pro 6.0" bestimmt.

Versuchsdurchführung am Ziegel – Weiterverteilen D_{ww}

Da nicht genügend Teilproben des Referenzziegels Z-16 zur Verfügung standen, kamen für die Trocknungsversuche am Dahlberg-Institut zwei Proben des Ziegels Z-9 zur Anwendung. Die beiden Proben Z₉-1.2.1.1 und Z₉-1.2.2 mit den Abmessungen 11,87 cm (L) x 7,21 cm (B) x 2,31 cm (H) sowie 11,70 cm (L) x 11,95 cm (B) x 2,50 cm (H) wurden zuerst bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet, um daraufhin deren Masse zu bestimmen. Danach erfolgte gemäß DIN EN 13755 die Einstellung der freien Wassersättigung. Für den sich anschließenden Trocknungsversuch wurden die wassergesättigten Proben in Aluminium-Folie eingehüllt (siehe Abb. 262), sodass lediglich eine Fläche zur Austrocknung frei blieb. Die Konditionierung der Proben erfolgte nun im Klimaschrank bei einer Temperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % (siehe Abb. 263).



Abb. 262 - Proben Z₉-1.2.1.1 und Z₉.1.2.2 eingehüllt in Aluminium-Folie, A20



Abb. 263 - Trocknungsversuch der beiden Ziegelproben im Klimaschrank, A20

⁸¹ FOUAD 2015, S. 178

Vgl. KRUS 1995, S. 16; WUFI Pro 6.0, Online-Hilfe, Thema 15

Zu Beginn und dann regelmäßig im weiteren Verlauf des Trocknungsversuchs wurden Wägungen der beiden Ziegelproben durchgeführt und deren Wassergehalt berechnet. Aus Abb. 264 kann der Verlauf des Wassergehalts beider Proben (Trocknungsverlauf) über die Versuchsdauer entnommen werden. Der Trocknungsversuch wurde nach 480 Stunden bzw. 20 Tagen beendet, da sich in den beiden Proben ein Ausgleichsfeuchtegehalt zu den Bedingungen im Klimaschrank einstellte.



Abb. 264 - Trocknungsverlauf der Ziegelproben Z9-1.2.1.1 und Z9-1.2.2, A20

Versuchsdurchführung am hydrophoben Ziegel - Weiterverteilen D_{ww}

Zur Bestimmung des Flüssigtransportkoeffizienten Weiterverteilen D_{ww} des hydrophobierten Ziegels Z-9 wurden dieselben Proben (Z₉-1.2.1.1 und Z₉-1.2.2), wie für den Versuch am unbehandelten Ziegel herangezogen. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass die Ergebnisunterschiede nicht durch Materialinhomogenitäten hervorgerufen wurden. Zudem war ein besserer Vergleich der beiden Materialzustände (unbehandelt und hydrophobiert) möglich. Mit Ausnahme des Auftragens der Hydrophobierungscreme erfolgten die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung analog zum unbehandelten Ziegel. Beim Einstellen der freien Wassersättigung beider Proben war erkennbar, dass die hydrophoben Eigenschaften voll ausgebildet waren, da diese nach einer Stunde Lagerung in Wasser kein erkennbares Saugverhalten zeigten (siehe Abb. 265). Zudem konnte festgestellt werden, dass es im Kontaktbereich zur Ziegelprobe zu einer typischen konvexen Wölbung der Wasseroberfläche kam. Auch dieser Effekt bestätigt optisch die Wirksamkeit der Hydrophobierung (siehe Abb. 266).



Abb. 265 - Ziegelproben Z₉-1.2.1.1-hyd und Z₉-1.2.2-hyd nach einer Stunde Lagerung in Wasser, A20



Abb. 266 - Konvexe Wölbung der Wasseroberfläche im Kontaktbereich zur Ziegelprobe, A20

Nach dem Wiegen und Einhüllen der wassergesättigten Ziegelproben in Aluminiumfolie wurden diese in den Klimaschrank gegeben. Der dabei resultierende Trocknungsverlauf kann der Abb. 267 entnommen werden. Der Versuch wurde nach 336 Stunden (14 Tagen) beendet. Anhand der Trocknungskurve wird deutlich, dass sich die endgültige Ausgleichsfeuchte bereits nach etwa 240 Stunden (10 Tage) einstellte.



Abb. 267 - Trocknungsverlauf der Ziegelproben Z9-1.2.1.1-hyd und Z9-1.2.2-hyd, A20

Versuchsdurchführung am Mörtel - Weiterverteilen D_{ww}

Der Trocknungsversuch für den Mauermörtel wurde an drei Proben mit den Kurzbezeichnungen M_{P3} -1.1.2, M_{P3} -1.3.1 und M_{P6} -1.1.1.1 durchgeführt, die z.T. durch ähnliche Maße gekennzeichnet waren, wie die Proben des Ziegels Z-9. Diese betrugen 12,42 cm (L) x 12,16 cm (B) x 2,60 cm (H), 11,68 cm (L) x 6,30 cm (B) x 2,65 cm (H) und 8,31 cm (L) x 7,08 cm (B) x 2,63 cm (H). Die Versuchsmethodik mit Vorbereitung, Durchführung und Auswertung erfolgte analog zu den Versuchen an den unbehandelten und hydrophobierten Proben des Ziegels Z-9 (siehe Abb. 268 und Abb. 269).



Abb. 268 - Proben $M_{\text{P3}}\text{-}1.1.2,\,M_{\text{P3}}\text{-}1.3.1$ und $M_{\text{P6}}\text{-}1.1.1.1$ des Mauermörtels eingehüllt in Aluminiumfolie, A20



Abb. 269 - Trocknungsversuch der drei Mörtelproben im Klimaschrank, A20

Der Trocknungsversuch der drei Mörtelproben wurde mit dem Erreichen der Ausgleichsfeuchte für 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit nach 312 Stunden (13 Tage) beendet. Allerdings stellte sich die Massenkonstanz der Proben bereits nach 240 Stunden (10 Tage) ein. Die dabei bestimmten Trocknungskurven sind in Abb. 270 dargestellt.



Abb. 270 - Trocknungsverlauf der Mörtelproben $\rm M_{P3}$ -1.1.2, $\rm M_{P3}$ -1.3.1 und $\rm M_{P6}$ -1.1.1.1, A20

Versuchsdurchführung am hydrophoben Mörtel - Weiterverteilen D_{ww}

Da die angefertigten Mörtelproben aus einer Charge stammten (siehe Abschnitt 4.2.1 Vorarbeiten), war davon auszugehen, dass diese die gleichen oder zumindest sehr ähnliche Materialeigenschaften aufweisen. Daher wurden bei der Durchführung des Trocknungsversuchs für den hydrophobierten Zustand andere Mörtelproben verwendet (M_{P3} -1.1.1-hyd und M_{P6} -1.1.2-hyd), als zuvor beim Trocknungsversuch für den unbehandelten Zustand des Mörtels zur Anwendung kamen. Es sind aber mit 8,16 cm (L) x 7,35 cm (B) x 2,58 cm (H) und 12,44 cm (L) x 11,57 cm (B) x 2,74 cm (H) sehr ähnliche Probenmaße gewählt worden, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse für den unbehandelten Zustand der Mörtelproben sicherzustellen. Nach der Hydrophobierung und einer zehntägigen Trocknung der Proben, erfolgten die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung analog zu dem Versuch am unbehandelten Mörtel. Die dabei ermittelten Trocknungskurven können der nachfolgend aufgeführten Abb. 271 entnommen werden.



Abb. 271 - Trocknungsverlauf der hydrophoben Mörtelproben MP3-1.1.1.1-hyd und MP6-1.1.2-hyd, A20

Anhand der in Abb. 271 dargestellten Trocknungskurven wird deutlich, dass der Trocknungsversuch nach 336 Stunden (14 Tagen) beendet wurde. Es hatte sich aber bereits vorher, nach etwa 168 Stunden (7 Tagen), ein Ausgleichsfeuchtegehalt entsprechend der im Klimaschrank vorhandenen Bedingungen von 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit in den Proben eingestellt.

Nachbereitung

Bestimmung des Flüssigtransportkoeffizienten - Saugen Dws

Bevor der Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen mittels der Trocknungskurven und iterativen Simulationsberechnungen bestimmt werden konnte, war der Transportkoeffizient für das Saugen zu approximieren. Bei Bauteilen, die lediglich kurzfristigen Feuchtigkeitseinwirkungen ausgesetzt sind, wie z.B. durch Regenereignisse, liefert die Approximation des Flüssigtransportkoeffizienten D_{ws} mit Gl. 8 eine ausreichende Genauigkeit.⁸²

$D_{ws}(w) = 3.8 \left(\frac{A}{w_f}\right)^2 1000^{\left(\frac{W}{w_f}\right)-1}$		
D_{ws}	Flüssigtransportkoeffizient für kapillares Saugen	$[m^2/s]$
W	Wassergehalt	[kg/m³]
А	Wasseraufnahmekoeffizient	$[kg/(m^2s^{0,5})]$
W _f	Freie Wassersättigung	[kg/m³]

Gl. 8 bildet in Abhängigkeit vom Wassergehalt näherungsweise den Zusammenhang zwischen dem Flüssigtransportkoeffizienten beim kapillaren Saugen, dem Wasseraufnahmekoeffizienten und der freien Wassersättigung ab. Dieser Ansatz kam auch in Rahmen der Simulationsberechnungen mit "WUFI Plus" zur Anwendung. Mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten, der freien Wassersättigung und der Feuchtespeicherfunktion konnte in WUFI automatisch der Flüssigtransportkoeffizient D_{ws} für den Wassergehalt w₈₀ (Bezugsfeuchtegehalt) und w_f (freie Wassersättigung) abgeleitet werden. Zu berücksichtigen ist jedoch dabei, dass die Funktion gemäß Gl. 8 nicht für Wassergehalte über der freien Wassersättigung angewendet werden kann (Übersättigungsbereich), da hier kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Kapillartransport und dem Wassergehalt besteht.⁸³

Bestimmung des Flüssigtransportkoeffizienten - Weiterverteilen D_{ww}

Anhand des approximierten Flüssigtransportkoeffizienten für das kapillare Saugen D_{ws} und der im Labor ermittelten Trocknungskurven konnte nun der Koeffizient für das Weiterverteilen D_{ww} mittels hygrothermischen Simulationsberechnungen bestimmt werden. Hierfür wurde zunächst aus den Trocknungskurven eine repräsentative Probe ausgewählt. Anschließend erfolgte das Abbilden der Probe (Dicke und Materialparameter), der Bedingungen im Klimaschrank (Klimabedingungen) und der Versuchsdauer (Simulationsdauer) in der Simulationssoftware. Durch iteratives Anpassen des Wärmeübergangswiderstands (erster Schritt) und des Flüssigtransportkoeffizienten Weiterverteilen für die Wassergehalte w80 und wf (zweiter Schritt) wurde nun angestrebt eine gute Näherung zum realen Trocknungsverlauf zu reproduzieren. Alternativ hätte der Flüssigtransportkoeffizient für den Vorgang des Weiterverteilens auch durch Approximation näherungsweise bestimmt werden können. Dies erfolgt in der Simulationssoftware WUFI indem für D_{ww} (w₈₀) der Koeffizient D_{ws} (w₈₀) mit dem Divisor 1 und für D_{ww} (w_f) der Koeffizient D_{ws} (w_f) mit dem Divisor 10 angesetzt wird.

⁸² KÜNZEL 1994, S. 26

⁸³ KÜNZEL 1994, S. 26

Unbehandelter Ziegel

Für die Bestimmung der Flüssigtransportkoeffizienten Saugen und Weiterverteilen wurde zunächst der Ziegel Z-9 in der Simulationssoftware angelegt. Hierfür waren aus Vorversuchen bereits die Rohdichte, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (trocken), der Bezugsfeuchtegehalt und die freie Wassersättigung bekannt. Die restlichen Materialparameter, wie die Porosität, die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität sowie der Wasseraufnahmekoeffizient, konnten durch die Messgrößen des Referenzziegels Z-16 ergänzt werden. Mit der Approximation der Feuchtespeicherfunktion und des Flüssigtransportkoeffizienten für den Saugvorgang lag schließlich ein vollständiger Datensatz des Ziegels Z-9 vor, sodass darauf basierend die iterative Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung erfolgen konnte (Ziel: Trocknungsverlauf Z₉-1.2.2). Die dabei ermittelten Werte für D_{ww} sind mit den approximierten Werte für D_{ws} und D_{ww} in Tab. 83 zusammengestellt.

Nr.	Wassergehalt		Flüssigtransportkoeffizient Saugen D _{ws}	Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D _{ww}	
[kg/m ³]		kg/m³]	[m ² /s]	[m²/s]	
1	w ₀	0	0	0	0
2	w ₈₀	39,49	1,39E-08	1,39E-08	2,40E-09
3	w _f	305,37	5,71E-06	5,71E-07	4,75E-08
Methode		de	Approximation	Approximation	Iteration

Tab. 83 - Ermittelte Flüssigtransportkoeffizienten des unbehandelten Ziegels Z-9, T8

Um die iterativ bestimmten Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung des Ziegels Z-9 auf den Referenzziegel Z-16 übertragen zu können, mussten diese angepasst werden. Hierfür wurden die iterativ bestimmten D_{ww} -Werte des Ziegels Z-9 zunächst über die dazugehörigen Wassergehalte w_0 , w_{80} und w_f aufgetragen. Damit resultierte ein Verlauf der D_{ww} -Werte von Z-9 in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Aus diesem funktionalen Zusammenhang wurden anschließend die D_{ww} -Werte des Ziegels Z-16 entsprechend dessen Bezugsfeuchte w_{80} und der freien Wassersättigung w_f ausgelesen. Der Flüssigtransportkoeffizient für den Saugvorgang von Z-16 wurde hingegen mit Hilfe von Gl. 8 approximiert. In Tab. 84 sind die Flüssigtransportkoeffizienten für das Saugen (Approximation) und für das Weiterverteilen (Approximation und Näherung nach Ziegel Z-9) zusammengestellt.

Tab. 84 - Ermittelte	Flüssigtransportkoeffizienten	des unbehandelten	Referenzziegels Z-16, T
----------------------	-------------------------------	-------------------	-------------------------

Nr.	Wassergehalt Nr. [kg/m³]		Flüssigtransportkoeffizient Saugen D _{ws}	Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D _{ww}	
			[m ² /s]	[m²/s]	
1	w ₀	0	0	0	0
2	w ₈₀	1,94	7,29E-09	7,29E-09	1,18E-10
3	w _f	276,63	6,95E-06	6,95E-07	4,26E-08
Methode		le	Approximation	Approximation	Iteration

Hydrophober Ziegel

Für die Bestimmung des Flüssigtransportkoeffizienten Saugen und Weiterverteilen des hydrophoben Referenzziegels Z-16 wurde analog zum unbehandelten Zustand vorgegangen. Auch hier erfolgte zuerst das Anlegen des hydrophobierten Ziegels Z-9 in der Simulationssoftware mit allen bereits ermittelten Stoffgrößen, wie der Rohdichte, der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (trocken), dem Bezugsfeuchtegehalt und der freien Wassersättigung. Weitere Stoffgrößen, wie die Porosität, die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und der Wasseraufnahmekoeffizient sind hingegen vom Ziegel Z-16 übernommen worden. Wie zuvor beim unbehandelten Zustand wurden die Feuchtespeicherfunktion und der Transportkoeffizient D_{ws} approximiert. Die sich anschließende Iteration mittels der hygrothermischen Simulation erfolgte in Hinblick auf den Trocknungsverlauf der Probe Z₉-1.2.2-hyd, da diese durch einen sehr gleichmäßigen Kurvenverlauf gekennzeichnet war (siehe Abb. 267). Zudem ging mit der Probe Z₉-1.2.2-hyd der Vorteil einher, dass diese bereits bei der Iteration für den unbehandelten Ziegelzustand als Referenzprobe genutzt wurde. Es ist somit für die D_{ww}-Werte beider Zustände (unbehandelt und hydrophobiert) eine gute Vergleichbarkeit gegeben. Eine Zusammenstellung der Transportkoeffizienten für das Saugen (Approximation) und für das Weiterverteilen (Approximation und Iteration) des Ziegels Z-9 ist Tab. 85 zu entnehmen.

Nr.	Wassergehalt r.		Wassergehalt Flüssigtransportkoeffizient Saugen D _{ws}		Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D _{ww}		
	[kg/m ³]		[m ² /s]	[m ²	²/s]		
1	w ₀	0	0	0	0		
2	w ₈₀	4,76	1,83E-13	1,83E-13	2,50E-10		
3	w _f	72,40	1,15E-10	1,15E-11	2,00E-09		
Methode		ode	Approximation	Approximation	Iteration		

Tab. 85 - Ermittelte Flüssigtransportkoeffizienten des hydrophoben Ziegels Z-9, T8

Analog zum unbehandelten Ziegel Z-9 wurden im nächsten Schritt die Untersuchungsergebnisse des hydrophoben Ziegels Z-9 auf den hydrophoben Referenzziegel Z-16 übertragen. In Tab. 86 sind die D_{ws}-Werte (Approximation) und die D_{ww}-Werte (Approximation und Näherung nach Ziegel Z-9) des hydrophoben Referenzziegels Z-16 aufgelistet.

Nr.	Wassergehalt		Flüssigtransportkoeffizient Saugen D _{ws}	Flüssigtransportkoeffizier Weiterverteilen D _{ww}	
	[kg/m ³]		[m²/s]	[m²/s]	
1	w ₀	0	0	0	0
2	w ₈₀	0,74	3,58E-13	3,58E-13	3,89E-11
3	w _f	43,71	3,18E-10	3,18E-11	1,26E-09
Methode		le	Approximation	Approximation	Iteration

Unbehandelter Mörtel

Zur iterativen Bestimmung des Flüssigtransportkoeffizienten Weiterverteilen für den unbehandelten Mörtel wurde der Trocknungsverlauf der Probe M_{P6} -1.1.1.1 als Referenz verwendet, da dieser im Vergleich zu den anderen beiden Kurven durch weniger Unregelmäßigkeiten gekennzeichnet war (siehe Abb. 270). In Tab. 87 sind die Ergebnisse der iterativ und durch Approximation bestimmten Transportkoeffizienten zusammengefasst.

Wassergehalt Nr.		Wassergehalt Flüssigtransportkoeffizient Saugen D _{ws}		Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D _{ww}		
	[kg/m³]		[m ² /s]	[m ²	² /s]	
1	w ₀	0	0	0	0	
2	w ₈₀	12,45	1,07E-08	1,07E-08	1,50E-10	
3	W _f	261,09	7,67E-06	7,67E-07	1,10E-07	
Methode		ode	Approximation	Approximation	Iteration	

Tab.	87 -	Ermittelte	Flüssigtrans	sportkoeffizienten	des	unbehandelten	Mörtels,	Т8
------	------	------------	--------------	--------------------	-----	---------------	----------	----

Hydrophober Mörtel

Beim hydrophobierten Mörtel stellte sich die iterative Bestimmung des Flüssigtransportkoeffizienten Weiterverteilen ähnlich dar, wie beim hydrophobierten Ziegel. Der Kurvenverlauf der ausgewählten Referenzprobe M_{P6} -1.1.2-hyd konnte näherungsweise nur dadurch erreicht werden, indem der Transportkoeffizient für das Weiterverteilen gegenüber dem approximierten Saugvorgang nicht reduziert, sondern durch eine iterative Anpassung vergrößert wurde. Diese Vorgehensweise zum Reproduzieren der gemessenen Trocknungskurve von M_{P6} -1.1.2-hyd oder Z_9 -1.2.2-hyd verdeutlicht, dass im hydrophoben Materialzustand der Flüssigtransport durch Weiterverteilung schneller erfolgt, als der Flüssigtransport durch Saugen. Im Rahmen der Untersuchung konnte jedoch nicht ermittelt bzw. überprüft werden, ob der approximierte Transportkoeffizient D_{ws} den Flüssigtransport Saugen der hydrophobierten Proben realistisch abbildet. Nachfolgend sind in Tab. 88 die Ergebnisse der iterativ und durch Approximation bestimmten Transportkoeffizienten zusammengefasst.

Tab. 88 - Ermittelte Flüssigtransportkoeffizienten	des hydrophoben Mörtels,	T8
--	--------------------------	----

Nr.	Wassergehalt Nr.		Flüssigtransportkoeffizient Saugen D _{ws}	Flüssigtransp Weiterver	ortkoeffizient teilen D _{ww}	
	[kg/m ³]	[kg/m ³] [m ² /s]		[m²/s]		
1	w ₀	0	0	0	0	
2	W ₈₀	6,07	3,91E-12	3,91E-12	3,91E-12	
3	w _f	51,45	1,72E-09	1,72E-10	5,00E-09	
Methode		ode	Approximation	Approximation	Iteration	

Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig

Eine Feuchteabhängigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ist bei porösen mineralischen Baustoffen nicht von großer Relevanz, da die Faktoren, die den gegenüber ruhender Luft erhöhten Diffusionswiderstand verursachen, im Allgemeinen nicht vom Wassergehalt beeinflusst werden. Obwohl bei sogenannten Wet-Cup-Messungen unter isothermen Prüfbedingungen auch bei porösen Baustoffen häufig eine feuchtigkeitsbedingte Abnahme der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl festgestellt werden kann, ist diese Änderung weniger auf einen reduzierten Dampfdiffusionsstrom zurückzuführen, sondern mehr auf einen zunehmenden Flüssigtransport durch Oberflächendiffusion. Unter isothermen Bedingungen erfolgt dieser in die gleiche Richtung, wie der Dampfdiffusionsstrom und führt damit zu einer scheinbaren Reduktion der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Materials. Unter nichtisothermen Bedingungen, die häufig am realen Bauteil bzw. Bauwerk gegeben sind, können die beiden Feuchtigkeitstransportmechanismen aber auch entgegengerichtet erfolgen. Aus diesem Grund sollte der Feuchtigkeitstransport durch Oberflächendiffusion nicht über eine feuchtigkeitsabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl abgebildet werden, sondern über die Flüssigtransportkoeffizienten für Kapillarleitung. Dieser hygrothermische Zusammenhang wurde in den Simulationen berücksichtigt, indem für die Außenwandmaterialien der Versuchsgebäude eine feuchteunabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl angesetzt wurde (siehe Abschnitt 4.2.2 Grundkennwerte).⁸⁴

Wärmeleitfähigkeit, feuchteabhängig

In Abschnitt 4.2.2 Grundkennwerte wurde bereits die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für den trockenen Materialzustand bei 10 °C erläutert. Jedoch liegen Baustoffe üblicherweise am Bauwerk nicht im trockenen Materialzustand vor, sondern enthalten Wasser und sind somit durch einen Wassergehalt gekennzeichnet, der über 0 kg/m3 liegt. Die damit verbundenen Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit von porösen Materialien wurden am Beispiel von Ziegeln mit verschiedener Rohdichte zu Beginn dieses Forschungsberichtes dargelegt (siehe Abschnitt 2.1 Forschungsansatz). Da der Feuchtigkeitseinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit jedoch von der Beschaffenheit eines Stoffes abhängig ist, wurde dieser im Rahmen des Forschungsprojektes an Proben des Referenzziegels Z-16 und des Mauermörtels individuell bestimmt. Die dazu notwendigen Laboruntersuchungen erfolgten am Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Da die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der trockenen Proben über die Plattenverfahren mit zu großen Ungenauigkeiten verbunden war, kamen diese auch bei den feuchten Proben nicht zur Anwendung. Wie bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit für den trockenen Zustand wurde das Hot-Disk-Verfahren genutzt, mit dem Messungen bei einer hohen Wassersättigung der Proben auch unter Wasser erfolgen konnten. Dies ermöglichte die Bestimmung einer feuchtigkeitsabhängigen Wärmeleitfähigkeit, die maßgeblich durch ortsgebundenes Wasser beeinflusst wird. Einwirkungen durch Porendiffusion bzw. Latentwärmeeffekte, die innerhalb der Simulationssoftware nicht über die feuchtigkeitsabhängige Wärmeleitfähigkeit, sondern separat abgebildet werden, wurden dadurch nahezu ausgeschlossen. Zudem war durch die Nutzung des gleichen Messverfahrens eine bessere Vergleichbarkeit der Messergebnisse für den trockenen und feuchten Materialzustand möglich.

⁸⁴ WUFI Pro 6.0, Online Hilfe, Thema 16

Versuchsdurchführung am Ziegel

Um den Einfluss von möglichen Materialinhomogenitäten zu reduzieren wurden bei den Messungen der feuchtigkeitsabhängigen Wärmeleitfähigkeit dieselben Proben bzw. Probenpaare verwendet, wie für die Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Materialzustand. Die Proben Z₁₆-A/-B, Z₁₆-C/-D und Z₁₆-E/-F wurden infolge der Versuchsvorbereitung zunächst bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Anschließend sind diese im klimatisierten Prüfraum des Labors bei 20 °C gewässert worden, um den Zustand der freien Wassersättigung herzustellen. Die folgenden Messungen mit dem Hot-Disk-Gerät erfolgten mit dem gleichen Sensor und bei gleichen Temperaturbedingungen, wie die Messungen der Wärmeleitfähigkeit für den trockenen Materialzustand. Unter Anwendung einer Messdauer von 40 Sekunden (ohne Kalibrierungszeit des Gerätes) und einer Wärmeleistung von 200 mW konnten die Messungen durchgeführt werden, ohne dass zu niedrige oder zu hohe Temperaturen im Verlauf des Messvorgangs auftraten. Für den Messvorgang wurden jeweils zwei Ziegelproben in einen mit Wasser befüllten Behälter gelegt und der flächige Sensor zwischen dem Ziegelpaar eingebaut. Die Wassertemperatur entsprach dabei der Raumlufttemperatur von 20 °C. Zum Beschweren des Aufbaus wurde ein Gewicht auf die obere Ziegelprobe gelegt. Die Abb. 272 und Abb. 273 zeigen den Aufbau der unter Wasser durchgeführten Hot-Disk-Messung am Beispiel des Probenpaars Z₁₆-A/-B.



Abb. 272 - Sensor
positionierung auf der Probe $\rm Z_{16}\text{-}A$ in Rahmen der Hot-Disk-Unterwasser
messung, A20



Abb. 273 - Versuchsaufbau mit Probenpaar Z₁₆-A/-B in Rahmen der Hot-Disk-Unterwassermessung, A20

Aus dem arithmetischen Mittel von 11 Messwerten ergibt sich die repräsentative Wärmeleitfähigkeit des Ziegels Z-16 in Höhe von 1,336 W/(mK) bei 20 °C und bei einem gemittelten Wassergehalt von 240,53 kg/m³.

Versuchsdurchführung am Mörtel

Auch für den Mauermörtel wurden dieselben Proben bzw. Probenpaare (M_{P1}-A/-B und M_{P1}-C/-D) verwendet, wie bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand. Zudem erfolgte die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Hot-Disk-Messungen analog zu den unter Wasser durchgeführten Messungen an den Proben des Referenzziegels Z-16 (siehe Abb. 274 und Abb. 275). Abweichend davon wurden jedoch eine Messdauer von 20 Sekunden (ohne Kalibrierungszeit) und eine Wärmeleistung von 300 mW aufgewendet. Aus den vorliegenden fünf Messwerten ergab sich das arithmetischen Mittel der Wärmeleitfähigkeit des Mauermörtels zu 2,343 W/(mK) bei 20 °C und bei einem gemittelten Wassergehalt von 244,92 kg/m³.



Abb. 274 - Sensorpositionierung auf der Probe M_{P1} -A in Rahmen der Hot-Disk-Unterwassermessung, A20



Abb. 275 - Versuchsaufbau mit Probenpaar M_{P1} -A/-B in Rahmen der Hot-Disk-Unterwassermessung, A20

Nachbereitung

Wie bereits im Abschnitt zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Materialzustand dargelegt, sind die Messwerte, die bei einer Temperatur von 20 °C im Labor ermittelt wurden, für die Simulationen auf 10 °C anzupassen. Hierfür wurde wiederum der Anpassungsfaktor α in Höhe von 0,0002 W/(mK²) verwendet. Für den Referenzziegel Z-16 ergibt sich nun eine angepasste Wärmeleitfähigkeit (10 °C) in Höhe von 1,334 W/(mK) bei einem Wassergehalt von 240,53 kg/m³. Die adaptierte Wärmeleitfähigkeit des Mauermörtels für 10 °C beträgt 2,341 W/(mK) bei einem Wassergehalt von 244,92 kg/m³. In der Tab. 89 sind die bestimmten Wärmeleitfähigkeiten (10 °C) für den trockenen Zustand (w₀) und für die feuchten Zustände (w_{Labor} und w_{max}) des Referenzziegels und des Mauermörtels (unbehandelt und hydrophobiert) zusammengefasst. Die darin aufgeführte Wärmeleitfähigkeit für den maximalen Wassergehalt wurde mittels linearer Extrapolation bestimmt.

Probe,	Wassergehalt		Wärmeleitfähigkeit (feuchteabhängig, 10 °C)	Wärmeleitfähigkeitszuschlag (feuchteabhängig)
Probelizustalid	[kg/	′m³]	[W/(mK)]	[%/M%]
Ziegel, unbehandelt	w ₀	0	0,730	
	W _{Labor}	240,53	1,334	5,98
	W _{max}	362,90	1,641	
Ziegel, hydrophob	w ₀	0	0,730	
	W _{Labor}	43,71	0,840	5,98
	W _{max}	362,90	1,641	
	w ₀	0	0,851	
Mörtel, unbehandelt	W _{Labor}	244,92	2,341	12,64
	W _{max}	288,10	2,603	
	w ₀	0	0,851	
Mörtel, hydrophob	W _{Labor}	51,45	1,164	12,64
	W _{max}	288,10	2,603	

Tab. 89	- Übersicht d	er korrigierten	Wärmeleitfähigkeit	(feuchteabhängig,	10 °C)	, T8
---------	---------------	-----------------	--------------------	-------------------	--------	------

Wärmeleitfähigkeit, temperaturabhängig

Die effektive Wärmeleitfähigkeit von porösen Baustoffen nimmt mit steigender Temperatur zu und zwar umso stärker, je größer die Poren- oder Hohlraumabmessungen in Wärmestromrichtung sind. Zurückzuführen ist dieser Effekt darauf, dass die Wärmeleitung im Feststoffgerüst bei höheren Temperaturen zunehmend durch Wärmestrahlung in den Poren und Hohlräumen des Materials ergänzt wird. Zu beachten ist jedoch dabei, dass die Auswirkungen der Temperatur auf die effektive Wärmeleitfähigkeit durch ein feinporiges Stoffgefüge deutlich reduziert werden. So sind bei Poren mit einem Durchmesser von unter 0,1 mm die Strahlungsvorgänge so gering ausgeprägt, dass der hier vorhandene Wärmetransport praktisch nur noch durch die molekulare Wärmeleitfähigkeit des Porengases geprägt wird. Eine Verringerung der Porengröße impliziert zumeist eine Erhöhung der Rohdichte, woraus folgt, dass mit einer zunehmenden Rohdichte die Temperaturabhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit sinkt. Diese Rahmenbedingungen können dazu führen, dass Stoffe mit sehr unterschiedlicher Rohdichte, aber sehr feinporigem Stoffgefüge, durch einen identischen temperaturbedingten Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit gekennzeichnet sind. Letztlich ist aber der Temperatureinfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit von trockenen porösen Materialen in dem für das Bauwesen wichtigen Temperaturbereich (-20 °C bis 40 °C) so gering, dass dieser vernachlässigt werden kann. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Laboruntersuchungen der Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit des Referenzziegels Z-16 und der Mörtelproben im trockenen Zustand nicht untersucht. In der Simulationssoftware ist dieser daher auch nicht über Messwerte abgebildet worden, sondern lediglich in Form eines Anpassungsfaktors α. Dabei handelt es sich um einen temperaturbedingten Wärmeleitfähigkeitszuschlag in Höhe von 0,0002 W/(mK²).⁸⁵

Die Auswirkungen von Temperaturen unter 0 °C auf die Wärmeleitfähigkeit von feuchten porösen Baustoffen (siehe Abb. 7 und Abb. 8) können in der verwendeten Simulationssoftware "WUFI Plus" allerdings nicht abgebildet werden. Somit wurde infolge der Simulationsberechnungen auch nicht unterschieden zwischen der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe über und unter dem Gefrierpunkt.

Enthalpie, temperaturabhängig

Unter Berücksichtigung der in der Bauphysik üblichen Definition von Wärme wird die in einem Stoff oder Stoffsystem gespeicherte Wärmemenge Q (Wärmeinhalt) unter isobaren Bedingungen als Enthalpie H bezeichnet. Im baupraktischen Temperaturbereich besteht zwischen der Enthalpie eines trockenen Baustoffes und seiner Temperatur ein näherungsweise linearer Zusammenhang, dessen Anstieg durch die spezifische Wärmekapazität beschrieben wird. Die spezifische Wärmekapazität kann bei trockenen Baustoffen jedoch als konstant angesehen werden, sodass in der Simulationssoftware eine individuelle Angabe der Enthalpie in Abhängigkeit von der Temperatur nicht notwendig ist. Der Einfluss von Feuchtigkeit auf die spezifische Wärmekapazität und somit auch auf die Enthalpie eines Stoffes wird in der Simulationssoftware separat rechnerisch erfasst, sodass auch diesbezüglich keine weiteren Messungen erforderlich sind.⁸⁶

⁸⁵ CAMMERER 1995, S. 62 - 68

Vgl. WILLEMS 2013, S. 11; BURGAß 2015, S. 13; WUFI Pro 6.0, Online Hilfe, Thema 19

⁸⁶ FOUAD 2015, S. 171 bis 172Vgl. WUFI Pro 6.0, Online Hilfe, Thema 20

4.2.4 Approximationsparameter

Die in der verwendeten Simulationssoftware "WUFI Plus" integrierten Approximationsverfahren bieten die Möglichkeit, komplexe hygrothermische Funktionen mittels einfach zu bestimmender Stoffkennwerte näherungsweise zu berechnen. Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte dies für die Feuchtespeicherfunktion der hydrophobierten Außenwandmaterialien der Versuchsgebäude, aber auch für den Flüssigtransportkoeffizienten Saugen der unbehandelten sowie hydrophobierten Außenwandmaterialien. Zur Durchführung der Approximation der Feuchtespeicherfunktion waren jedoch zuvor der Bezugsfeuchtegehalt und die freie Wassersättigung mittels Laboruntersuchungen zu bestimmen. Die Approximation der Flüssigtransportkoeffizienten für den Saugvorgang erforderte ebenfalls die Bestimmung des Bezugsfeuchtegehalts und der freien Wassersättigung, allerdings auch die Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten.

Bezugsfeuchtegehalt

Der Bezugsfeuchtegehalt w_{80} beschreibt den Gleichgewichts- bzw. Ausgleichsfeuchtegehalt eines hygroskopischen Baustoffs, der sich im Sorptionsfeuchtebereich bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % einstellt. Die Bestimmung des Bezugsfeuchtegehaltes kann mit dem Exsikkator- oder dem Klimakammer-Verfahren nach DIN EN ISO 12571 erfolgen. Weiterhin besteht die Möglichkeit den Bezugsfeuchtegehalt in Rahmen von DVS-Messungen zu ermitteln.

Versuchsdurchführung am unbehandelten Ziegel

Für den unbehandelten Referenzziegel Z-16 ging der Bezugsfeuchtegehalt aus den durchgeführten DVS-Messungen (siehe Tab. 78) und aus zusätzlichen Messungen nach dem Klimakammer-Verfahren hervor. Die Messungen nach dem Klimakammer-Verfahren wurden durchgeführt, um Kontrollwerte für die DVS-Messungen zu generieren. Dazu wurden zunächst 3 Proben des Referenzziegels Z-16 (Z_{16} -1.2.2.1, Z_{-16} .1.3.2.1 und Z_{16} -1.4.2) mit den Maßen 3,50 cm (L) x 2,56 cm (B) x 3,35 cm (H), 3,58 cm (L) x 2,41 cm (B) x 3,31 cm (H) und 6,41 cm (L) x 2,86 cm (B) x 3,10 cm (H) bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Nach dem Abkühlen im Exsikkator wurden diese bei 23 °C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit in einem Klimaschrank konditioniert (siehe Abb. 276 und Abb. 277), bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hatte. Anschließend erfolgte die Bestimmung des Gleichgewichtsfeuchtegehalts für die 3 Proben, aus deren arithmetischen Mittel sich wiederum der Bezugsfeuchtegehalt von 2,10 kg/m³ für den Ziegel Z-16 ergab.



Abb. 276 - Am Klimaschrank eingestelltes Prüfklima von 23 °C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit, A20



Abb. 277 - Proben Z₁₆-1.2.2.1, Z-₁₆.1.3.2.1 und Z₁₆-1.4.2 im Klimaschrank, A20

Versuchsdurchführung am hydrophoben Ziegel

Da die DVS-Messung (siehe Abschnitt 4.2.3 Hygrothermische Funktionen) nur an einem Bruchstück des Ziegels Z-16 im unbehandelten Zustand durchgeführten wurde, stellt der Bezugsfeuchtegehalt eine wichtige Stoffgröße dar, um für den hydrophobierten Zustand die Feuchtespeicherfunktion approximieren zu können. Für die Bestimmung des Bezugsfeuchtegehalts wurden die beiden Proben Z_{16} -1.1.1-hyd-ges und Z_{16} -1.1.2-hyd-ges mit den Maßen 10,79 cm (L) x 5,48 cm (B) x 3,27 cm (H) und 11,17 cm (L) x 5,65 cm (B) x 3,25 cm (H) gewählt (siehe Abb. 277). Die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung erfolgten nun analog zu den unbehandelten Ziegelproben. Nachdem sich bei beiden Proben die Gleichgewichtsfeuchte zu den hygrothermischen Bedingungen im Klimaschrank (siehe Abb. 276) eingestellt hatte, wurde aus deren arithmetischen Mittel der Bezugsfeuchtegehalt in Höhe von 0,74 kg/m³ berechnet.

Versuchsdurchführung am unbehandelten Mörtel

Auch beim unbehandelten Mörtel erfolgten die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung analog zum unbehandelten Ziegel. Dazu wurden insgesamt 3 Proben (M_{P3} -1.1.2, M_{P5} -1.3.1 und M_{P6} -1.1.1.1) mit den Maßen von 12,42 cm (L) x 12,16 cm (B) x 2,60 cm (H), 11,68 cm (L) x 6,30 cm (B) x 2,65 cm (H) und 8,31 cm (L) x 7,08 cm (B) x 2,63 cm (H) verwendet. Das arithmetische Mittel der Gleichgewichtsfeuchte der 3 Proben ergab einen Bezugsfeuchtegehalt in Höhe von 7,77 kg/m³.

Versuchsdurchführung am hydrophoben Mörtel

Analog zum hydrophobierten Referenzziegel Z-16 lagen auch für den hydrophobierten Mauermörtel keine Ergebnisse aus der DVS-Messung vor (siehe Abschnitt 4.2.3 Hygrothermische Funktionen). Mit Hilfe des Klimakammer-Verfahrens konnte allerdings für 4 hydrophobierte Mauermörtelproben (M_{P2} -1.4.1-hyd, M_{P2} -1.4.2-hyd, M_{P3} -1.1.1.1-hyd und M_{P6} -1.1.2-hyd) ein gemittelter Bezugsfeuchtegehalt von 6,07 kg/m³ bestimmt werden. Die Abmessungen der Proben lagen in einem Bereich von 8,16 cm bis 12,44 cm (L), 6,29 cm bis 11,57 cm (B) und 2,58 cm bis 3,05 cm (H).

In Tab. 90 sind die ermittelten Bezugsfeuchtegehalte für die unbehandelten und hydrophobierten Proben nach dem Klimakammer-Verfahren und der DVS-Messung zusammengefasst.

Probe,	Maggyorfahran	Bezugsfeuchtegehalt w ₈₀		
Probenzustand	wessvenamen	[kg/m³]		
Ziegel,	DVS-Messung	1,94		
unbehandelt	Klimakammer-Verfahren	2,10		
Ziegel,	DVS-Messung	-		
hydrophob	Klimakammer-Verfahren	0,74		
Mörtel,	DVS-Messung	12,45		
unbehandelt	Klimakammer-Verfahren	7,77		
Mörtel,	DVS-Messung	-		
hydrophob	drophob Klimakammer-Verfahren	6,07		

Tab.	90 -	Übersicht zum	Bezugsfeuchteg	ehalt nach dem	Klimakammer-	-Verfahren und	der DVS-Messung,	, T8
------	------	---------------	----------------	----------------	--------------	----------------	------------------	------

Freie Wassersättigung

Die freie Wassersättigung w_f beschreibt als Grenzwert einen Wassergehalt, den ein kapillarporöser, hygroskopischer Stoff durch freies Saugen von Wasser ohne Einwirkung äußerer Kräfte und unter Normaldruck erreichen kann. Der Wassergehalt bei freier Wassersättigung ist immer kleiner, als der Wassergehalt bei maximaler Wassersättigung, der durch die offene Porosität eines kapillarporösen Stoffes bestimmt wird. Wassergehalte über der freien Wassersättigung können nur durch Anlegen eines Über- oder Unterdrucks, durch erzwungene Kondensation und durch eine lange Lagerung in Wasser, bei der sich eingeschlossene Luft im Porensystem löst, erreicht werden.⁸⁷

Obwohl bei den Voruntersuchungen (siehe Abschnitt 4.2.1 Vorarbeiten) die freie Wassersättigung bereits an kleinen Probenscheiben der 22 Ziegel und an 3 Proben des Bestandsmörtels bestimmt wurde, sollte diese zusätzlich an größeren und repräsentativeren Proben des Referenzziegels Z-16 und des Mauermörtels erfasst werden. Die dazu erforderlichen Laboruntersuchungen erfolgten am Dahlberg-Institut unter Berücksichtigung der DIN EN 13755.

Versuchsdurchführung am unbehandelten Ziegel

Zur Bestimmung der freien Wassersättigung für den unbehandelten Ziegel Z-16 wurden 3 Proben (Z₁₆-1.2.2, Z₁₆-1.3.2 und Z₁₆-1.4.2) mit den Abmessungen 6,54 cm (L) x 3,31 cm (B) x 2,56 cm (H), 6,34 cm (L) x 3,17 cm (B) x 3,09 cm (H) und 6,41 cm (L) x 2,86 cm (B) x 3,10 cm (H) verwendet. Diese waren zunächst bis zur Massenkonstanz bei 105 °C zu trocknen und daraufhin zum Abkühlen im Exsikkator zu lagern. Nachfolgend sind die Proben in einer Wanne punktuell erhöht eingesetzt worden. Zur Zeit t₀ wurde Wasser mit einer Temperatur von 20 °C in die Wanne gefüllt, bis die Proben zur Hälfte ihrer Höhe (ca. 1,3 cm) im Wasser lagen (siehe Abb. 278). Nach t₀ + 60 Minuten wurde erneut Wasser eingefüllt, sodass mindestens drei Viertel der Probenhöhe (ca. 1,8 cm) mit Wasser benetzt waren (siehe Abb. 279). Bei t₀ + 120 Minuten erfolgte ein drittes Mal das Einfüllen von Wasser. Nun waren die Proben vollständig mit Wasser bedeckt, wobei der Wasserspiegel etwa 2,5 cm oberhalb der Probe lag.



Abb. 278 - Saugverhalten der Ziegelproben nach einer Zeit von etwa 15 Minuten, A20



Abb. 279 - Saugverhalten der Ziegelproben nach einer Zeit von etwa 60 Minuten, A20

⁸⁷ KRUS 1995, S. 8 - 10

Vgl. HOLM 2001, S.11; WILLEMS 2013, S. 173
Nach 24 Stunden wurde die erste Wägung vorgenommen. Anschließend wurden die Probekörper wieder in die mit Wasser gefüllten Behälter gelegt. Bis zum Erreichen der Massenkonstanz folgten weitere Wägungen im Abstand von 24 Stunden. Die Proben Z_{16} -1.2.2 und Z_{16} -1.3.2 erreichten nach neun Tagen (216 Stunden) den Zustand der freien Wassersättigung, während die Probe Z_{16} -1.4.2 hierfür nur fünf Tage (120 Stunden) benötigte. Aus dem arithmetischen Mittel des Wassergehalts der drei Proben ergab sich schließlich für den Referenzziegel Z-16 eine freie Wassersättigung in Höhe von 276,63 kg/m³.

Versuchsdurchführung am hydrophoben Ziegel

Zur Ermittlung der freien Wassersättigung für den Ziegel Z-16 im hydrophoben Zustand wurden 2 Proben (Z_{16} -1.1.1.hyd und Z_{16} -1.1.2.hyd) mit den Maßen 10,79 cm (L) x 5,48 cm (B) x 3,27 cm (H) und 11,17 cm (L) x 5,65 cm (B) x 3,25 cm (H) ausgewählt. Die weitere Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung erfolgten nach demselben Prinzip wie beim unbehandelten Ziegel Z-16. Beide Proben erreichten nach neun Tagen (216 Stunden) den Zustand der freien Wassersättigung. Aus dem arithmetischen Mittel der beiden ermittelten Wassergehalte ergab sich die freie Wassersättigung des hydrophoben Referenzziegels Z-16 zu 43,71 kg/m³.

Versuchsdurchführung am unbehandelten Mörtel

Auch beim Mörtel entsprach die Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung der zuvor beschriebenen Prozedur (siehe Abb. 280 und Abb. 281). Dabei wiesen die vier verwendeten Proben (M_{P2} -1.1, M_{P2} -1.2.1, M_{P2} -1.2.2 und M_{P6} -1.4) mit den Abmessungen von 10,52 cm bis 23,96 cm (L), von 6,30 cm bis 6,37 cm (B) und von 2,62 cm bis 2,97 cm (H) ein ausgeprägtes Saugverhalten auf. Nach 72 Stunden erreichten diese den Zustand der freien Wassersättigung. Aus dem arithmetischen Mittel der vier Wassergehalte resultierte eine freie Wassersättigung von 261,09 kg/m³.



Abb. 280 - Mörtelproben bei 105 °C im Trockenschrank (vor dem Bruch von $M_{\rm P2}\mbox{-}1.2),\,A20$



Abb. 281 - Saugverhalten der Mörtelproben nach einer Zeit von etwa 10 Minuten, A20

Versuchsdurchführung am hydrophoben Mörtel

Im Gegensatz zum unbehandelten Mörtel erreichten die hydrophobierten Proben M_{P2} -1.4.2-hyd, M_{P3} -1.1.1-hyd und M_{P5} -1.3.2-hyd den Zustand w_f nach 8 Tagen (192 Stunden), M_{P6} -1.1.2-hyd nach 9 Tagen (216 Stunden) und M_{P2} -1.4.1-hyd nach 10 Tagen (240 Stunden). Die Größe der 5 Proben lag dabei in einem Bereich von 8,16 cm bis 12,44 cm (L), von 6,29 cm bis 11,57 cm (B) und von 2,58 cm bis 3,05 cm (H). Aus dem arithmetischen Mittel der fünf Wassergehalte errechnete sich die freie Wassersättigung des hydrophoben Mörtels zu 51,45 kg/m³.

Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die kapillare Saugfähigkeit eines Baustoffes. Er gibt an, wie viel Wasser pro Zeiteinheit durch die Baustoffoberfläche aufgenommen werden kann und ist deshalb für die Bewertung der Wasseraufnahmeintensität eines Bauteils (z.B. bei Beregnung) von großer Relevanz. Die Angabe des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgt entweder in der Einheit kg/(m²h^{0,5}) mit dem Formelzeichen W_w oder in der Einheit kg/(m²s^{0,5}) mit dem Formelzeichen A_w. Zur Einordnung der Saugfähigkeit von Baustoffen kann Tab. 91 herangezogen werden.⁸⁸

Wasseraufnahmekoeffizient $\rm W_w$	Bezeichnung der	
$[kg/(m^2h^{0,5})]$	Saugfähigkeit	
$W_w > 2$	stark saugend	
$0,5 < W_w \le 2,0$	wasserhemmend	
$0,001 < W_w \le 0,5$	wasserabweisend	
$W_w \leq 0,001$	wasserdicht	

Tab. 91 - Klassifizierung der kapillaren Saugfähigkeit eines Baustoffs, T9

Hinsichtlich der Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten beschreibt die DIN EN ISO 15148 ein Verfahren bei dem dieser durch teilweises Eintauchen eines Probekörpers in Wasser bestimmt wird. Zudem können auch den produktspezifischen Normen Messverfahren entnommen werden. So ist in der DIN EN 1015-18 eine Methode zur messtechnischen Ermittlung der kapillaren Wasseraufnahme von Festmörteln erläutert, während die DIN EN 772-11 ein Verfahren zur Messung der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln vorgibt. Allerdings ist zu beachten, dass die unterschiedlichen Prüfbedingungen der Normen sich auch auf die Messergebnisse auswirken können und diese somit nicht normübergreifend direkt vergleichbar sind.⁸⁹

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde aus diesem Grund ausschließlich das Prüfverfahren nach DIN EN ISO 15148 angewendet. Dieses ist für die Prüfung von Putzen oder Beschichtungen geeignet und empfahl sich daher vor allem für die Untersuchung der Mörtelproben. In Rahmen der Versuchsvorbereitung waren zunächst Probekörper auszuwählen. Diese mussten repräsentativ für das zu prüfende Material sein und zudem eine regelmäßige Form mit einem konstanten Querschnitt aufweisen. Zudem war darauf zu achten, dass die Probekörper eine wasseraufnehmende Fläche von mindestens 50 cm² besaßen. Zur Erzielung einer höheren Messgenauigkeit empfiehlt sich hingegen eine wasseraufnehmende Fläche von 100 cm². Die weitere Versuchsdurchführung an ausgewählten Ziegel- und Mörtelproben wird nachfolgend dokumentiert.⁹⁰

⁹⁰ DIN EN ISO 15148, S. 4 und 6

⁸⁸ WILLEMS 2013, S. 211 - 213

Vgl. DIN EN ISO 15148, S. 4

⁸⁹ WILLEMS 2013, S. 213 Vgl. DIN EN ISO 15148, S. 4 - 7; DIN EN 1015-18, S. 3 - 6.; DIN EN 772-11, S. 4 - 5

vgi. Din en 150 15146, S. 4 - 7, Din en 1015-16, S. 5 - 0., Din en 77

Vgl. WUFI Pro 6.0, Online-Hilfe, Thema 21; DIN EN ISO 15148, S. 10 - 11

Versuchsdurchführung am unbehandelten Ziegel

Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten wurde für die Ziegel- und die Mörtelproben sowohl im unbehandelten als auch im hydrophobierten Zustand am Dahlberg-Institut durchgeführt. Als unbehandelte Ziegelprobe wurde der nahezu vollständige Referenzziegel Z-16 mit den Maßen 23,94 cm (L) x 12,19 cm (B) x 6,65 cm (H) verwendet. Zur Plausibilitätskontrolle kam jedoch auch der Ziegel Z-7 mit den Maßen 22,67 cm (L) x 12,59 cm (B) x 7,01 cm (H) zum Einsatz. Nach drei Konditionierungstagen im Klimaschrank bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit stellte sich die Massenkonstanz in beiden Proben ein. Daraufhin wurden fünf Seiten der Ziegelproben mit Wachs beschichtet (siehe Abb. 282). Für die unbeschichtete wasseraufnehmende Fläche (Z-16: 159,20 cm² und Z-7: 158,92 cm²) wurde eine von Mörtelresten freie Läuferfläche gewählt (siehe Abb. 283).



Abb. 282 - Auftrag der Wachsbeschichtung mit einem Pinsel auf den Referenzziegel Z-16, A20



Abb. 283 - Unbeschichtete und wasseraufnehmende Läuferfläche des Referenzziegels Z-16, A20

Sowohl der Referenzziegel Z-16 als auch Z-7 wurden im Anschluss mit der unbeschichteten Seite nach unten in eine Wanne mit punktuellen Auflagern gelegt. Die Auflager verhinderten, dass die Ziegel den Boden der Wanne vollflächig berührten (siehe Abb. 284 und Abb. 285).



Abb. 284 - Mit Wachs beschichtete Ziegel Z-16 (links) und Z-7 (rechts) bei der Versuchsdurchführung, A20



Abb. 285 - Nahaufnahme des Ziegels Z-16 in der mit Wasser gefüllten Wanne, A20

Der Laborversuch zu Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten startete mit dem Einfüllen von Wasser in die Wanne bei Labortemperatur. Unter Berücksichtigung der in der DIN EN ISO 15148 vorgeschlagenen Zeitabstände, erfolgte schließlich die Wägung der Proben bis zu einer Eintauchzeit von 24 Stunden. Nach dem Herausnehmen aus der Wanne und vor dem Wiegen wurde die Probe auf einem feuchten Tuch abgestrichen, um anhaftendes Wasser zu entfernen. Je Ziegelprobe sind insgesamt 12 Wägungen durchgeführt worden.

Die flächenbezogene Wasseraufnahme, beschrieben über die Wurzel der Zeit, ergibt schließlich den in Abb. 286 dargestellten Kurvenverlauf. Der Knickpunkt deutet darauf hin, dass der Referenzziegel Z-16 nach etwa einer Stunde (1,00 $h^{0,5}$) und der Ziegel Z-7 nach etwa zwei Stunden (= 1,41 $h^{0,5}$) wassergesättigt waren. Nach diesen Zeitpunkten wurde aufgenommenes Wasser an der Oberseite der Ziegelproben sichtbar und es fand nur noch eine Umverteilung des Wassers von den gröberen in die feineren Poren statt. Aus diesem Grund ist der weitergehende Verlauf der Kurven nahezu konstant. Nach der DIN EN ISO 15148 entspricht dieses Materialverhalten einem Kurvenverlauf vom Typ A.



Abb. 286 - Kurvenverlauf (Typ A) der Ziegelproben Z-16 und Z-7, A20

Aus der Steigung der Regressionsgraden des vorderen Kurvenabschnitts bis zur Sättigung ergibt sich schließlich der Wasseraufnahmekoeffizient (siehe Abb. 287). Diese wurden unter Berücksichtigung einer anfänglichen Stabilisierungsphase ohne den Messpunkt 0 durch die ersten 3 Messpunkte des Referenzziegels Z-16 und durch die ersten 4 Messpunkte des Ziegels Z-7 bestimmt.



Abb. 287 - Regressionsgeraden der Ziegelproben Z-16 und Z-7, A20

Dementsprechend ergibt sich für den Referenzziegel Z-16 der Wasseraufnahmekoeffizient W_w zu 22,441 kg/(m²h^{0,5}) und der Wasseraufnahmekoeffizient A_w zu 0,374 kg/(m²s^{0,5}). Gemäß Tab. 91 kann der Referenzziegel Z-16 somit als stark saugend klassifiziert werden. Durch die Messung für den Ziegel Z-7 in Höhe von 31,139 kg/(m²h^{0,5}) wird die Messung für Z-16 tendenziell bestätigt.

Versuchsdurchführung am hydrophoben Ziegel

Zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten des Referenzziegels Z-16 im hydrophobierten Zustand wurden die Proben Z_{16} -1.1.1-hyd-be und Z_{16} -1.1.2-hyd-be ausgewählt, die durch die Maße 11,44 cm (L) x 6,54 cm (B) x 3,38 cm (H) und 11,96 cm (L) x 6,80 cm (B) x 3,34 cm (H) geprägt waren. Obwohl die Proben deutlich kleiner waren, als für den unbehandelten Zustand, erfüllt deren wasseraufnehmende Prüffläche mit 74,86 cm² (Z_{16} -1.1.1-hyd-be) und 80,35 cm² (Z_{16} -1.1.2-hyd-be) die Mindestanforderungen. Die weitere Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung erfolgten analog zu den unbehandelten Ziegelproben. Die Ergebnisse beider Messungen können Abb. 288 entnommen werden. Nach der DIN EN ISO 15148 entsprechen die beiden Kurvenverläufe dem Typ B.



Abb. 288 - Kurvenverlauf (Typ B) für die Ziegelproben Z₁₆-1.1.1-hyd-be und Z₁₆-1.1.1-hyd-be, A20

Für den Kurvenverlauf des Typs B ergibt sich der Wasseraufnahmekoeffizient aus dem Maximalwert der flächenbezogenen Wasseraufnahme bezogen auf t^{0,5}. Entsprechend dem arithmetischen Mittel beider Ziegelproben resultiert somit ein Wasseraufnahmekoeffizient W_w von 0,0237 kg/(m²h^{0,5}) und A_w von 0,0004 kg/(m²s^{0,5}) für den Referenzziegel Z-16 im hydrophobierten Zustand. Dieser kann unter Berücksichtigung von Tab. 91 als wasserabweisend bezeichnet werden.

Versuchsdurchführung am unbehandelten Mörtel

Zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten des Mauermörtels wurde die Probe M_{P4} -1-be mit den Abmessungen 23,87 cm (L) x 12,48 cm (B) x 6,31 cm (H) verwendet, die in etwa den Maßen der unbehandelten Ziegelproben entsprachen. Diese wurde jedoch hochkant gemessen, um die reale Fugentiefe der Außenwände der Versuchsgebäude annährend im Versuch abzubilden. Damit ergab sich eine wasseraufnehmende Probenfläche von 78,75 cm². Diese erfüllte somit die Anforderungen der DIN EN ISO 15148. Die weitergehende Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung erfolgten nach dem gleichen Prinzip, wie zuvor bei den unbehandelten Ziegelproben. Um dabei die flächenbezogene Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zeit noch genauer als beim Ziegel darzustellen, wurden bei diesem Versuch in der Summe 21 Wägungen durchgeführt. Nachfolgend zeigen die Abb. 289 bis Abb. 294 das ausgeprägte Saugverhalten des Mauermörtels zu verschiedenen Zeitpunkten während der Versuchsdurchführung.



Abb. 289 - Saugverhalten des Mörtels nach 30 Minuten, A20



Abb. 292 - Saugverhalten des Mörtels nach 1,5 Stunden, A20



Abb. 290 - Saugverhalten des Mörtels nach 45 Minuten, A20



Abb. 293 - Saugverhalten des Mörtels nach 3,5 Stunden, A20



Abb. 291 - Saugverhalten des Mörtels nach 1 Stunden, A20



Abb. 294 - Saugverhalten des Mörtels nach 6 Stunden, A20

Die resultierende Funktion für die flächenbezogene Wasseraufnahme (siehe Abb. 295) verdeutlicht, dass die Probe nach etwa acht Stunden ($t^{0,5} = 2,83 h^{0,5}$) wassergesättigt war. Der Kurvenverlauf entspricht nach DIN EN ISO 15148 dem Typ A.



Abb. 295 - Wasseraufnahmekoeffizient des Mörtels - Kurvenverlauf Typ A, A20

Durch die Bildung einer Regressionsgeraden ($y_{MP4-1} = 22,262x-3,582$) unter Berücksichtigung der anfänglichen Stabilisierungsphase (ohne den Messpunkt 0) ließ sich der Wasseraufnahmekoeffizient für den grün gekennzeichneten Bereich (siehe Abb. 295) ableiten. Je nach Einheit beträgt dieser 22,261 kg/(m²h^{0,5}) bzw. 0,371 kg/(m²s^{0,5}) und ist dementsprechend als stark saugend einzustufen (siehe Tab. 91).

Versuchsdurchführung am hydrophoben Mörtel

Für die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten des Mauermörtels im hydrophoben Zustand wurden die Proben M_{P2} -1.3.1-hyd-be und M_{P2} -1.3.2-hyd-be ausgewählt. Diese waren durch Maße von 11,86 cm (L) x 6,30 cm (B) x 2,60 cm (H) sowie 11,58 cm (L) x 6,28 cm (B) x 2,67 cm (H) gekennzeichnet. Die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung erfolgten analog zu den hydrophobierten Ziegelproben. Der in Abb. 296 dargestellte Kurvenverlauf ist gemäß DIN EN ISO 15148 als Typ B einzustufen, der für hydrophobe Stoffe charakteristisch ist.



Abb. 296 - Wasseraufnahmekoeffizient des hydrophoben Mörtels - Kurvenverlauf Typ B, A20

Für den hydrophoben Mörtel ergibt sich der Wasseraufnahmekoeffizient aus dem arithmetischen Mittel der maximalen flächenbezogenen Wasseraufnahme beider Proben zu 0,0662 kg/($m^{2}h^{0,5}$) bzw. 0,0011 kg/($m^{2}s^{0,5}$). Nach Tab. 91 kann dieser somit als wasserabweisend klassifiziert werden. In der Tab. 92 sind die ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten der Ziegel- und Mörtelproben noch einmal abschließend zusammengestellt.

Tab. 92 - Übersicht des ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten für d	die Ziegel-	und Mörtelproben, T	'8
---	-------------	---------------------	----

Probe,	Wasseraufnahmekoeffizient \mathbf{W}_{w}	Wasseraufnahmekoeffizient A_w
Probenzustand	$[kg/(m^2h^{0.5})]$	$[kg/(m^2s^{0,5})]$
Ziegel, unbehandelt	22,441	0,374
Ziegel, hydrophob	0,0237	0,0004
Mörtel, unbehandelt	22,261	0,371
Mörtel, hydrophob	0,0662	0,0011

4.3 Berechnung - Simulationseingaben

Nachfolgend werden die Eingaben für die hygrothermischen Bauteil- und Gebäudesimulationen, die mit der Simulationssoftware WUFI Plus erfolgten, dargelegt. Dabei wird sowohl auf die allgemeinen Einstellungen als auch auf die Überführung der im Rahmen der Laboruntersuchungen ermittelten Materialparameter in die Simulationssoftware eingegangen. Als Grundlage für diese Ausarbeitung dienten die Masterarbeiten der Studierenden Anna-Lena Fischer und Sandra Jessica Sorge, die dem Quellenverzeichnis dieses Forschungsberichts entnommen werden können. Ausgewählte Inhalte der beiden Arbeiten sind in diesem Abschnitt (4.3 Berechnung - Simulationseingaben) eingeflossen, allerdings nicht noch einmal separat zitiert worden.

4.3.1 Simulationszeitraum

Die hygrothermischen Bauteil- und Gebäudesimulationen beziehen sich auf den Zeitraum vom 15.01.2016 (00:00 Uhr) bis zum 31.12.2020 (23:00 Uhr). Zurückzuführen ist der um einen Tag vorgezogene Start der Simulationsberechnung (16.01.2016 auf den 15.01.2016) darauf, dass es sich beim Simulationsjahr 2016 um ein Schaltjahr handelt. WUFI Plus berücksichtigt jedoch nur Jahre mit 365 Tagen. Um trotzdem den vollständigen Monitoring- bzw. Untersuchungszeitraum vom 16.01.2016 (22:30 Uhr) bis 01.01.2018 (00:00 Uhr) und die dabei erfassten Wetterdaten in WUFI Plus abbilden zu können, wurde mit der Simulation ein Tag früher gestartet. Zudem wurde ein über den Untersuchungszeitraum der Versuchsgebäude hinausgehender Simulationszeitraum gewählt, um zu gewährleisten, dass sich die Ergebnisse der Simulationen auf den hygrothermisch eingeschwungenen Zustand der Außenwände beziehen. Analog zu den eingelesenen Wetterdaten wurde in der Simulationssoftware ein Rechenzeitschritt von einer Stunde gewählt. Ebenso ist eine sehr hohe Berechnungsgenauigkeit berücksichtigt worden.

4.3.2 Standort und Klima

WUFI Plus verfügt über eine eigene Wetterdatenbank für eine Vielzahl von Standorten, die für die Simulationsberechnungen genutzt werden kann. In geographischer Hinsicht wäre hierbei der Klimadatensatz der Stadt Rostock dem Versuchsstandort am nächsten gelegen. Um allerdings die Klimabedingungen und ihren Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Versuchsgebäude im Verlauf des gesamten Untersuchungszeitraums möglichst genau abbilden zu können, wurde eine eigene Wetterdatei basierend auf den am Versuchsstandort ermittelten Klima- bzw. Wetterdaten für die Bauteil- und Gebäudesimulationen erstellt. Diese Wetterdatei, die sich auf den vollständigen Simulationszeitraum bezieht, setzt sich zusammen aus den aufgezeichneten Wetterdaten der Jahre 2016 und 2017. Die Wetterdaten des Jahres 2016 wurden für das Simulationsjahr 2016 und die Wetterdaten des Jahres 2017 für die Simulationsjahre 2017, 2018, 2019 sowie 2020 verwendet. Der Datenbestand der Wetterdatei setzte sich dabei aus den nachfolgenden Parametern zusammen: Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Globalstrahlung, Direktstrahlung, Diffusstrahlung und Niederschlagshöhe (flüssige und feste Niederschläge).

Zur Überführung der erfassten Wetterdaten in die Wetterdatei mussten diese zunächst hinsichtlich ihrer Plausibilität und Messausfälle geprüft werden (siehe Abschnitt 3.5 Messung - Außenklima). Zudem waren die in 10-Minuten-Zeitschritten aufgezeichneten Wetterdaten zu adaptieren, da in der Simulationssoftware WUFI Plus lediglich eine stundengenaue Eintragung der Daten möglich ist. Auch der Zeitstempel der Daten des Jahres 2016 wurde angepasst, da wie zuvor beschrieben die Simulationssoftware WUFI Plus keine Schaltjahre abbilden kann. Dazu wurden alle aufgezeichneten Wetterdaten des Zeitraums vom 16.01.2016 (00:00 Uhr) bis einschließlich 29.02.2016 (23:00 Uhr) um einen Tag vordatiert. Somit mussten zwar die Simulationsberechnungen am 15.01.2016 starten, jedoch konnten auf diese Weise auch die Wetterdaten des 29.02.2016 in die Simulation einfließen.

Da WUFI Plus keine Leerfelder in der Wetterdatei akzeptiert, musste für den Zeitraum vor Beginn der Wetteraufzeichnung am Versuchsstandort, d.h. für den Simulationszeitraum vom 01.01.2016 bis einschließlich 14.01.2016 Kompensationsdaten verwendet werden. Für die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, den Luftdruck, die Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowie für die Niederschlagshöhe wurden Daten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR / GFZ) verwendet (siehe 3.5.2 Datenkompensation). Für die Global-, Direkt- und die Differenzstrahlung kamen hingegen die am Versuchsstandort aufgezeichneten Daten aus dem Jahr 2017 zum Einsatz.

Für das Erdreich unterhalb der Versuchsgebäude wurde ein optionales Klima abgebildet, das durch eine konstante relative Luftfeuchtigkeit von 99 % und durch einen sinuskurvenförmigen Verlauf der Temperatur gekennzeichnet war. Dieser Sinuskurvenförmige Temperaturverlauf wurde generiert mit einem Mittelwert von 6 °C, einer Amplitude von 5,5 °C und einem Jahresmaximum, das zum 16. August auftritt.

4.3.3 Gebäudegeometrie

Die Geometrie und Ausrichtung der Versuchsgebäude wurde über den Gebäude-Assistenten in WUFI-Plus erfasst. Es erfolgte die Eingabe der äußeren Gebäudeabmessungen von 4,41 m x 2,46 m für Versuchsgebäude 1, 2, 4 und 5. Aufgrund des 2 cm dicken Außenputzes von Versuchsgebäude 3 belaufen sich die Außenmaße hier auf 4,45 m x 2,50 m. Die Geschosshöhe beträgt 3,609 m und wird von der Geländeoberkante bis zur stark belüfteten Luftschicht des Dachs gemessen, da diese die obere Grenze der thermischen Gebäudehülle darstellt. Das Nettovolumen der Versuchsgebäude 1, 2, 3 und 5 ergibt sich demnach zu 20,48 m³. Für Versuchsgebäude 4 reduziert sich hingegen das Nettovolumen aufgrund der 8 cm dicken Innendämmung auf 18,00 m³. Das in WUFI abgebildete Bruttovolumen der Versuchsgebäude 1, 2, 4 und 5 beträgt 39,15 m³. Das Versuchsgebäude 3 weist jedoch aufgrund des Außenputzes ein Bruttovolumen von 40,15 m³ auf. Die Bodenfläche wurde bei den Versuchsgebäuden 1, 2, 4 und 5 mit 10,85 m² und bei dem Versuchsgebäude 3 mit 11,13 m² angesetzt. Die Ausrichtung der Außenwände Ost und West erfolgte gemäß eines Azimutwinkels von 240,85°. Die einzige Wandöffnung wurde in der Außenwand Nord für die Eingangstür vorgesehen, die durch eine Breite von 0,76 m und eine Höhe von 1,885 m gekennzeichnet war.

Zudem musste in WUFI Plus die Eingabe der "Höhe über Grund" für die einzelnen Bauteile der thermischen Gebäudehülle erfolgen, die zur Berechnung der Schlagregenbelastung notwendig ist. Dazu wurde der Schwerpunkt eines Bauteils ermittelt und dessen Abstand zur Geländeoberkante berechnet. Für die Bodenplatte (Dicke: 0,538 m) wurde dementsprechend die Höhe über Grund auf 0,269 m und für das Flachdach (Dicke: 0,315 m) auf 3,452 m festgelegt. Zur Vereinfachung der Gebäudegeometrie wurden die Außenwände ab der Geländeoberkante über die vollständige Höhe der thermischen Gebäudehülle von 3,609 m angesetzt. Damit ergibt sich für das Bauteil Außenwand eine Höhe über Grund von 1,81 m. Die Eingangstür wurde mit einer Höhe über Grund von 1,48 m in den Simulationsberechnungen berücksichtigt.

4.3.4 Bauteilaufbau

Da die Simulationssoftware WUFI Plus keine differenzierte Eingabe des Bauteilaufbaus zulässt, wurde die Bodenplatte, das Flachdach, die Außenwände und die Eingangstür inkl. Dämmelement der Versuchsgebäude vereinfacht mit einem homogenen Schichtenaufbau modelliert. Dies hatte zur Folge, dass z.B. die Randdämmung der Bodenplatte und das Mauerfußelement der Außenwände in den Simulationsberechnungen nicht berücksichtigt werden konnten. Auch das Flachdach musste vereinfacht ohne die Decken- und Gefällebalken eingegeben werden. Zudem erfolgte dessen Eingabe nur bis zur oberen Grenze der thermischen Gebäudehülle, die durch die stark belüftete Luftschicht definiert wird. Anhang 9 - Simulationsberechnungen gibt einen Überblick zu allen Bauteilaufbauten.

Um im Rahmen der Bauteil- und Gebäudesimulationen dennoch den Einfluss der Mauerwerksfugen auf das hygrothermische Verhalten der Außenwände berücksichtigen zu können, wurde über die Volumenanteile der einzelnen Mauerwerkskomponenten (Ziegel und Mörtelfugen) ein neues und fiktives Material als effektive Mauerwerksschicht festgelegt. Im Folgenden wird erläutert, wie die Materialparameter der effektiven Mauerwerksschicht aus den Ergebnissen der Laboruntersuchungen (siehe 4.2 Beschreibung - Laboruntersuchungen) abgeleitet wurden.

Anteilswerte der Mauerwerkskomponenten

Bei der Berechnung der Anteilswerte der Mauerwerkskomponenten wurde angenommen, dass das in den Versuchsgebäuden verbaute Ziegelmaterial im Reichsformat, durch ideale Abmessungen von 25 x 12 x 6,5 cm gekennzeichnet ist. Zudem wurde das Mauerwerk im Blockverband erstellt, sodass die Mauerwerksdicke genau der Länge eines Ziegels in Höhe von 25 cm entsprach. Mit Hilfe der Planunterunterlagen konnte schließlich die Anzahl der Ziegel je Läufer- und Binderschicht für die Längs- und Schmalseiten der Versuchsgebäude bestimmt werden. Hieraus resultierten wiederum die Stoßfugenbreite in der Läufer- und Binderschicht sowie die Lagerfugendicke, die zur Berechnung der Volumenanteile der Mauerwerkskomponenten verwendet wurden.

Das Mauerwerk auf der Längsseite der Versuchsgebäude hat ein Gesamtvolumen von 3,059 m³. Unter Berücksichtigung der Abmessungen und der Anzahl der Ziegel beläuft sich der Ziegelanteil auf diesen Gebäudeseiten auf 2,245 m³ (73 %). Der Mauermörtel besaß demnach einen Anteil von 0,814 m³ (27 %). Für die Schmalseite der Versuchsgebäude resultierte ein Gesamtvolumen des Mauerwerks in Höhe von 1,707 m³. Der Anteil des Ziegelmaterials ergab sich wiederum zu einem Volumen von 1,290 m³ (76 %), während der Mörtelanteil in Höhe von 0,417 m³ (24 %) ermittelt werden konnte. Für die folgenden Simulationsberechnungen wurde der Mittelwert des Mörtel- und des Ziegelanteils der beiden Außenwände (Längs- und Schmalseite) gebildet. Demnach ergab sich für den Mauermörtel ein Volumenanteil von 25,5 %, während der Ziegel einen Anteil von 74,5 % am Mauerwerk besaß.

Es gilt jedoch zu beachten, dass die Berechnung der Anteilswerte der Mauerwerkskomponenten auf idealen Abmessungen der Ziegel basiert. Bei den 5 Versuchsgebäuden sind diese allerdings nicht gegeben, da es sich hier um historisches Ziegelmaterial handelt, das aus einem Bestandsgebäude zurückgebaut wurde. Neben allgemeinen Abweichungen von den Vorgaben des Reichsformats sind einige Ziegel zudem durch Beschädigungen gekennzeichnet, die zu einer unregelmäßigen Form führten. Der tatsächlich an den Versuchsgebäuden vorzufindende Ziegel- und Mauermörtelanteil der Außenwände konnte demnach nur näherungsweise bestimmt werden.

Materialparameter der effektiven Mauerwerksschicht

Zur Beschreibung der unbehandelten effektiven Mauerwerksschicht aus Ziegel und Mauermörtel wurden im nächsten Schritt die mit den Laboruntersuchungen ermittelten Materialkennwerte über die Volumenanteile (Ziegel 74,5 % und Mauermörtel 25,5 %) umgerechnet. Die folgende Tab. 93 zeigt die Ausgangswerte für die Materialien Ziegel und Mörtel einschließlich der daraus generierten Materialparameter.

Materialparameter	Einheit	Ziegel	Mörtel	Mauerwerk
Rohdichte	[kg/m³]	1.737,31	1.768,38	1.745,23
Porosität	[-]	0,3629	0,2881	0,3438
Spezifische Wärmekapazität	[J/(kgK)]	695,00	859,00	736,82
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10 °C	[W/(mK)]	0,730	0,851	0,761
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	12,72	14,90	13,28
Bezugsfeuchtegehalt (DVS-Messung)	[kg/m ³]	1,94	12,45	4,62
Freie Wassersättigung	[kg/m ³]	276,63	261,09	272,67
Wasseraufnahmekoeffizient	$[kg/(m^2s^{0,5})]$	0,374	0,371	0,373
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, feuchtigkeitsabhängig	[%/M%]	5,98	12,64	7,85
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, temperaturabhängig	[W/(mK ²)]	0,0002	0,0002	0,0002

Tab.	93 -	- Materialparameter	der unbehande	elten effektiven	Mauerwerksschicht,	T8
------	------	---------------------	---------------	------------------	--------------------	-----------

In Tab. 94 sind die Materialparameter der hydrophobierten effektiven Mauerwerksschicht dargelegt, die sich gegenüber der unbehandelten effektiven Mauerwerksschicht ändern (siehe Tab. 93).

Tab.	94 -	Materialparameter	der hydrophobierten	effektiven	Mauerwerksschicht,	T8
		1	<i>y</i> 1			

Materialparameter	Einheit	Ziegel (hydrophob)	Mörtel (hydrophob)	Mauerwerk (hydrophob)
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	18,64	20,8	19,19
Bezugsfeuchtegehalt (Klimakammer)	[kg/m³]	0,74	6,07	2,099
Freie Wassersättigung	[kg/m³]	43,71	51,45	45,68
Wasseraufnahmekoeffizient	$[kg/(m^2s^{0,5})]$	0,0004	0,0011	0,0006

Die Umrechnung der Feuchtespeicherfunktion für die unbehandelte effektive Mauerwerksschicht gestaltet sich aufwändiger. Diese beinhaltet für den Ziegel und für den Mauermörtel Angaben zum Wassergehalt, jedoch bei verschiedenen Werten der relativen Luftfeuchtigkeit. Aus diesem Grund konnte im ersten Schritt nur der Bezugsfeuchtegehalt und die freie Wassersättigung umgerechnet werden (siehe Tab. 93). Im zweiten Schritt war die Sorptionsisotherme des Mauermörtels mittels linearer Interpolation an die Sorptionsisotherme des Ziegels anzupassen, sodass sich die beiden Sorptionsisothermen auf die gleichen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit bezogen. Im Anschluss konnte die anteilige Anpassung der Wassergehalte für die effektive Mauerwerksschicht erfolgen (siehe Tab. 95). Die Feuchtespeicherfunktion der hydrophobierten effektiven Mauerwerksschicht wurde hingegen mittels Approximation über den Bezugsfeuchtegehalt und die freie Wassersättigung (siehe Tab. 94) bestimmt.

Relative	Wassergehalt					
Luftfeuchtigkeit	Ziegel	Mörtel	Mauerwerk			
[%]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]			
0,000	0,000	0,000	0,000			
10,217	0,189	1,570	0,541			
21,750	0,325	2,401	0,854			
32,050	0,481	3,362	1,216			
42,450	0,651	4,422	1,613			
52,550	0,854	5,614	2,068			
63,117	1,111	7,236	2,673			
73,700	1,501	9,618	3,571			
80,000	1,940	12,449	4,620			
83,550	2,188	14,052	5,213			
92,950	4,130	24,695	9,374			
97,800	7,829	35,663	14,926			
100,000	276,63	261,09	272,67			

Tab. 95 - Feuchtespeicherfunktion der unbehandelten effektiven Mauerwerksschicht, T8

Während der Flüssigtransportkoeffizient Saugen für die unbehandelte und hydrophobierte effektive Mauerwerksschicht automatisch aus dem Bezugsfeuchtegehalt, der freien Wassersättigung und dem Wasseraufnahmekoeffizienten approximiert wurde, musste der Koeffizient für die Weiterverteilung manuell umgerechnet werden. Hierfür wurden zunächst mittels linearer Inter- und Extrapolation die Koeffizienten für die Weiterverteilung des Ziegels und Mörtels für die relevanten Wassergehalte (Bezugsfeuchte und freie Wassersättigung) der Mauerwerksschicht ermittelt. Anhand dessen konnte nun die volumenanteilige Anpassung der D_{ww}-Werte erfolgen (siehe Tab. 96 und Tab. 97).

Probe, Probenzustand	Nr.	Wassergehalt	Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D _{ww}
TODELIZUSTAILU		[kg/m ³]	[m²/s]
	1	0,00	0
Ziegel, unbehandelt	2	1,94	1,18E-10
	3	276,63	4,26E-08
Mörtel, unbehandelt	1	0,00	0
	2	12,45	1,50E-10
	3	261,09	1,10E-07
Mauerwerk, unbehandelt	1	0,00	0
	2	4,62	2,23E-10
	3	272,67	6,07E-08

Tab. 96 - Flüssigtransportkoeffizient (Weiterverteilen) der unbehandelten effektiven Mauerwerksschicht, T8

Tab. 97 - Flüssigtransportkoeffizient (Weiterverteilen) der hydrophobierten effektiven Mauerwerksschicht, T8

Probe, Probenzustand	Nr.	Wassergehalt	Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D _{ww}
Topenzustand		[kg/m³]	[m²/s]
	1	0,00	0
Ziegel, hydrophob	2	0,74	3,89E-11
	3	43,71	1,26E-09
Mörtel, hydrophob	1	0,00	0
	2	6,07	3,91E-12
	3	51,45	5,00E-09
Mauerwerk, hydrophob	1	0,00	0
	2	2,10	8,25E-11
	3	45,68	2,09E-09

Die feuchtigkeitsabhängige Wärmeleitfähigkeit der unbehandelten effektiven Mauerwerksschicht wurde korrespondierend zu den zuvor erläuterten Materialparametern bestimmt. In Tab. 98 ist die volumenanteilige Umrechnung beschrieben. Die Wärmeleitfähigkeit bei einem Wassergehalt w_0 entspricht dabei der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand. In der zweiten Zeile ist jeweils die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit bei einem angepassten Wassergehalt, der für den Ziegel und Mörtel im Labor eingestellt wurde, dargestellt. Für die unbehandelte effektive Mauerwerksschicht ergibt sich dieser Wert aus der volumenanteiligen Umrechnung von w_{Labor} des Ziegels und Mörtels. Die Tabelle wurde schließlich bis zur maximalen Wassersättigung mittels linearer Extrapolation fortgeführt (Zeile 3).

Probe, Probenzustand	Nr.	Wassergehalt		Wärmeleitfähigkeit (feuchteabhängig, 10 °C)	Wärmeleitfähigkeitszuschlag (feuchteabhängig)
		[kg	ŗ∕m³]	[W/(mK)]	[%/M%]
	1	w_0	0	0,730	
Ziegel, unbehandelt	2	W _{Labor}	240,53	1,334	5,98
	3	W _{max}	362,90	1,641	
Mörtel, unbehandelt	1	W_0	0	0,851	
	2	W _{Labor}	244,92	2,341	12,64
	3	W _{max}	288,10	2,603	
Mauerwerk, unbehandelt	1	w_0	0	0,761	
	2	W _{Labor}	241,65	1,588	7,85
	3	W _{max}	343,83	1,937	

Tab. 98 - Wärmeleitfähigkeit (feuchteabhängig, 10 °C) der unbehandelten effektiven Mauerwerksschicht, T8

Nach dem gleichen Prinzip, wie bei der unbehandelten effektiven Mauerwerksschicht die Ermittlung der feuchtigkeitsabhängigen Wärmeleitfähigkeit erfolgte, wurde diese auch bei der hydrophobierten Mauerwerksschicht bestimmt (siehe Tab. 99). Neben der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand ergab sich die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit der hydrophobierten Mauerwerksschicht aus der volumenanteiligen Anpassung. Für die hydrophobierte effektive Mauerwerksschicht konnte auf diese Weise ein feuchtigkeitsabhängiger Wärmeleitfähigkeitszuschlag in Höhe von 7,85 %/M.-% berechnet werden.

Probe,	Nr.	Wassergehalt		Wärmeleitfähigkeit (feuchteabhängig, 10 °C)	Wärmeleitfähigkeitszuschlag (feuchteabhängig)
Probenzustand		[kg	[/m³]	[W/(mK)]	[%/M%]
	1	W_0	0	0,730	
Ziegel, hydrophob	2	W _{Labor}	43,71	0,840	5,98
	3	W _{max}	362,90	1,641	
Mörtel, hydrophob	1	W ₀	0	0,851	
	2	W _{Labor}	51,45	1,164	12,64
	3	W _{max}	288,10	2,603	
Mauerwerk, hydrophob	1	W ₀	0	0,761	
	2	W _{Labor}	45,68	0,917	7,85
	3	W _{max}	343,83	1,937	

Tab.	99 -	Wärmeleitfähigkeit	(feuchteabhängig,	10 °C)	der hydrophobierten	effektiven	Mauerwerksschicht,	T8
------	------	--------------------	-------------------	--------	---------------------	------------	--------------------	-----------

Neben den zuvor genannten Stoffgrößen musste auch die Eindringtiefe der Hydrophobierung am Versuchsgebäude 2 für die effektive Mauerwerksschicht bestimmt werden. Auf Grundlage der im Rahmen der Laboruntersuchungen (siehe Abschnitt 4.2.1 Vorarbeiten) ermittelten Eindringtiefe für den Ziegel und Mauermörtel konnte mit deren Volumenanteilen die Eindringtiefe für die effektive Mauerwerksschicht berechnet werden (siehe Tab. 100).

Baustoff	Einheit	Eindringtiefe
Ziegel	[mm]	1,7
Mörtel	[mm]	14,4
Mauerwerk	[mm]	4,9

Tab. 100 - Eindringtiefe der Hydrophobierung in die effektive Mauerwerksschicht, T8

Eine Zusammenstellung aller Materialparameter für die unbehandelte und für die hydrophobierte effektive Mauerwerksschicht befindet sich Anhang 9 - Simulationsberechnungen.

Materialparameter des Innen- und Außenputzes

Der Innenputz der Versuchsgebäude 1 bis 5 und der Außenputz des Versuchsgebäudes 3 wurden mit den gleichen Ausgangsprodukten und dem gleichen Mischungsverhältnis hergestellt, wie der Mauermörtel (siehe Abschnitt 3.1.4 Baukonstruktion). Daher konnten in der Simulationssoftware für diese beiden Außenwandschichten die Materialparameter des Mauermörtels angegeben werden (siehe Tab. 93 bis Tab. 99). Die auf dem Außenputz in der Realität vorhandene Fassadenfarbe ist in der Simulationssoftware in 2 Varianten abgebildet worden. Die erste Variante kennzeichnet den intakten Zustand der Fassadenfarbe und trägt die Bezeichnung "Versuchsgebäude 3", während die zweite Variante den defekten Zustand kennzeichnet und die Bezeichnung "Versuchsgebäude 3*" aufweist. Beide Varianten der Fassadenfarbe sind in WUFI Plus dadurch abgebildet worden, indem der Außenputz zunächst mit einer Schichtdicke von 3 mm dupliziert wurde. Für diese neue Schicht erfolgte daraufhin eine Anpassung einzelner Materialparameter. Bei der Variante mit einer intakten Fassadenfarbe (Versuchsgebäude 3) wurde der Wasseraufnahmekoeffizient auf 0,0017 kg/(m²s^{0,5}) angepasst, außenseitig der s_d-Wert um 0,14 m erhöht und der Flüssigtransportkoeffizient für den Vorgang des Weiterverteilens approximiert (siehe Tab. 3). Bei der Variante mit defekter Fassadenfarbe (Versuchsgebäude 3^{*}) wurden hingegen der Wasseraufnahmekoeffizient des Außenputzes und der Flüssigtransportkoeffizient für den Vorgang des Weiterverteilens nicht verändert. Es ist lediglich außenseitig der s_d-Wert der Außenwand um 0,14 m erhöht worden.

Materialparameter der weiteren Bauteile

Die Bodenplatte, das Flachdach und die Eingangstür einschließlich Wärmedämmelement wurden bei allen Simulationsvarianten in der Simulationssoftware mit den gleichen Materialparametern abgebildet. Für eine möglichst genaue Eingabe der Bauteile sind zunächst ähnliche Materialien aus der WUFI-Materialdatenbank ausgewählt worden. Daraufhin wurden einzelne Materialparameter, die aus den Datenblättern der verbauten Materialien hervorgingen, angepasst. Einen Überblick zu den verwendeten Materialparametern gibt Anhang 9 - Simulationsberechnungen.

Innere Quellen

Die zusätzliche Schlagregenbeanspruchung des Versuchsgebäudes 5, die in der Realität mit Hilfe einer Beregnungsanlage künstlich erzeugt wurde, musste ebenfalls in den Simulationsberechnungen abgebildet werden. Dies erfolgte über die Eingabe einer sogenannten "inneren Quelle" während der Bearbeitung der Außenwand-Konstruktion. Dabei musste berücksichtigt werden, dass am realen Versuchsgebäude nur die Außenwände Ost, Süd und West jeweils werktags (montags bis freitags) von 09:00 Uhr bis 09:22 Uhr über einen Zeitraum von 6 Monaten mit einer Förderleistung von 144,55 l/h bewässert wurden. Damit resultiert für den 22-minütigen Beregnungszeitraum eine Wassermenge von 53 l bzw. 1,69 l/m². Es gilt aber zu beachten, dass diese Bewässerungsmenge nicht der Wassermenge entspricht, die den Außenwänden in der Realität zur kapillaren Aufnahme zur Verfügung stand. Wie Untersuchungen am Versuchsgebäude 5 zeigten, reduziert sich diese auf 33,02 l bzw. 1,06 l/m², da der Vorgang der Beregnung auch mit Wasserverlusten verbunden war (siehe Abschnitt 3.2.4 Beregnung). Im folgenden Schritt wurden das Beregnungsprogramm bzw. der zeitliche Ablauf der Beregnung und die dabei aufgebrachte Wassermenge von 1,06 l/(m²d) in einer externen Datei abgebildet (siehe Tab. 101). Obwohl die Bauteil- und Gebäudesimulationen in Zeitschritten von einer Stunde erfolgten, war es notwendig die aufzubringende Wassermenge hier in der Einheit kg/(m²s) anzugeben, wie Kontrollrechnungen bestätigten.

Zoitroum dor Porognung	Beremungstage	Wassermenge		
Zeittaum der beregnung	Deregnungstage	[kg/(m ² s)]		
02.05.2016 bis 31.10.2016				
01.05.2017 bis 31.10.2017				
01.05.2018 bis 31.10.2018	Montags bis freitags	0,00029275		
01.05.2019 bis 31.10.2019				
01.05.2020 bis 30.10.2020				

Tab. 101 - Inhalt der externen Beregnungsdatei, T1

Nachdem die externe Datei in die Simulationssoftware geladen wurde, konnte die Feuchtequelle für die beregneten Außenwände des Versuchsgebäudes 5 angesetzt und mit der implementierten Datei verknüpft werden. Die Feuchtequelle ist dabei so eingegeben worden, dass diese an der Außenkante der Außenwände beginnt und sich über eine Tiefe von 3 cm erstreckt. Die Tiefe von 3 cm wurde gewählt, damit die Wassermenge von 1,06 l/d möglichst über viele Gitterelemente in das Mauerwerk der Außenwände eingebracht wird. Erfolgt dies hingegen nur über wenige Gitterelemente, so kann es passieren, dass die Feuchtequelle versucht Wasser in ein bereits maximal gefülltes Gitterelement einzufügen. Ein solcher Vorgang ist aber physikalisch nicht möglich, sodass die Transportgleichungen nicht mehr gelöst werden können. Die Simulationssoftware bricht in diesem Fall die Berechnung mit der Fehlermeldung "divergierende Ergebnisse" ab.⁹¹

⁹¹ WUFI Pro 6.0 Online-Hilfe, Thema 64

4.3.5 Bauteilbezogene Randbedingungen

Die bauteilbezogenen Randbedingungen werden in der Simulationssoftware WUFI Plus durch die thermischen und hygrischen Oberflächenbedingungen, durch die Anfangsbedingungen und durch die numerischen Bedingungen definiert. Die getätigten Eingaben werden nachfolgend vorgestellt.

Thermische Oberflächenbedingungen

Als thermische Randbedingungen sind für die Bauteiloberflächen der thermischen Gebäudehüllen neben dem Wärmeübergangswiderstand, der kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl und der langwelligen Strahlungsemissionszahl auch der Verschattungsfaktor anzugeben. Hinsichtlich des Wärmeübergangswiderstands ermöglicht WUFI Plus das Ansetzen von Vorschlagswerten oder die Eingabe benutzerdefinierter Größen. Die für die Hüllbauteile der Versuchsgebäude vorgenommenen Eingaben können Tab. 102 entnommen werden.

Routeil	Außenoberfläche	Innenoberfläche		
Dauten	[(m ² K)/W]	[(m ² K)/W]		
Bodenplatte	0	0,17		
Außenwände	0,04	0,13		
Eingangstür mit Dämmelement	0,04	0,13		
Flachdach	0,1	0,1		

Tab. 102 - Wärmeübergangswiderstände der Hüllbauteile der Versuchsgebäude, T1

Für die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl und für die langwellige Strahlungsemissionszahl ist es ebenso möglich benutzerdefinierte Angaben zu tätigen oder von WUFI Plus vorgeschlagene Werte entsprechend der Farbgebung des Bauteils auszuwählen. In Rahmen der Simulationsberechnungen wurde für alle Außenwände die Option *"Ziegelstein, rot"*, für das Türelement die Option *"Hell"* und für das Flachdach die Option *"Dunkel"* ausgewählt. Die mit diesen Eingaben vorgeschlagenen und daraufhin verwendeten Werte für die Strahlungsabsorptionszahl und die Strahlungsemissionszahl sind in der Tab. 103 zusammengestellt. Die verputzten Außenwände der Versuchsgebäude 3 und 3^{*} weisen somit die gleichen Werte auf, wie die unverputzten Außenwände der Versuchsgebäude 1, 2, 4 und 5. Zudem wurde für alle Hüllbauteile der Versuchsgebäude ein Verschattungsfaktor von 1 gewählt. Es wird somit infolge der Simulationsberechnungen keine Verschattung berücksichtigt.

Tab.	103 -	Strahlungsabsorptionszahl un	d Strahlungsemissionszahl für	die Hüllbauteile der	Versuchsgebäude, T1
	100	on annangeasserphenetann an		are manowarene aer	

Bauteil	Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	Langwellige Strahlungsemissionszahl
	[-]	[-]
Bodenplatte	-	-
Außenwände	0,68	0,9
Eingangstür mit Dämmelement	0,2	0,9
Flachdach	0,8	0,9

Hygrische Oberflächenbedingungen

Über die hygrischen Randbedingungen werden die Einflüsse einer Oberflächenbeschichtung eines Bauteils und die bauteilbezogene Schlagregenbeanspruchung berücksichtigt. Je nachdem ob sich eine Beschichtung innen- oder außenseitig befindet, können individuelle oder hinterlegte Angaben zum s_d-Wert angesetzt werden. Für die Bodenplatte und das Flachdach wurde auf der Innenseite eine Dampfsperre mit einem s_d-Wert von 1.500 m angesetzt. Für die Eingangstür einschließlich des Dämmelements und für die Außenwände erfolgten keine Angaben (zusätzlicher s_d-Wert: 0 m).

Die bauteilbezogene Schlagregenbeanspruchung wird durch die Schlagregenkoeffizienten R_1 und R_2 , den Normalregen sowie die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung definiert (siehe Gl. 4). Die beiden Schlagregenkoeffizienten sind abhängig von dem Bauteiltyp bzw. der Bauteilneigung und von der Höhenlage des Bauteils. Infolge der Simulationsberechnungen wurden die in Tab. 104 genannten Schlagregenkoeffizienten verwendet.

Routeil	Schlagregenkoeffizient R ₁	Schlagregenkoeffizient R ₂		
Dauten	[-]	[-]		
Bodenplatte	-	-		
Außenwände	0	0,07		
Eingangstür mit Dämmelement	0	0,07		
Flachdach	1	0		

Tab. 104 - Schlagregenkoeffizienten R₁ und R₂ für die Hüllbauteile der Versuchsgebäude, T1

In Abhängigkeit von der Bauteilneigung wurde eine Regenwasserabsorptionszahl von 0,7 für die vertikalen Bauteile (Außenwände und Eingangstür mit Dämmelement) ausgewählt. Dieser Wert berücksichtigt, dass ein Teil des auf eine geneigte Bauteilfläche auftreffenden Regenwassers wieder abspritzt. Die resultierende, verbleibende Regenmenge steht daraufhin dem kapillaren Saugvorgang zur Verfügung. Da bei waagerechten Flächen, wie z.B. dem Flachdach das wegspritzende Wasser in der Regel wieder auf die Oberflächen zurückfällt, wurde hier eine Regenwasserabsorptionszahl von 1 veranschlagt. Die infolge der hygrothermischen Simulationsberechnungen verwendeten Werte für die Regenwasserabsorptionszahl sind in Tab. 105 zusammengefasst.⁹²

Tab.	105 -	- Schlagreg	enkoeffizienten	R ₁ u	ind R ₂	für die	Hüllbauteile	e der	Versuchsgebäu	ude. '	T1
I up.	100	beinagreg	ennoennententen	101 0	inter itz	iui uic	mandaten	uci	verbueno gebu	auc,	* *

Davidail	Regenwasserabsorptionszahl
Bauten	[-]
Bodenplatte	-
Außenwände	0,7
Eingangstür mit Dämmelement	0,7
Flachdach	1

⁹² WUFI Pro 6.0 Online-Hilfe, Thema 32

Anfangsbedingungen

Die Simulationssoftware WUFI Plus ermöglicht die Eingabe von Startwerten für die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in Bauteilen. Diese Anfangsbedingungen der Simulationsberechnungen wurden an die tatsächlichen Bedingungen zum Zeitpunkt des Versuchsstarts angepasst. Dazu sind die Monitoringdaten des Forschungsprojektes verwendet worden. Auf Grundlage der gemessenen Mauerwerkstemperaturen in 4,0 cm Bohrtiefe (siehe Tab. 27) wurde die Anfangstemperatur für den gesamten Querschnitt der Außenwände näherungsweise auf 0 °C festgelegt. Die Messwerte für die relative Luftfeuchtigkeit belaufen sich hingegen in der gleichen Bohrtiefe auf 100 % (siehe Tab. 30). Da eine solch hohe relative Luftfeuchtigkeit, verursacht durch Messungenauigkeiten, dem Zustand der freien Wassersättigung entsprechen würde, war eine niedrigere relative Luftfeuchtigkeit als Startwert zu wählen. Dementsprechend wurde dieser für die Versuchsgebäude 1 bis 5 auf 99 % festgelegt (konstant über den Querschnitt). Eine Zusammenstellung der zuvor genannten Anfangsbedingungen ist Tab. 106 zu entnehmen.

Tab. 106	- Anfangsbedingungen	für die Außenwände der	Versuchsgebäude	(Materialzustand:	feucht), T1
----------	----------------------	------------------------	-----------------	-------------------	-------------

Voreuchegehöude	Anfangstemperatur	Anfangsfeuchte		
versuchsgebaude	[°C]	[%]		
1 bis 5	0	0,99		

Da die Außenwände der Versuchsgebäude im Rahmen der Simulationsberechnungen nicht nur im feuchten, sondern auch im vollständig trockenen Zustand untersucht werden sollten, wurden für diese Variante der Simulation die in Tab. 107 genannten Anfangsbedingungen verwendet.

Tab.	107	- Anfangsbedingungen fü	r die Außenwände der	Versuchsgebäude	(Materialzustand:	trocken), T1
------	-----	-------------------------	----------------------	-----------------	-------------------	--------------

Vorgushagobäudo	Anfangstemperatur	Anfangsfeuchte	
versuchsgebaude	[°C]	[%]	
1 bis 5	0	0	

Für die weiteren Hüllbauteile der 5 Versuchsgebäude, wie dem Flachdach, der Bodenpatte und der Eingangstür einschließlich Wärmedämmelement lagen keine Monitoringdaten vor. Daher wurde für diese Bauteile die Anfangstemperatur der Außenwände angesetzt. Die relative Luftfeuchtigkeit ist hingegen mit einem Wert von 0 % berücksichtigt worden. Zurückzuführen ist dies darauf, dass im Rahmen der Simulationsberechnungen nur die energetischen Auswirkungen von Feuchtigkeit in den Außenwänden untersucht werden sollten. Es wurde daher als sinnvoller erachtet das Flachdach, die Bodenplatte und die Eingangstür mit Wärmedämmelement ausschließlich im trockenen Zustand in den Simulationsberechnungen abzubilden. Die Anfangsbedingungen dieser Bauteile sind in Tab. 108 noch einmal zusammengefasst.

Tab. 108 - Anfangsbedingungen für die Bodenplatte, die Eingangstür und das Flachdach der Versuchsgebäude, T1

Varausharahäuda	Anfangstemperatur	Anfangsfeuchte
versuchsgebaude	[°C]	[%]
1 bis 5	0	0

Numerische Bedingungen

Numerisches Gitter

Sobald in der Simulationssoftware WUFI Plus ein Bauteil mit den jeweiligen Schichten eingegeben wird, erfolgt automatisch die Festlegung eines Gitters, das für die numerische Lösung der Wärmeund Feuchtetransportgleichungen benötigt wird. Dieses numerische Gitter ist so fein zu wählen, dass die berechneten Wärme- und Feuchtigkeitsverteilungen in angemessener Auflösung dargestellt werden können. Dies ist insbesondere bei Bauteilen zu berücksichtigen, die einen steilen oder stark gekrümmten Temperatur- und Feuchtegradienten aufweisen. WUFI Plus stellt zur Festlegung des numerischen Gitters die Optionen "grob", "mittel" und "fein" zur Verfügung. Infolge der Bauteilund Gebäudesimulationen wurde für alle Außenwände der Versuchsgebäude die Option "fein" und für alle weiteren Hüllbauteile die Option "mittel" gewählt.⁹³

Berechnungsmodus

Für jedes Bauteil kann in WUFI Plus eine individuelle Einstellung des Berechnungsmodus erfolgen. So besteht die Möglichkeit nur den Wärmetransport oder nur den Feuchtetransport berechnen zu lassen. Auch können beide Transportvorgänge in der Berechnung berücksichtig werden. Infolge der Bauteil- und Gebäudesimulationen wurden die Bauteile Bodenplatte, Flachdach und Eingangstür einschließlich Wärmedämmelement ausschließlich thermisch berechnet. Der Feuchtetransport ist hier nicht berücksichtigt worden. Für die Außenwände erfolgte die Auswahl der Transportvorgänge entsprechend der Simulationsvariante. In der Variante Materialzustand "feucht" kam sowohl die Berechnung des Wärmetransports als auch der Feuchtetransport zur Anwendung. In der Variante Materialzustand "trocken" wurde hingegen nur der Wärmetransport berücksichtigt.

Hygrothermische Sondereinstellungen

Mittels der hygrothermischen Sondereinstellungen können einzelne Bestandteile des Wärme- und Feuchtetransports abgeschaltet werden, wie der Feuchtetransport durch Kapillarleitung und der Wärmetransport durch Latentwärmeeffekte. In Rahmen der Simulationsberechnungen wurden für die Bauteile Bodenplatte, Flachdach und Eingangstür einschließlich Wärmedämmelement diese Wärme- und Feuchtetransportvorgänge abgeschaltet. Bei den Außenwänden erfolgte eine solche Abschaltung nur bei der Simulationsvariante "Materialzustand" trocken.

Numerische Parameter

Im Rahmen der Einstellungen "numerische Parameter" können eine höhere Berechnungsgenauigkeit und eine adaptierte Zeitschrittweite festgelegt werden, sodass die Simulationsberechnung durch eine bessere numerische Qualität gekennzeichnet ist. Eine hohe Anzahl von Konvergenzfehler wird dadurch reduziert und eine nicht ausgeglichene Wasserbilanz optimiert. Für alle Hüllbauteile der Versuchsgebäude (Bodenplatte, Außenwände, Eingangstür einschließlich Wärmedämmelement und Flachdach) wurden beide Optionen ausgewählt.

⁹³ WUFI Pro 6.0, Online-Hilfe, Thema 55

4.3.6 Raumklimatische Randbedingungen

Innere Lasten

In der Simulationssoftware können zur Abbildung von internen Lasten individuelle Tagesprofile für die Wärme-, Feuchtigkeits- und CO₂-Zufuhr erstellt werden. Da jedoch bei den Versuchsgebäuden keine internen Lasten, wie z.B. durch den Aufenthalt von Personen, gegeben waren, blieben diese im Rahmen der Simulationsberechnungen unberücksichtigt.

Auslegungsbedingungen

Lufttemperatur

In Anlehnung an den realen Wirkungsbereich der Heizungsanlage in den Versuchsgebäuden wurde für den gesamten Simulationszeitraum eine Mindest-Raumlufttemperatur von 20,0 °C angegeben. Ebenso war die Angabe einer Maximal-Raumlufttemperatur notwendig, die auf 21,0 °C festgelegt wurde. Allerdings war diese in Rahmen der Simulationsberechnungen nicht von Relevanz, da die Versuchsgebäude ohne aktive Kühlung in der Simulationssoftware eingegeben worden sind.

Relative Luftfeuchtigkeit

Für die relative Luftfeuchtigkeit wurden über den gesamten Simulationszeitraum der Mindestwert auf 40 % und der Maximalwert auf 50 % festgelegt. Der für die Simulationsberechnungen relevante Maximalwert richtet sich nach den tatsächlichen Einstellungen der aktiven Luftentfeuchter in den Versuchsgebäuden, die im Durchschnitt eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % sicherstellen sollten. Der Mindestwert von 40 % ist hingegen für die Simulationsberechnungen von keiner Relevanz, da die Versuchsgebäude ohne Luftbefeuchter in der Simulationssoftware abgebildet wurden.

Maximale CO₂-Konzentration

Da die maximale CO₂-Konzentration im Rahmen der Simulationsberechnungen nicht von Relevanz war, wurde diese, wie von der Simulationssoftware vorgeschlagen, über den gesamten Zeitraum der Simulation zu 3.000 ppmv angesetzt.

Lüftung

WUFI Plus unterscheidet bei den Einstellungen zur Lüftung zwischen natürlicher und mechanischer Lüftung. Eine mechanische Lüftung wurde bei allen Varianten der Simulationsberechnungen nicht einbezogen, da eine solche bei den realen Versuchsgebäuden nicht vorhanden war. Die natürliche Lüftung wurde hingegen in der Simulationssoftware berücksichtigt. Dies kann durch 2 Eingaben erfolgen, der Luftwechselrate infolge Leckage und der Luftwechselrate infolge manueller Lüftung. Für alle Versuchsgebäude und Simulationsvarianten wurde eine Luftwechselrate infolge Leckage in Höhe von 0,042 1/h angesetzt. Unter Berücksichtigung eines Volumenstromkoeffizienten e von 0,07 und einem Faktor f_{ATD} von 1 entspricht dies einem n_{50} -Wert von 0,6 h⁻¹ und somit der Anforderung an die Luftdichtheit der Versuchsgebäude (Berechnung nach DIN 18599-2). Die Luftwechselrate infolge manueller Lüftung wurde bei allen Simulationsvarianten mit einer aktiven Luftentfeuchtung durch 0 1/h und bei allen Varianten mit manueller Lüftung durch 0,49 1/h berücksichtigt.

Weitere Parameter

Die Simulationssoftware WUFI Plus ermöglicht auch die Eingabe von Anfangsbedingungen für das Innenraumklima. Entsprechend den Aufzeichnungen des Monitoringsystems wurde als Startwert für die Lufttemperatur 0 °C festgelegt (siehe Tab. 19). Für die relative Luftfeuchtigkeit konnte anhand der Monitoringdaten von 4 Versuchsgebäuden ein Mittelwert in Höhe von 97 % bestimmt werden (siehe Tab. 23). Dieser ist daraufhin als Startwert genutzt worden. Die von der Simulationssoftware vorgeschlagene Anfangskonzentration CO_2 in Höhe von 400 ppmv wurde beibehalten. Zudem ist die Verteilung der Solarstrahlung auf innere Oberflächen so festgelegt worden, dass diese proportional zur Fläche erfolgt. Bei der Option "Solarstrahlung direkt an Innenluft" wurde der Wert 0 verwendet.

Gebäudetechnik

Die Heizungstechnik der Versuchsgebäude wurde in der Simulationssoftware WUFI Plus mit einer Leistung von 25 kW angesetzt. Diese ist somit um den Faktor 10 leistungsstärker, als in den realen Versuchsgebäuden. Die höhere Leistung wurde gewählt, damit in allen Versuchsgebäuden zu jedem Zeitpunkt der Heizphasen die Soll-Innenraumtemperatur von mindestens 20 °C gegeben ist, um somit wiederum die Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse (z.B. der Wärmestromdichte und des Heizwärmebedarfs) sicherzustellen. Da die Heiztechnik zum Versuchsbeginn erst um 22:30 Uhr in Betrieb genommen wurde, beträgt die Heizleistung bis zu diesem Zeitpunkt 0 KW. Im Anschluss liegt die volle Heizleistung über das gesamte Tagesprofil und den gesamten Simulationszeitraum an (siehe Tab. 109).

Versuchsgehäude	Fingshe des Zeitra	Leistung		
versuensgebaude	Lingabe des Zeitte	Lingabe des Zeitraums in worrer fus		
1 bis 5	15.01.2016, 00:00 Uhr	15.01.2016, 22:30 Uhr	0	
	15.01.2016, 22:30 Uhr	31.12.2020, 23:00 Uhr	25	

Tab. 109 - Eingaben für die Heizleistung über den Simulationszeitraum, T1

Als zweite Komponente der Gebäudetechnik wurde in WUFI Plus ein aktiver Luftentfeuchter bei jedem Versuchsgebäude abgebildet. Abweichend zu den realen Freilandversuchen wurde die aktive Luftentfeuchtung jedoch ab dem Versuchsstart mit einer Leistung von 8.333,33 g /h berücksichtigt. Diese resultiert wiederum aus der Leistung des tatsächlich verbauten aktiven Luftentfeuchters, die um den Faktor 10 erhöht wurde. Auch hier ist eine hohe Entfeuchtungsleistung gewählt worden, um möglichst ähnliche Innenraumklimata der Versuchsgebäude sicherzustellen (siehe Tab. 110).

-								
Tah	110 -	Fingahen	fiir die	Entfeuchtung	releistung	iiher den	Simulationszeitraum	T1
I uv.	110 -	Lingaben	iui uic	Linucucintun	Solcioculig	, ubei uen	omulationszentiaum	, I I

Versuchsgehäude	Fingabe des Zeitra	Leistung	
versuensgebaude	Lingabe des Zenta	[g/h]	
1 bis 5	15.01.2016, 00:00 Uhr	15.01.2016, 22:30 Uhr	0
	15.01.2016, 22:30 Uhr	31.12.2020, 23:00 Uhr	8.333,33

4.4 Berechnung - Bauteilsimulation

4.4.1 Gesamtwassergehalt

Für alle Versuchsgebäude ist der Verlauf des Gesamtwassergehalts der Außenwand West bei aktiver Luftentfeuchtung für den kompletten Simulationszeitraum (15.01.2016 bis 31.12.2020) in Abb. 297 dargestellt. Daraus geht hervor, dass vor allem in der ersten Trocknungsphase des Jahres 2016 die ziegelsichtigen Wände (Versuchsgebäude 1, 2, 4 und 5) durch das schnellste Trocknungsverhalten gekennzeichnet sind. Die Außenwand West des Versuchsgebäudes 4 hat zwar in dieser Phase einen höheren Wassergehalt, als z.B. die Außenwand West des Versuchsgebäudes 1, jedoch kann dieser auf den größeren Anfangsfeuchtegehalt des Bauteils zurückgeführt werden. Weiterhin zeigt sich beim Vergleich der Außenwände von Versuchsgebäude 1 und 2, dass die Hydrophobierung den Trocknungsprozess im Verlauf der ersten Trocknungsphase verlangsamt (siehe Abb. 297).



Abb. 297 - Gesamtwassergehalt der Außenwand West bei aktiver Luftentfeuchtung (15.01.2016 bis 31.12.2020), A1

Trotz des langsameren Trocknungsverhaltens wird deutlich, dass sich die niedrigsten Werte und die kleinsten Schwankungen in den Kurvenverläufen des Gesamtwassergehalts, bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 2 einstellen (siehe Abb. 297 und Abb. 298). So erreicht diese im letzten Jahr der Simulationsberechnung einen gemittelten Gesamtwassergehalt in Höhe von 0,683 kg/m². Gegenüber der unbehandelten Außenwand West des Versuchsgebäudes 1, die im selben Jahr einen gemittelten Gesamtwassergehalt von 1,353 kg/m² aufweist, entspricht dies einer Reduzierung der Feuchtigkeitsbelastung um 0,670 kg/m² (siehe Abb. 297 und Abb. 298). Bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 3 (mit Außenputz und intakter Fassadenfarbe) zeigt sich für das Jahr 2020 ebenfalls eine geringere Feuchtigkeitsbelastung als beim Versuchsgebäude 1. Allerdings beträgt hier die Reduzierung des gemittelten Gesamtwassergehalts lediglich 0,056 kg/m². Kommt es hingegen aufgrund einer defekten Fassadenfarbe zu keiner Abnahme des Wasseraufnahmekoeffizienten, aber zu einer Zunahme der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Außenputzes, so zeigt sich eine Vergrößerung der Feuchtigkeitsbelastung des Bauteils. Im letzten Simulationsjahr konnte für diesen Fall (Versuchsgebäude 3[°]) ein gemittelter Gesamtwassergehalt von 11,956 kg/m² ermittelt werden.

Ein noch höherer Gesamtwassergehalt zeigt sich nur bei der Außenwand West des aktiv beregneten Versuchsgebäudes 5. Diese erreicht im Jahr 2020 einen Maximalwert des Gesamtwassergehalts von 22,173 kg/m² und einen Mittelwert von 14,102 kg/m² (siehe Abb. 297 und Abb. 298).



Ergänzend zu den Berechnungsergebnissen der Bauteilsimulationen mit einer aktiven Entfeuchtung der Innenraumluft sind in Abb. 299 und Abb. 300 die Berechnungsergebnisse bei Berücksichtigung einer manuellen Lüftung dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl über den gesamten Zeitraum der Simulationsberechnung (siehe Abb. 297 und Abb. 299) als auch über das letzte Simulationsjahr (siehe Abb. 298 und Abb. 300) die Kurven zu den Gesamtwassergehalten sehr ähnliche Verläufe aufweisen. In beiden Simulationsvarianten ist der beste Feuchteschutz beim Versuchsgebäude 2 und der schlechteste Feuchteschutz beim Versuchsgebäude 3^{*} gegeben.





Abb. 300 - Gesamtwassergehalt der Außenwand West bei manueller Lüftung (01.01.2020 bis 31.12.2020), A1

Unter Berücksichtigung der Mittelwerte des Gesamtwassergehalts (siehe Tab. 111) wird deutlich, dass die westlichen Außenwände bei manueller Lüftung des Innenraums tendenziell eine größere Feuchtigkeitsbelastung aufweisen. Am stärksten ist die Zunahme bei den Außenwänden, die auch bei einer aktiven Luftentfeuchtung durch einen hohen Gesamtwassergehalt gekennzeichnet waren (Versuchsgebäude 3^{*} und 5). Deutlich schwächer ist diese hingegen beim Versuchsgebäude 2 und 3. Nur beim Versuchsgebäude 1 konnte eine geringe Abnahme des gemittelten Gesamtwassergehaltes der Außenwand West in Höhe von 0,007 kg/m² festgestellt werden.

Versuchsgebäude mit	Kleinster Gesamtwassergehalt	Größter Gesamtwassergehalt	Gemittelter Gesamtwassergehalt
aktiver Eurenneuentung	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]
1	0,691	3,788	1,353
2	0,545	0,870	0,683
3	0,813	1,964	1,297
3*	7,958	16,563	11,956
4	1,402	5,325	2,479
5	6,721	22,173	14,102
Versuchsgebäude mit	Kleinster Gesamtwassergehalt	Größter Gesamtwassergehalt	Gemittelter Gesamtwassergehalt
manuener Lurtung	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]
1	0,745	3,670	1,346
2	0,522	0,938	0,709
3	0,871	1,898	1,318
3*	8,756	16,634	12,367
4	1,652	5,355	2,589
5	7,269	23,624	15,150

Tab. 111 - Gesamtwassergehalt der Außenwand West für das letzte Jahr der Simulation (2020), T1



Ergänzend zum Gesamtwassergehalt wurde für das Mauerwerk der Außenwand West der über den Mauerwerksquerschnitt gemittelte Wassergehalt bestimmt. Der Verlauf dieses Wassergehalts über das letzte Jahr der Simulation ist für die Variante aktive Luftentfeuchtung in Abb. 301 und für die Variante manuelle Lüftung in Abb. 302 dargestellt. Für beide Varianten zeigen sich jedoch ähnliche Kurvenverläufe, wie beim Gesamtwassergehalt (siehe Abb. 298 und Abb. 300). Einen Überblick zu den Minimal-, Maximal- und Mittelwerten dieser Kurvenverläufe gibt Tab. 112.

Kleinster Wassergehalt	Größter Wassergehalt	Gemittelter Wassergehalt	
[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	
2,321	14,752	4,967	
1,829	2,855	2,354	
2,351	4,061	3,287	
29,108	57,581	43,094	
2,595	18,171	6,753	
26,208	87,605	55,562	
Kleinster Wassergehalt	Größter Wassergehalt	Gemittelter Wassergehalt	
[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m³]	
2,475	14,341	4,930	
1,804	3,059	2,426	
2,590	4,039	3,340	
32,023	57,941	44,615	
3,140	18,369	7,043	
	Kleinster Wassergehalt [kg/m³] 2,321 1,829 2,351 29,108 29,595 26,208 Kleinster Wassergehalt 2,475 1,804 2,590 32,023	Kleinster Wassergehalt Größter Wassergehalt [kg/m³] [kg/m³] 2,321 14,752 1,829 2,855 2,351 4,061 29,108 57,581 26,208 87,605 Kleinster Wassergehalt Größter Wassergehalt [kg/m³] [kg/m³] [kg/m³] [kg/m³] 1,804 3,059 2,590 4,039 32,023 57,941	

Tab. 112 - Wassergehalt des Mauerwerks (Außenwand West) für das letzte Jahr der Simulation (2020), T1



Für das Versuchsgebäude 3^{*} mit defekter Fassadenfarbe ist der Wassergehalt des Mauerwerks der Außenwände Nord, Ost, Süd und West in der Abb. 303 (Variante aktive Luftentfeuchtung) und in der Abb. 304 (Variante manuelle Lüftung) dargestellt. Dabei handelt es sich um den Verlauf des über den Mauerwerksquerschnitt gemittelten Wassergehalts im letzten Simulationsjahr. Anhand der beiden Abbildungen wird sichtbar, dass das Mauerwerk der Außenwand West die höchsten Werte für die Feuchtigkeitsbelastung aufweist. Die weiteren Außenwände sind hingegen durch deutlich kleinere Werte der Feuchtigkeitsbelastung gekennzeichnet. So ist der gemittelte Wassergehalt der Außenwand Nord um 40,11 kg/m³, der Außenwand Ost um 23,45 kg/m³ und der Außenwand Süd um 39,17 kg/m³ niedriger, als bei der Außenwand West (Variante aktive Luftentfeuchtung). Für die Variante manuelle Lüftung zeigen sich ähnliche Unterschiede (siehe Tab. 113).

Außenwand bei	Kleinster Wassergehalt	Größter Wassergehalt	Gemittelter Wassergehalt
aktiver Luftentfeuchtung	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Nord	2,371	3,598	2,982
Ost	11,329	26,624	19,644
Süd	2,534	5,493	3,926
West	29,108	57,581	43,094
Außenwand bei manueller Lüftung	Kleinster Wassergehalt	Größter Wassergehalt	Gemittelter Wassergehalt
	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
Nord	2,500	3,803	3,111
Ost	14,616	28,944	22,222
Süd	2,719	6,278	4,106
West	32,023	57,941	44,615

Tab. 113 - Wassergehalt des Mauerwerks (Versuchsgebäude 3[°]) für das letzte Jahr der Simulation (2020), T1

4.4.2 Feuchtigkeitsverteilung

In Abb. 305 bis Abb. 310 ist der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit (hellgrüner Bereich) und des Wassergehaltes (hellblauer Bereich) über den Querschnitt der Außenwand West für das letzte Jahr der Simulationsberechnungen (01.01.2020 bis 31.12.2020) dargestellt. Die dunkelgrüne Linie im hellgrünen Bereich beschreibt dabei den Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über den Querschnitt der Außenwand zum letzten Zeitpunkt der Simulation (31.12.2020, 23:00 Uhr). Die dunkelblaue Linie im hellblauen Bereich bildet ebenfalls für den letzten Zeitpunkt der Simulation den Verlauf des Wassergehalts über den Außenwandquerschnitt ab. Die Abbildungen beziehen sich jeweils auf die erste Variante der Bauteilsimulation, bei der eine aktive Luftentfeuchtung zugrunde gelegt wird.



Abb. 305 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 1 bei aktiver Luftentfeuchtung, A1



Abb. 307 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 3 bei aktiver Luftentfeuchtung, A1







Abb. 306 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 2 bei aktiver Luftentfeuchtung, A1



Abb. 308 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 3^{*} bei aktiver Luftentfeuchtung, A1



Abb. 310 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 5 bei aktiver Luftentfeuchtung, A1

Durch die Gegenüberstellung von Abb. 305 und Abb. 306 sowie von Abb. 305 und Abb. 307 wird deutlich, dass die Hydrophobierung und der Außenputz mit hydrophob eingestellter Fassadenfarbe die Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks reduzieren. Vor allem im äußeren Mauerwerksbereich bei einer Tiefe von 1 cm zeigt sich, dass im ungeschützten Zustand (Versuchsgebäude 1) temporär Wassergehalte von bis zu 80,4 kg/m³ erreicht werden. Im geschützten Zustand sind diese erheblich kleiner und betragen beim Versuchsgebäude 2 maximal 5,7 kg/m³ und beim Versuchsgebäude 3 maximal 10,2 kg/m³. Beim ungeschützten Mauerwerk des Versuchsgebäudes 4 ergibt sich in der gleichen Tiefe von 1 cm ein Wassergehalt von maximal 87,6 kg/m³.

Erheblich höhere Wassergehalte stellen sich über den gesamten Querschnitts des Mauerwerks beim aktiv beregneten Versuchsgebäude 5 ein (siehe Abb. 310). Bei der Feuchtigkeitsverteilung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die aktive Beregnung durch eine Feuchtequelle über die äußeren 3 cm des Mauerwerks abgebildet wurde. Dies hat zur Folge, dass die Feuchtigkeitsbelastung im äußersten Wandbereich abfällt (hellblauer Bereich), obwohl am realen Bauteil ein Anstieg zu erwarten wäre. Beachtlich ist jedoch, dass trotz der regelmäßigen Beregnung der Momentanwert des Wassergehalts (dunkelblaue Linie) im äußeren Mauerwerksbereich kleiner ist, als beim Versuchsgebäude 3^{*} mit Außenputz und defekter Fassadenfarbe (siehe Abb. 308). So beträgt in einer Tiefe von 1 cm der Momentanwert 15,2 kg/m³ für das Versuchsgebäude 5 und 72,2 kg/m³ für das Versuchsgebäude 3^{*}. Damit ergibt sich für den letzten Zeitpunkt der Simulationsberechnung (31.12.2020, 23:00 Uhr) eine Differenz des Wassergehalts von 57,0 kg/m³.



Abb. 311 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 1 bei manueller Lüftung, A1



Abb. 313 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 3 bei manueller Lüftung, A1



von Versuchsgebäude 4 bei manueller Lüftung, A1



Abb. 312 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 2 bei manueller Lüftung, A1



Abb. 314 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 3[°] bei manueller Lüftung, A1



Abb. 316 - Feuchtigkeitsverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 5 bei manueller Lüftung, A1

Die Ergebnisse der zweiten Variante der Bauteilsimulation, die eine Entfeuchtung des Innenraums durch manuelle Lüftung berücksichtigt, sind in Abb. 311 bis Abb. 316 dargestellt. Die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit und des Wassergehalts korrespondieren sehr stark mit denen der ersten Simulationsvariante. Unterschiede zeigen sich vor allem dadurch, dass die weiter innen liegenden Wandbereiche durch größere Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit und somit auch des Wassergehalts geprägt sind. In den weiter außen liegenden Wandbereichen lassen sich jedoch keine relevanten Unterschiede feststellen.

4.4.3 Temperaturverteilung

Für die Außenwand West der Versuchsgebäude 1 bis 5 ist die Temperaturverteilung über den Wandquerschnitt bei aktiver Luftentfeuchtung in Abb. 317 bis Abb. 322 dargestellt. Der hellrote Bereich kennzeichnet dabei die Schwankungen der Bauteiltemperaturen über den Zeitraum des letzten Simulationsjahres (01.01.2020 bis 31.12.2020). Die dunkelrote Linie stellt hingegen eine Momentaufnahme der Temperaturverteilung für den letzten Zeitschritt der Simulationsberechnung dar (31.12.2020, 23:00 Uhr).



Abb. 317 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 1 bei aktiver Luftentfeuchtung, A1



Abb. 319 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 3 bei aktiver Luftentfeuchtung, A1



Versuchsgebäude 4 bei aktiver Luftentfeuchtung, A1



Abb. 318 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 2 bei aktiver Luftentfeuchtung, A1



Abb. 320 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 3^{*} bei aktiver Luftentfeuchtung, A1



Abb. 322 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 5 bei aktiver Luftentfeuchtung, A1

Ergänzend zu den Temperaturverteilungen für die Außenwand West der 5 Versuchsgebäude ist in Abb. 323 deren innenseitige Oberflächentemperatur für den Zeitraum des letzten Simulationsjahres bei aktiver Luftentfeuchtung dargestellt. Bei den einzelnen Kurvenverläufen handelt es sich um den gleitenden Mittelwert über 10 Tage.



Anhand der Abb. 317 bis Abb. 322 wird deutlich, dass sich die Versuchsgebäude in Hinblick auf die Temperaturverteilung über den Querschnitt der Außenwand West kaum unterscheiden. Nur beim Versuchsgebäude 4 kann ein stärkerer Temperaturabfall in der Dämmebene festgestellt werden. Größere Unterschiede treten aber beim Vergleich der innenseitigen Oberflächentemperaturen auf (siehe Abb. 323). Hier zeigt sich, dass das Versuchsgebäude 5 in den Wintermonaten durch die kleinsten und das Versuchsgebäude 4 durch die größten Werte gekennzeichnet ist. Zugleich wird mit Versuchsgebäude 2 und 5 deutlich, dass durch die unterschiedliche Feuchtigkeitsbelastung der westlichen Außenwände eine mittlere Temperaturdifferenz von 0,66 °C im Januar 2020 resultiert.



Abb. 324 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 1 bei manueller Lüftung, A1



Abb. 326 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 3 bei manueller Lüftung, A1







Abb. 325 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 2 bei manueller Lüftung, A1



Abb. 327 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 3^{*} bei manueller Lüftung, A1



Abb. 329 - Temperaturverteilung der Außenwand West von Versuchsgebäude 5 bei manueller Lüftung, A1

Für die Variante manuelle Lüftung zeigen sich ähnliche Temperaturverteilungen (siehe Abb. 324 bis Abb. 329) und ähnliche Verläufe für die innenseitige Oberflächentemperatur (siehe Abb. 330), wie bei der Variante aktive Luftentfeuchtung. Der Vergleich von Versuchsgebäude 2 und 5 ergibt eine Differenz von 0,75 °C für die innenseitige Oberflächentemperatur im Januar 2020.



4.4.4 Wärmestromdichte

Der Verlauf der Wärmestromdichte ist für die Außenwand West der Versuchsgebäude 1 bis 5 in der Abb. 331 und der Abb. 332 als gleitender Tagesmittelwert über die erste und zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres dargestellt. In Anlehnung an das "Untersuchungskonzept 1 - Messen und Auswerten" wurde für die erste Heizphase der Zeitraum 01.01.2020 bis 30.04.2020 und für die zweite Heizphase der Zeitraum 01.10.2020 bis 31.12.2020 festgelegt.



Abb. 331 - Wärmestromdichte der Außenwand West bei aktiver Luftentfeuchtung (1. Heizphase, gl. Tagesmittel), A1

Sowohl mit Abb. 331 als auch mit Abb. 332 wird ersichtlich, dass die Verläufe der einzelnen Kurven in den kälteren Monaten weiter auseinanderliegen als in den wärmeren Monaten der beiden Heizphasen. Unter Berücksichtigung des Gesamtwassergehalts der Außenwände (siehe Abb. 298) ergibt sich somit ein größerer Feuchtigkeitseinfluss auf die Wärmestromdichte bei niedrigeren als bei höheren Außentemperaturen. Weiterhin geht aus den Kurvenverläufen hervor, dass im Mittel die größten Werte für die Wärmestromdichte mit -30,216 W/m² in der ersten Heizphase 2020 und mit -27,448 W/m² in der folgenden Heizphase von dem aktiv beregneten Versuchsgebäude 5 erreicht werden. Gegenüber dem hydrophobierten Versuchsgebäude 2, das in der ersten Heizphase 2020 eine gemittelte Wärmestromdichte von -26,637 W/m2 und in der zweiten Heizphase 2020 von -22,232 W/m² erreicht, entspricht dies einer Steigerung um 13,44 % bzw. 23,46 %. Der Vergleich von Versuchsgebäude 2 und 3^{*} zeigt zudem, dass der zusätzliche Wärmeschutz des Außenputzes durch den Feuchtigkeitseinfluss vollständig aufgehoben wird. So weist das Versuchsgebäude 3^{*} in der ersten Heizphase eine gemittelte Wärmestromdichte von -28,925 W/m² und in der zweiten Heizphase von -23,625 W/m² auf. Gegenüber dem hydrophobierten Versuchsgebäude entspricht dies einer Steigerung der gemittelten Wärmestromdichte um 8,59 % bzw. 6,27 %. Deutlich wird mit Abb. 331 und Abb. 332 allerdings auch, dass bei den Wetterbedingungen am Versuchsstandort die hydrophobierte Außenwand West (Versuchsgebäude 2) gegenüber der unbehandelten Außenwand West (Versuchsgebäude 1) rechnerisch nur eine geringe Verbesserung des Wärmeschutzes erzielt. Bezogen auf die gemittelte Wärmestromdichte beträgt diese 1,77 % in der ersten Heizphase 2020 und 1,23 % in der zweiten Heizphase 2020.



Die kleinsten Werte der gemittelten Wärmestromdichte resultieren beim Versuchsgebäude 3 und 4 (siehe Abb. 331 und Abb. 332). Zurückzuführen ist dies auf den zusätzlichen Wärmeschutz durch den Außenputz und die Innendämmung. Jedoch kommt die Wärmedämmwirkung des Außenputzes und des dahinterliegenden Mauerwerks von Versuchsgebäude 3 erst dadurch verstärkt zum Tragen, weil beide Bauteilschichten aufgrund der intakten Fassadenfarbe besser vor Feuchtigkeit geschützt sind (siehe Abb. 307 und Abb. 308). Eine Zusammenstellung aller Simulationsergebnisse zum Wärmeschutz der Außenwand West (bei aktiver Luftentfeuchtung) befindet sich in Tab. 114.

Zeit- aum	Versuchsgebäude mit	Gemittelte Wärmestromdichte	Summierter TransWärmeverlust	Instationärer U-Wert
Z	aktiver Luttentieuentung	[W/m ²]	[kWh/m²]	[W/(m ² K)]
0	1	-27,116	78,09	1,755
202(2	-26,637	76,72	1,724
	3	-25,750	74,16	1,667
hase	3*	-28,925	83,30	1,873
feizț	4	-7,524	21,67	0,487
Ц.	5	-30,216	87,02	1,956
eit- .um	Versuchsgebäude mit	Gemittelte Wärmestromdichte	Summierter TransWärmeverlust	Instationärer U-Wert
N G	aktiver Luitentieuchtung	[W/m ²]	[kWh/m²]	[W/(m ² K)]
0	1	-22,508	49,70	1,828
202(2	-22,232	49,09	1,806
2	3	-21,454	47,37	1,743
ohase	3*	-23,625	52,16	1,919
Ieizț	4	-6,238	13,77	0,507
F	5	-27,448	60,61	2,230

Tab. 114 - Simulationsergebnisse zum Wärmeschutz der Außenwand West bei aktiver Luftentfeuchtung, T1



Für die Variante manuelle Lüftung sind die berechneten Kurvenverläufe der Wärmestromdichte der Außenwand West über die erste Heizphase 2020 in Abb. 333 und über die zweite Heizphase 2020 in Abb. 334 aufgetragen. Im Vergleich zur aktiven Luftentfeuchtung (siehe Abb. 331 und Abb. 332) stellen sich keine relevanten Unterschiede im Verlauf der Kurven dar. Auch die über die Heizphasen gemittelte Wärmestromdichte der Versuchsgebäude 1 bis 4 zeigt bei der Variante manuelle Lüftung nur geringe Abweichungen von den Mittelwerten der Variante aktive Luftentfeuchtung. Beim aktiv beregneten Versuchsgebäude 5 fällt die gemittelte Wärmestromdichte allerdings etwas höher aus. Im Vergleich zur hydrophobierten Außenwand West des Versuchsgebäudes 2 steigt dadurch die Differenz der gemittelten Wärmestromdichte auf 14,96 % in der ersten Heizphase 2020 und auf 24,94 % in der zweiten Heizphase 2020 an. Eine Zusammenstellung aller Simulationsergebnisse zum Wärmeschutz der Außenwand West (bei manueller Lüftung) befindet sich in Tab. 115.



ceit- aum	Versuchsgebäude mit	Gemittelte Wärmestromdichte	Summierter TransWärmeverlust	Instationärer U-Wert
La Z	manuener Luitung	[W/m ²]	[kWh/m²]	[W/(m ² K)]
0	1	-27,090	78,02	1,754
202(2	-26,625	76,68	1,724
	3	-25,739	74,13	1,666
hase	3*	-28,996	83,51	1,877
Ieizp	4	-7,530	21,69	0,487
щ	5	-30,609	88,15	1,982
eit- um	Versuchsgebäude mit	Gemittelte Wärmestromdichte	Summierter TransWärmeverlust	Instationärer U-Wert
La Z	manuener Luitung	[W/m ²]	[kWh/m²]	[W/(m ² K)]
0	1	-22,538	49,76	1,831
202(ŋ	00.050	10.10	4 00-
5	2	-22,252	49,13	1,807
2 -	3	-22,252 -21,483	49,13 47,43	1,807
hase 2 -	2 3 3 [*]	-22,252 -21,483 -23,846	49,13 47,43 52,65	1,807 1,745 1,937
feizphase 2 -	2 3 3 [*] 4	-22,252 -21,483 -23,846 -6,257	49,13 47,43 52,65 13,82	1,807 1,745 1,937 0,508

Tab. 115 - Simulationsergebnisse zum Wärmeschutz der Außenwand West bei manueller Lüftung, T1

In der Tab. 116 ist der Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert der Außenwand West für alle Versuchsgebäude als Absolut- und Relativwert dargestellt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt nach der Heizphase des Simulationsjahres 2020 und nach der Entfeuchtungsvariante der Innenraumluft. Der Feuchtigkeitseinfluss ergibt sich aus der Differenz des instationären U-Wertes der Außenwand West im trockenen und feuchten Zustand. Der trockene Zustand der Außenwand bedeutet, dass deren Bauteilschichten für den gesamten Simulationszeitraum einen Wassergehalt von 0 kg/m³ aufweisen. In der Simulation wird daher ausschließlich mit Trockenwerten der Wärmeleitfähigkeit für die einzelnen Bauteilschichten gerechnet. Der feuchte Zustand der Außenwand bedeutet, dass im Rahmen der Simulationsberechnung ein variierender Wassergehalt für das Bauteil berücksichtigt wird, der sich entsprechend der Materialparameter aus dem anliegenden Innen- und Außenklima ergibt. Im Verlauf der Simulation richtet sich die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bauteilschichten nun nach deren Wassergehalt. Es wird somit im feuchten Bauteilzustand der Außenwand mit einer feuchtigkeitsabhängigen Wärmeleitfähigkeit gerechnet.

Mit den Ergebnissen aus Tab. 116 wird deutlich, dass der größte absolute Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert beim aktiv beregneten Versuchsgebäude 5 und beim Versuchsgebäude 3^{*} gegeben ist. Der kleinste absolute Feuchtigkeitseinfluss zeigt sich hingegen beim hydrophobierten Versuchsgebäude 2 und beim innenseitig gedämmten Versuchsgebäude 4. Im Allgemeinen kann somit abgeleitet werden, dass der Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert unter den Klimabedingungen am Versuchsstandort bei Außenwänden ohne Feuchteschutz oder mit defektem Feuchteschutz am größten ist. Weist die Außenwand jedoch einen funktionierenden Feuchteschutz auf, so reduziert sich der Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert erheblich. Ebenso kann abgeleitet werden, dass sich Feuchtigkeit im Mauerwerk ungedämmter Außenwände stärker auf deren instationären U-Wert auswirkt als Feuchtigkeit im Mauerwerk gedämmter Außenwände.

eit- uum	Versuchsgebäude mit aktiver	Instationärer U-Wert (trocken)	Instationärer U-Wert (feucht)	Feuchtigkeitse instationäi	influss auf den ren U-Wert
Z	Luftentfeuchtung	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[%]
-	1	1,706	1,755	0,049	2,872
2020	2	1,706	1,724	0,018	1,055
1	3	1,633	1,667	0,034	2,082
hase	3*	1,633	1,873	0,240	14,697
leizp	4	0,465	0,487	0,022	4,731
Ξ.	5	1,706	1,956	0,250	14,654
ceit- aum	Versuchsgebäude mit aktiver	Instationärer U-Wert (trocken)	Instationärer U-Wert (feucht)	Feuchtigkeitse instationär	influss auf den ren U-Wert
Z	Luftentfeuchtung	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[%]
0	1	1,785	1,828	0,043	2,409
202(2	1,785	1,806	0,021	1,176
2 -	3	1,707	1,743	0,036	2,109
hase	3*	1,707	1,919	0,212	12,419
Ieizp	4	0,484	0,507	0,023	4,752
Ц	5	1,785	2,230	0,445	24,930
ceit- aum	Versuchsgebäude mit manueller	Instationärer U-Wert (trocken)	Instationärer U-Wert (feucht)	Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert	
Z	Lüftung	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[%]
0	1	1,706	1,754	0,048	2,814
202	2	1,706	1,724	0,018	1,055
- - -	3	1,633	1,666	0,033	2,021
phase	3*	1,633	1,877	0,244	14,942
Heiz	4	0,465	0,487	0,022	4,731
	5	1,706	1,982	0,276	16,178
Zeit- aum	Versuchsgebäude mit manueller	Instationärer U-Wert (trocken)	Instationärer U-Wert (feucht)	Feuchtigkeitse instationä	influss auf den ren U-Wert
	Lüftung	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[%]
0	1	1,785	1,831	0,046	2,577
202	2	1,785	1,807	0,022	1,232
e 2 -	3	1,707	1,745	0,038	2,226
phas	3*	1,707	1,937	0,230	13,474
Heiz]	4	0,484	0,508	0,024	4,959
	5	1,785	2,258	0,473	26,499
	Bauteilzustand trocke	en: Die Außenwände w 0 kg/m ³ berücksich ausschließlich therr	rurden über den Simula tigt. Die Simulationsbe nisch. nurden über den Simula	ationszeitraum mit eine rechnung der Außenwä	em Wassergehalt von ände erfolgte somit
	Bautenzustand reucht: Die Außenwande wurden über den Simulationszeitraum mit einem variierenden Wassergehalt berücksichtigt, dessen Höhe sich aus den Stoffgrößen der Außenwan und dem anliegenden Innen- sowie Außenklima ergibt. Die Simulationsberechnung der Außenwände erfolgte somit hygrothermisch.				en der Außenwand lationsberechnung

Tab. 116 - Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert der Außenwand West, T1
Zusätzlich zur Tab. 116 können die instationären U-Werte der Außenwand West für die Variante aktive Luftentfeuchtung der Abb. 335 entnommen werden. Diese beziehen sich auf die erste und zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres.



Abb. 335 - Instationäre U-Werte der Außenwand West bei aktiver Luftentfeuchtung, A1

Für die Variante manuelle Lüftung befindet sich die grafische Zusammenstellung der instationären U-Werte der Außenwand West in Abb. 336. Auch hier beziehen sich die instationären U-Werte auf die erste und zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres.



Abb. 336 - Instationäre U-Werte der Außenwand West bei manueller Lüftung, A1

Beide Abbildungen zum instationären U-Wert der Außenwand West (siehe Abb. 335 und Abb. 336) verdeutlichen noch einmal grafisch, in welchem Umfang die Wärmedämmeigenschaft eines Bauteils durch dessen Feuchtigkeitsbelastung beeinflusst werden kann.

4.5 Berechnung - Gebäudesimulation

4.5.1 Heizwärmebedarf

Für die erste und zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres (01.01.2020 bis 30.04.2020 und 01.10.2020 bis 31.12.2020) ist der Heizwärmebedarf der 5 Versuchsgebäude für die Variante aktive Luftentfeuchtung in Abb. 337 dargestellt. Der berechnete Heizwärmebedarf gibt an, wie viel Wärme durch die Heizung an den Innenraum des jeweiligen Versuchsgebäudes übergeben werden muss, um die definierte Innenraumtemperatur von 20,0 °C aufrecht zu erhalten.



Abb. 337 - Heizwärmebedarf der 5 Versuchsgebäude bei aktiver Luftentfeuchtung, A1

In der ersten und zweiten Heizphase 2020 zeigt sich, dass durch die hydrophobierten Außenwände des Versuchsgebäudes 2 ein geringerer Heizwärmebedarf resultiert als beim Versuchsgebäude 1 mit unbehandelten Außenwänden. Die Einsparung beträgt unter den angesetzten Wetterbedingungen am Versuchsstandort in der ersten Heizphase 42,18 kWh bzw. 1,07 % und in der zweiten Heizphase 21,14 kWh bzw. 0,85 %. Beim Versuchsgebäude 3 ist die Einsparung etwas größer und beträgt im Vergleich zum Versuchsgebäude 1 in der ersten Heizphase 135,08 kWh bzw. 3,41 % und in der zweiten Heizphase 83,84 kWh bzw. 3,35 %. Die gegenüber dem Versuchsgebäude 2 etwas höhere Einsparung des Versuchsgebäudes 3 ist allerdings weniger auf einen besseren Feuchteschutz der Fassadenfarbe zurückzuführen, sondern mehr auf die zusätzliche Wärmedämmwirkung des 2 cm starken Außenputzes. Beim Versuchsgebäude 3^{*} zeigt sich zugleich, dass die Wärmedämmwirkung des Außenputzes bei einer defekten Fassadenfarbe vollständig aufgehoben wird. So beträgt der Heizwärmebedarf von Versuchsgebäude 3^{*} in der ersten Heizphase 4.055,60 kWh und ist somit um 229,38 kWh bzw. 6,00 % höher als beim Versuchsgebäude 3 und um 94,3 kWh bzw. 2,38 % höher als beim Versuchsgebäude 1. Noch deutlicher wird der Einfluß von Mauerwerksfeuchtigkeit auf den Heizwärmebedarf beim Versuchsgebäude 5. Dieses weist gegenüber dem Versuchsgebäude 1 in der ersten Heizphase einen um 391,73 kWh bzw. 9,89 % höheren Bedarf auf. In der zweiten Heizphase beträgt der Mehrbedarf sogar 444,21 kWh bzw. 17,75 %. Die mit Abstand größten Einsparungen gegenüber dem Versuchsgebäude 1 zeigt in beiden Heizphasen das Versuchsgebäude 4.

Für die Variante manuelle Lüftung ist der Heizwärmebedarf der 5 Versuchsgebäude sowohl über die erste als auch über die zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres in der Abb. 338 dargestellt. Entgegen der Variante aktive Luftentfeuchtung enthalten die Bedarfswerte auch Wärmeverluste und -gewinne, die aus der Gebäudelüftung resultieren. Damit ergibt sich für alle Versuchsgebäude eine größere von der Heizung zu übergebende Wärmemenge, um die festgelegte Innenraumtemperatur von 20 °C aufrecht zu erhalten (siehe Abb. 337 und Abb. 338).



Abb. 338 - Heizwärmebedarf der 5 Versuchsgebäude bei manueller Lüftung, A1

Dennoch zeigen sich bei den berechneten Heizwärmebedarfswerten der Variante manuelle Lüftung (siehe Abb. 338) tendenziell ähnliche Unterschiede zwischen den 5 Versuchsgebäuden, wie bei der Variante aktive Luftentfeuchtung. So ist der Bedarfswert des Versuchsgebäudes 2 in der ersten Heizphase um 40,51 kWh bzw. 0,99 % und in der zweiten Heizphase um 22,37 kWh bzw. 0,86 % niedriger als beim Versuchsgebäude 1. Auch der Vergleich von Versuchsgebäude 3 und 1 ergibt eine ähnliche Differenz von 133,49 kWh bzw. 3,25 % für die erste Heizphase und von 84,29 kWh bzw. 3,25 % für die zweite Heizphase. Die durch die unterschiedlichen Wassergehalte der Außenwände hervorgerufene Abweichung beim Heizwärmebedarf der Versuchsgebäude 3 und 3^{*} entspricht mit 240,78 kWh bzw. 6,06 % in der ersten Heizphase und mit 133,57 kWh bzw. 5,32 % in der zweiten Heizphase ebenfalls der Größenordnung der Variante aktive Luftentfeuchtung.

Das Versuchsgebäude 5 zeigt beim Vergleich mit dem Versuchsgebäude 1 hingegen etwas größere Unterschiede. So betragen diese in der ersten Heizphase 446,79 kWh bzw. 10,87 % und in der zweiten Heizphase 478,64 kWh bzw. 18,43 %. Der gegenüber der ersten Heizphase deutlich höhere Bedarfswert der zweiten Heizphase ist dabei vor allem auf die aktive Beregnung der Außenwände zurückzuführen. Da in der Simulationsberechnung ein jährlicher Beregnungszeitraum vom 01. Mai bis zum 31. Oktober angesetzt wird, kam es in der zweiten Heizphase zu einer erheblich höheren Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände als in der ersten Heizphase (siehe Abb. 300).

Der mit Abstand kleinste Heizwärmebedarf ist unabhängig von der Heizphase weiterhin bei dem Versuchsgebäude 4 gegeben. Gegenüber dem Versuchsgebäude 1 ist die absolute Einsparung etwas größer als bei der Variante aktive Luftentfeuchtung.

Zusätzlich zum ermittelten Heizwärmebedarf der 5 Versuchsgebäude, bei denen die Außenwände im feuchten Zustand rechnerisch berücksichtigt wurden (siehe Abb. 337 und Abb. 338), erfolgt die Ermittlung des Heizwärmebedarfs auch mit den Außenwänden im trockenen Zustand. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse beider Bauteilzustände ergibt nun den Feuchtigkeitseinfluss auf den Heizwärmebedarf. Für die Variante aktive Luftentfeuchtung können die ermittelten Bedarfswerte und der damit resultierende Feuchtigkeitseinfluss der Abb. 339 sowie Tab. 117 entnommen werden.



Abb. 339 - Feuchtigkeitseinfluss auf den Heizwärmebedarf im letzten Simulationsjahr bei aktiver Luftentfeuchtung, A1

Für die Variante manuelle Lüftung sind die Bedarfswerte beider Bauteilzustände in Abb. 340 und ebenfalls in Tab. 117 dargestellt. Wie bei der Variante aktive Luftentfeuchtung beziehen sich diese auf die erste und zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres.



Abb. 340 - Feuchtigkeitseinfluss auf den Heizwärmebedarf im letzten Simulationsjahr bei manueller Lüftung, A1

ceit- aum	Versuchsgebäude mit aktiver	Heizwärmebedarf (trocken)	Heizwärmebedarf (feucht)	Feuchtigkeitse Heizwärr	influss auf den mebedarf
	Luftentfeuchtung	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
0	1	3.883,02	3.961,30	78,28	2,02
202(2	3.883,02	3.919,12	36,10	0,93
-	3	3.767,48	3.826,22	58,74	1,56
hase	3*	3.767,48	4.055,60	288,12	7,65
leizp	4	1.144,31	1.188,41	44,10	3,85
іЦ	5	3.883,02	4.353,03	470,01	12,10
ceit- aum	Versuchsgebäude mit aktiver	Heizwärmebedarf (trocken)	Heizwärmebedarf (feucht)	Feuchtigkeitse Heizwärr	influss auf den mebedarf
Nü	Luftentfeuchtung	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
0	1	2.455,72	2.502,09	46,37	1,89
202(2	2.455,72	2.480,95	25,23	1,03
2 -	3	2.381,19	2.418,25	37,06	1,56
hase	3*	2.381,19	2.535,74	154,55	6,49
leizp	4	723,77	752,11	28,34	3,92
ц	5	2.455,72	2.946,30	490,58	19,98
ceit- aum	Versuchsgebäude mit manueller	Heizwärmebedarf (trocken)	Heizwärmebedarf (feucht)	Feuchtigkeitseinfluss auf den Heizwärmebedarf	
Z	Lüftung	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
0	1	4.034,03	4.108,91	74,88	1,86
202(2	4.034,03	4.068,40	34,37	0,85
	3	3.918,50	3.975,42	56,92	1,45
ohase	3*	3.918,50	4.216,20	297,70	7,60
leizp	4	1.277,06	1.321,98	44,92	3,52
Ц	5	4.034,03	4.555,70	521,67	12,93
ceit- aum	Versuchsgebäude mit manueller	Heizwärmebedarf (trocken)	Heizwärmebedarf (feucht)	Feuchtigkeitse Heizwärr	influss auf den mebedarf
NG	Lüftung	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
0	1	2.547,29	2.597,12	49,83	1,96
202(2	2.547,29	2.574,75	27,46	1,08
2 -	3	2.472,76	2.512,83	40,07	1,62
ohase	3*	2.472,76	2.646,40	173,64	7,02
HeizJ	4	804,24	834,60	30,36	3,77
Н	5	2.547,29	3.075,76	528,47	20,75
	Bauteilzustand trocke Bauteilzustand feucht	en: Alle Bauteile der Ge über den Simulation Die Simulationsbere : Alle Bauteile, mit A mit einem Wasserge	bäudehülle (Bodenpla nszeitraum mit einem V echnung dieser Bauteik usnahme der Außenwä ehalt von 0 kg/m³ berü	tte, Außenwände, Dach Wassergehalt von 0 kg/ e erfolgte ausschließlic inde, wurden über den ucksichtigt. Die Bodenp	n und Tür) wurden ′m³ berücksichtigt. h thermisch. Simulationszeitraum latte, das Dach und
		die Tür wurden son hygrothermisch.	nit ausschließlich thern	nisch berechnet. Die Au	ıßenwände hingegen

Tab. 117 - Feuchtigkeitseinfluss auf den Heizwärmebedarf im letzten Simulationsjahr (2020), T1

4.5.2 Heizleistung

Ergänzend zum berechneten Heizwärmebedarf der 5 Versuchsgebäude mit aktiver Luftentfeuchtung (siehe Abb. 337) wurde für diese auch die Heizleistung mittels Gebäudesimulation bestimmt, die zur Sicherstellung der festgelegten Innenraumtemperatur von 20 °C erforderlich ist. Der Verlauf der Heizleistung bzw. Heizlast kann für die erste und zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres der Abb. 341 und der Abb. 342 entnommen werden.



Das Versuchsgebäude 5 hebt sich in beiden Heizphasen durch die größten Heizlast-Werte und das Versuchsgebäude 4 durch die kleinsten Heizlast-Werte ab. Die Heizlast-Kurvenverläufe der weiteren Versuchsgebäude liegen hingegen dicht zusammen. Relevant ist allerdings, dass sich der maximale Tageswert der Heizlast bei den Versuchsgebäuden 2 und 5 allein aufgrund der unterschiedlichen Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände in der ersten Heizphase um 0,25 kW und in der zweiten Heizphase um 0,24 kW unterscheidet. Dies entspricht einer Erhöhung der maximalen Heizleistung von Versuchsgebäude 5 gegenüber Versuchsgebäude 2 um 11,28 % bzw. 13,15 %.



Auch für die 5 Versuchsgebäude in der Variante manuelle Lüftung ist neben dem Heizwärmebedarf (siehe Abb. 338) die Heizleistung über beide Heizphasen des letzten Simulationsjahres bestimmt worden. Die berechneten Heizlast-Kurven sind in Abb. 343 und Abb. 344 dargestellt.



Sowohl in der ersten als auch in der zweiten Heizphase zeigen sich sehr ähnliche Kurvenverläufe wie bei der Variante aktive Luftentfeuchtung (siehe Abb. 341 und Abb. 342). Die größten Werte der Heizlast werden weiterhin von dem Versuchsgebäude 5 und die kleinste Werte der Heizlast von dem Versuchsgebäude 4 erreicht. Unterschiede zur Variante aktive Luftentfeuchtung zeigen sich hingegen beim Vergleich der Maximalwerte der Heizlast von Versuchsgebäude 2 und 5. So beträgt die Abweichung zwischen deren maximalem Tageswert in der ersten Heizphase 0,30 kW und in der zweiten Heizphase 0,27 kW. Dies entspricht einer feuchtigkeitsbedingten Erhöhung der Heizlast von Versuchsgebäude 5 gegenüber dem Versuchsgebäude 2 um 13,08 % in der ersten Heizphase und um 14,52 % in der zweiten Heizphase. Damit wird deutlich, dass die Feuchtigkeitsbelastung von Außenwänden nicht nur auf den Heizwärmebedarf, sondern auch auf die Heizleistung relevante Auswirkungen haben kann.



4.6 Auswertung - feuchtebedingte Wärmeverluste

4.6.1 Quantifizierung

Mit den Ergebnissen der Bauteil- und Gebäudesimulationen können die folgenden Aussagen zur Quantifizierung der energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit getroffen werden:

- 1. In beiden Varianten der 5 Versuchsgebäude (aktive Luftentfeuchtung und manuelle Lüftung) bestätigt sich am Beispiel der Außenwand West im hygrothermisch eingeschwungenen Zustand, dass die Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks (Wassergehalt) die Wärmedämmeigenschaften und die Transmissionswärmeverluste des Bauteils in einem relevanten Umfang beeinflussen kann. Die energetischen Auswirkungen einer hohen Feuchtigkeitsbelastung von Außenwänden zeigen sich aber nicht nur bauteil-, sondern auch gebäudebezogen beim Heizwärmebedarf und bei der Heizleistung, die zur Sicherstellung des gewünschten Innenklimas erforderlich sind.
- 2. Besonders deutlich wurde der Einfluss von Mauerwerksfeuchtigkeit auf den Heizwärmebedarf beim aktiv beregneten Versuchsgebäude 5. Gegenüber dem unbehandelten Versuchsgebäude 1 konnte unter Berücksichtigung einer manuellen Innenraumlüftung ein um 18,43 % höherer Heizwärmebedarf in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres berechnet werden. Über dem gleichen Zeitraum und unter Berücksichtigung der gleichen Rahmenbedingungen (manuelle Lüftung des Innenraums) beträgt die Steigerung des Heizwärmebedarfs im Vergleich zum hydrophobierten Versuchsgebäude 2 sogar 19,46 %. Dies entspricht einem Mehrbedarf von 501,01 kWh bei einem beheizten Innenraumvolumen (Nettovolumen) von 20,48 m³.
- 3. Der Einfluss von Mauerwerksfeuchtigkeit auf den maximalen Tageswert der Heizleistung wird ebenso beim Vergleich der Versuchsgebäude 2 und 5 deutlich. Jedoch fällt dieser gedämpfter aus als beim Heizwärmebedarf. So ist der maximale Tageswert beim Versuchsgebäude 5 unter Berücksichtigung einer manuellen Lüftung des Innenraums in der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres um 13,08 % und in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres um 14,52 % höher als beim Versuchsgebäude 2. Dies entspricht einer erforderlichen Mehrleistung der Heizung von 0,27 kW bis 0,3 kW.
- 4. Bauteilbezogen zeigen sich die energetischen Auswirkungen einer hohen Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks beim Vergleich der Versuchsgebäude 3 und 3^{*}. Obwohl beide Versuchsgebäude durch den gleichen Wandaufbau gekennzeichnet sind und sich nur durch den Feuchteschutz der Fassadenfarbe unterscheiden, konnten für deren westliche Außenwand deutliche Abweichungen bei den Wärmedämmeigenschaften festgestellt werden. So weist das Versuchsgebäude 3^{*} mit Außenputz und defekter Fassadenfarbe in der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres einen 12,67 % höheren instationären U-Wert auf als das Versuchsgebäude 3 mit Außenputz und intakter Fassadenfarbe (Variante manuelle Lüftung). Die zusätzliche Wärmedämmwirkung des Außenputzes wird somit vollständig aufgehoben, wie der Vergleich mit der Außenwand West des Versuchsgebäudes 1 zeigt. Noch größere Auswirkungen auf den Wärmeschutz zeigen sich aber bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 5. Aufgrund des hohen Wassergehalts des Mauerwerks stellt sich in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres ein um 23,32 % höherer instationärer U-Wert ein als bei dem Versuchsgebäude 1 (Variante manuelle Lüftung). Dies entspricht einem um 11,63 kWh/m² größeren Transmissionswärmeverlust.

- 5. Durch den Vergleich der instationären U-Werte, aber auch der Heizwärmebedarfswerte für den trockenen und für den feuchten Zustand der Außenwände wird deutlich, dass die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit durch den Feuchteschutz der Wandkonstruktion und durch die örtlichen Wetterbedingungen geprägt werden. Sind die Außenwände nur einer geringen Schlagregenbelastung ausgesetzt, so reduzieren sich die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit deutlich. Dies bestätigt sich insbesondere beim Versuchsgebäude 1 und beim Versuchsgebäude 5. Während die Abweichung zwischen den instationären U-Werten der Bauteilzustände trocken und feucht beim Versuchsgebäude 5 in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres 26,50 % beträgt, beläuft sich diese beim Versuchsgebäude 1 lediglich auf 2,58 % (Variante manuelle Lüftung). Beim Heizwärmebedarf stellt sich diese Situation für den gleichen Zeitraum (zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres) und unter Anwendung der gleichen Rahmenbedingungen (manuelle Lüftung) ähnlich dar. So beträgt der Unterschied der Bedarfswerte (Bauteilzustand trocken und feucht) 20,75 % für das Versuchsgebäude 5 und 1,96 % für das Versuchsgebäude 1.
- 6. Durch den Vergleich von instationären U-Werten für den trockenen und feuchten Bauteilzustand sowie dem Heizwärmebedarf für den trockenen und feuchten Bauteilzustand wird ebenfalls deutlich, dass Mauerwerksfeuchtigkeit gebäudebezogen eine geringere energetische Relevanz aufweist als bauteilbezogen. So zeigt sich bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 3^{*} ein feuchtigkeitsbedingter Anstieg des instationären U-Wertes um 13,47 %, während der durch Mauerwerksfeuchtigkeit verursachte Anstieg des Heizwärmebedarfs lediglich 7,02 % beträgt (Variante manuelle Lüftung, zweite Heizphase 2020). Zurückzuführen ist dieser Zusammenhang darauf, dass bei den Wetterbedingungen am Versuchsstandort nicht alle Außenwände einer so hohen Schlagregeneinwirkung ausgesetzt sind wie die Außenwand West. Die kleineren Werte der Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände Nord, Ost und Süd führen somit auch zu kleineren instationären U-Werten. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Bauteile Bodenplatte, Flachdach und Eingangstür der Versuchsgebäude aufgrund der Materialität und Konstruktion durch konstante Wärmedämmeigenschaften gekennzeichnet sind. In der Summe sind somit von den Schlagregeneinwirkungen am Versuchsstandort vor allem die Außenwände Ost und West bzw. deren Wärmedämmeigenschaften betroffen. Da diese jedoch nur einen Flächenanteil von ca. 44,66 % an der thermischen Gebäudehülle aufweisen, sind die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit gebäudebezogen (hinsichtlich des Heizwärmebedarfs) geringer, als bauteilbezogen (hinsichtlich des instationären U-Werts).
- 7. Am Beispiel des Versuchsgebäudes 4 konnte festgestellt werden, dass sich bei der von innen gedämmten Außenwand West eine höhere Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks einstellt als bei der ungedämmten Außenwand West des Versuchsgebäudes 1. So beträgt der über das letzte Simulationsjahr gemittelte Wassergehalt des Mauerwerks 7,043 kg/m³ beim Versuchsgebäude 4 und 4,930 kg/m³ beim Versuchsgebäude 1 (Variante manuelle Lüftung). Zugleich zeigt sich, dass trotz des höheren Wassergehalts die absolute Änderung der Wärmedämmeigenschaften der Außenwand geringer ausfällt. Diese beträgt beim Versuchsgebäudes 4 in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres 0,024 W/(m²K) und 0,046 W/(m²K) beim Versuchsgebäude 1 (Variante manuelle Lüftung). Dieser Zusammenhang lässt darauf schließen, dass Feuchtigkeit im Mauerwerk ungedämmter Außenwände deren Wärmedämmeigenschaft stärker beeinflusst, als Feuchtigkeit im Mauerwerk innenseitig gedämmter Außenwände.

4.6.2 Reduzierung

Mit den Ergebnissen der Bauteil- und Gebäudesimulationen können die folgenden Aussagen zu den energetischen Auswirkungen von feuchtigkeitsreduzierenden Maßnahmen getroffen werden:

- 1. Obwohl die normativ berechneten U-Werte für die Außenwände der Versuchsgebäude 1 und 2 keine Differenzen aufweisen, konnte über die hygrothermische Bauteilsimulation nachgewiesen werden, dass sich deren Wärmedämmeigenschaften dennoch leicht unterscheiden. So stellt sich unter den Wetterbedingungen am Versuchsstandort und unter Beachtung des hygrothermisch eingeschwungenen Zustands ein 1,77 % kleinerer instationärer U-Wert in der ersten Heizphase und ein 1,20 % kleinerer instationärer U-Wert in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres bei der hydrophobierten Außenwand West des Versuchsgebäude 2 ein (Variante aktive Luftentfeuchtung). Dies entspricht einer Reduktion der Transmissionswärmeverluste gegenüber der Außenwand West von Versuchsgebäude 1 um 1,37 kWh/m² in der ersten Heizphase und um 0,61 kWh/m² in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres. Unter Berücksichtigung einer manuellen Lüftung konnte für die Außenwand West des Versuchsgebäudes 2 eine ähnliche Reduktion des instationären U-Wertes und der Transmissionswärmeverluste ermittelt werden.
- 2. Die Auswirkungen der Hydrophobierung auf den Heizwärmebedarf des Versuchsgebäudes 2 stellen sich jedoch noch gedämpfter dar. Im Vergleich zum unbehandelten Versuchsgebäude 1 beläuft sich die Einsparung in der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres auf 1,07 % bzw. 42,18 kWh und in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres auf 0,85 % bzw. 21,14 kWh (Variante aktive Luftentfeuchtung). Unter Berücksichtigung einer manuellen Lüftung resultiert in beiden Heizphasen des letzten Simulationsjahres eine vergleichbare Einsparung des Versuchsgebäudes 2 gegenüber dem Versuchsgebäude 1.
- 3. Die energetischen Auswirkungen des Außenputzes mit hydrophob eingestellter Fassadenfarbe gegenüber dem unbehandelten Ziegelsichtmauerwerk zeigen sich bei der Gegenüberstellung der Versuchsgebäude 1 und 3. Bauteilbezogen ergibt sich für die Außenwand West in der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres ein um 5,01 % kleinerer instationärer U-Wert und in der zweiten Heizphase des gleichen Jahres ein um 4,65 % kleinerer instationärer U-Wert beim Versuchsgebäude 3 (Variante aktive Luftentfeuchtung). Handelt es sich jedoch um eine defekte Fassadenfarbe, bei der es zu keiner Abnahme des Wasseraufnahmekoeffizienten der Außenwand kommt, sondern lediglich zu einer Zunahme des Wasserdampfdiffusionswiderstands, dann ist mit einer Verschlechterung der Wärmedämmeigenschaften zu rechnen. Dies zeigt der Vergleich von Versuchsgebäude 1 und 3^{*}. So ist in der ersten Heizphase 2020 (letztes Simulationsjahr) der instationäre U-Wert der Außenwand West von Versuchsgebäude 3^{*} um 6,72 % höher und in der zweiten Heizphase 2020 um 4,98 % höher, als beim Versuchsgebäude 1 (Variante aktive Luftentfeuchtung). Die bauteilbezogenen Auswirkungen der Fassadenfarbe (intakt und defekt) zeigen sich bei der Variante manuelle Lüftung in einer ähnlichen Größenordnung.
- 4. Für die intakte Fassadenfarbe zeigt der Vergleich von Versuchsgebäude 1 und 3, dass sich eine Einsparung um 3,41 % beim Heizwärmebedarf der ersten Heizphase 2020 und um 3,35 % beim Heizwärmebedarf der zweiten Heizphase 2020 ergibt. Im defekten Zustand der Fassadenfarbe kommt es jedoch beim Versuchsgebäude 3^{*} zu einem Mehrbedarf um 2,38 % bzw. um 1,35 % für die erste bzw. zweite Heizphase 2020 (Variante aktive Luftentfeuchtung). Der Minder- und Mehrbedarf zeigen sich bei der Variante manuelle Lüftung in einer ähnlichen Größenordnung.

5. Vergleich und Handlungsempfehlungen

Im Verlauf dieses Kapitels werden die Ergebnisse der beiden angewendeten Untersuchungskonzepte "Messen und Auswerten" sowie "Berechnen und Auswerten" (Variante aktive Luftentfeuchtung) miteinander verglichen und Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet.

Zuvor ist jedoch darauf hinzuweisen, dass mit den angefertigten Bauteil- und Gebäudesimulationen nicht das Ziel verfolgt wurde, die Messungen bzw. die Messergebnisse des Monitoringsystems exakt zu reproduzieren. Daher wurde bei der Eingabe der Versuchsgebäude in der Simulationssoftware keine individuelle Anpassung der Simulationsbedingungen vorgenommen. Stattdessen sollte durch gleiche Simulationsbedingungen der Versuchsgebäude, wie z.B. gleiche Anfangsbedingungen für die Bauteile der Gebäudehülle und das Raumklima (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) sowie gleiche Auslegungsbedingungen der Anlagentechnik (Heiz- und Entfeuchtungsleistung), eine hohe Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse erzielt werden. Erst wenn eine solche Vergleichbarkeit gewährleistet ist, können die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit und von Maßnahmen zur Reduzierung der Mauerwerksfeuchtigkeit belastbar analysiert werden. Im Rahmen des Vergleichs der Untersuchungskonzepte dienen die Simulationsergebnisse somit vor allem dazu, die Tendenzen zu überprüfen, die sich gemäß der Monitoringergebnisse zwischen den einzelnen Versuchsgebäuden abzeichnen.

Zunächst kann jedoch der Bauteilsimulation für die Außenwand West entnommen werden, dass bei aktiver Entfeuchtung der Innenraumluft, ab etwa 01.10.2017 der hygrothermisch eingeschwungene Bauteilzustand bei allen Versuchsgebäuden zu erwarten ist (siehe Abb. 297). Obwohl die einzelnen Versuchsgebäude erst ab dem 19.09.2016 aktiv und zuvor passiv entfeuchtet wurden, lässt dieses Ergebnis darauf schließen, dass die Messungen der vierten Heizphase nur noch geringfügig durch Restfeuchtigkeit aus dem Bauprozess beeinflusst sind. Zugleich bestätigt der über den Querschnitt des Mauerwerks gemittelte Wassergehalt (siehe Abb. 303) die Ergebnisse des Monitoringsystems (siehe Abb. 133) und der Mikrowellenfeuchtemessungen (siehe Abb. 161 bis Abb. 164), dass die höchste Feuchtigkeitsbelastung überwiegend beim Mauerwerk der Außenwand West auftritt. Es ist daher durchaus möglich, dass sich bei dem weniger feuchten Mauerwerk der Außenwände Ost und Süd der hygrothermisch eingeschwungene Zustand bereits früher eingestellt hat.

Hinsichtlich der energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit bestätigen die Ergebnisse der Bauteil- und Gebäudesimulationen die Ergebnisse des Monitoringsystems. So konnte mit einer zunehmenden Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände bei beiden Untersuchungskonzepten sowohl eine Abnahme der Wärmedämmeigenschaften als auch eine Zunahme des Energieaufwands zur Aufrechterhaltung der Innenraumtemperatur festgestellt werden. Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle der Vergleich von Versuchsgebäude 1 und 5. So wurde für die vierte Heizphase vom 01.10.2017 bis 31.12.2017 ein um 16,10 % höherer Gesamtstrom- bzw. Heizwärmeverbrauch beim Versuchsgebäude 5 gemessen, der zur Beheizung auf 20 °C erforderlich war. Der im Rahmen der Gebäudesimulation ermittelte Anstieg des Heizwärmebedarfs beläuft sich für den gleichen Zeitraum des letzten Simulationsjahres auf einen ähnlich hohen Wert von 17,75 %. Noch stärker stellen sich die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit beim Vergleich der Versuchsgebäude 2 und 5 dar. So konnte unter Berücksichtigung der gleichen Heizphasen messtechnisch ein um 19,27 % höherer Heizwärmeverbrauch und rechnerisch ein um 18,76 % höherer Heizwärmebedarf für das Versuchsgebäude 5 ermittelt werden (siehe Tab. 118).

rrsuchs- ebäude	Heizwärmeverbrauch (01.10.17 bis 31.12.17)	Heizwärmebedarf (01.10.20 bis 31.12.20)	Anstieg des Heizwärmeverbrauchs	Anstieg des Heizwärmebedarfs
Ve	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
1	2.106,11	2.502,09	16 10	17 75
5	2.445,25	2.946,30	10,10	17,75
2	2.050,16	2.480,95	10.97	10 76
5	2.445,25	2.946,30	19,27	10,70

Tab. 118 - Feuchtigkeitsbedingter Anstieg des Heizwärmeverbrauchs und -bedarfs, T1

Bauteilbezogen zeigen sich die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit besonders beim Vergleich von Versuchsgebäude 1 und Versuchsgebäude 3. Hier konnte im Zeitraum vom 01.10.2017 bis 31.12.2017 ein um 15,60 % höherer instationärer U-Wert bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 3 gemessen werden. Wie zuvor in den Abschnitten 3.1.4 Baukonstruktion, 3.4.2 Luftfeuchtigkeit und 3.4.3 Wärmestromdichte dargelegt, ist diese erhebliche Abnahme der Wärmedämmeigenschaften vor allem auf den nicht wirksamen Feuchteschutz der Fassadenfarbe und die sich damit einstellende Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks zurückzuführen. Um eine vergleichbare Situation in der Bauteilsimulation abzubilden, wurde das Versuchsgebäude 3^{*} erstellt, das den gleichen Wandaufbau wie das Versuchsgebäude 3 aufweist, jedoch außenseitig durch eine defekte Fassadenfarbe gekennzeichnet ist. In dieser Variante der Bauteilsimulation führt die defekte Fassadenfarbe zu keiner Abnahme des Wasseraufnahmekoeffizienten der Außenwandoberfläche, sondern lediglich zu einer Zunahme des Wasseraufnahmekoeffizienten der Außenwandoberfläche, sondern lediglich zu einer Zunahme des Wasserdampfdiffusionswiderstands. Dadurch konnte für die Außenwand West des Versuchsgebäudes 3^{*} über den Zeitraum vom 01.10.2020 bis 31.12.2020 ein um 4,98 % höherer instationärer U-Wert berechnet werden, als für die Außenwand West des Versuchsgebäudes 1 (siehe Tab. 119).

/ersuchs- gebäude	Gemessener instationärer U-Wert (01.10.17 bis 31.12.17)	Berechneter instationärer U-Wert (01.10.20 bis 31.12.20)	Anstieg des gemessenen instationären U-Werts	Anstieg des berechneten instationären U-Werts	
	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[%]	[%]	
1	1,692	1,828			
3	1,956	-	15,60	4,98	
3*	-	1,919			
2	1,563	1,806			
3	1,956	-	25,14	6,26	
3^{*}	-	1,919			

Tab. 119 - Feuchtigkeitsbedingter Anstieg des instationären U-Werts (Außenwand West), T1

Noch größer stellt sich der Einfluss von Mauerwerksfeuchtigkeit auf den instationären U-Wert der Außenwand West beim Vergleich der Versuchsgebäude 2 und 3 dar. So beläuft sich die Abweichung in der vierten Heizphase der Freilandversuche (01.10.2017 bis 31.12.2017) auf 25,14 %. Die mit den Bauteilsimulationen berechnete Abweichung ist hingegen kleiner und beträgt für den gleichen Zeitraum des letzten Simulationsjahres 6,26 % (siehe Tab. 119). In der Summe konnten somit die durch Mauerwerksfeuchtigkeit verursachten Abweichungen zwischen den gemessenen instationären U-Werten der Außenwand West durch die Bauteilsimulationen tendenziell bestätigt werden.

Zudem werden mit den Gebäudesimulationen die Messwerte des Monitoringsystems dahingehend bestätigt, dass die energetische Relevanz von Mauerwerksfeuchtigkeit gebäudebezogen abnimmt. Zurückzuführen ist dies darauf, dass nicht alle Außenwände einer starken Schlagregeneinwirkung am Versuchsstandort ausgesetzt sind (siehe Abb. 198 und Abb. 199) und daher eine unterschiedlich hohe Feuchtigkeitsbelastung aufweisen (siehe Abb. 303 und Abb. 304). So zeigt sich zwar anhand von Tab. 119, dass sich bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 3 feuchtigkeitsbedingt ein höherer instationärer U-Wert einstellt, als bei der Außenwand West der Versuchsgebäude 1 und 2, allerdings spiegeln sich die prozentualen Unterschiede nicht in der gleichen Höhe beim Vergleich der Heizwärmeverbrauchs- und der Heizwärmebedarfswerte wider (siehe Tab. 120). Während die gemessenen instationären U-Werte einen Mehrverbrauch des Versuchsgebäudes 3 gegenüber den Versuchsgebäuden 1 und 2 erwarten lassen, zeigt sich stattdessen ein Minderverbrauch um 6,89 % bzw. 4,35 %. Bei den berechneten instationären U-Werten und dem Heizwärmebedarfswerten zeigt sich ein ähnlicher Effekt. So konnte zwar ein Mehrbedarf beim Versuchsgebäude 3 gegenüber den Versuchsgebäuden 1 und 2 ermittelt werden, allerdings ist dieser geringer, als es die prozentualen Unterschiede zwischen den berechneten instationären U-Werten erwarten lassen.

rrsuchs- ebäude	Heizwärmeverbrauch (01.10.17 bis 31.12.17)	Heizwärmebedarf (01.10.20 bis 31.12.20)	Anstieg des Heizwärmeverbrauchs	Anstieg des Heizwärmebedarfs	
Ve ge	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]	
1	2.106,11	2.502,09			
3	1.961,00	-	-6,89	1,35	
3*	-	2.535,74			
2	2.050,16	2.480,95			
3	1.961,00	-	-4,35	2,21	
3*	-	2.535,74			

Tab. 120 - Feuchtigkeitsbedingter Anstieg des Heizwärmeverbrauchs und -bedarfs, T1

Weiterhin konnte mit der Gebäude- und Bauteilsimulation bestätigt werden, dass die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit bei ungedämmten Außenwänden größer sind als bei Außenwänden mit einer Innendämmung. Im Verlauf der Freilandversuche zeigte sich dies zunächst dadurch, dass die prozentualen Abweichungen zwischen den gemessenen instationären U-Werten der Versuchsgebäude 1 und 4, sowie zwischen deren Messwerten des Heizwärmeverbrauchs, nur sehr geringen Schwankungen unterlagen. Zugleich konnten bei der Außenwand West der beiden Versuchsgebäude (siehe Abb. 129 bis Abb. 130 sowie Abb. 161 bis Abb. 164) deutliche Änderungen der Feuchtigkeitsbelastung festgestellt werden. Im Rahmen der sich anschließenden Gebäude- und Bauteilsimulationen war es nun möglich für das Versuchsgebäude 1 und 4 den trocken und den feuchten Zustand der Außenwände getrennt voneinander energetisch zu analysieren. Hier zeigte sich bei der Außenwand West, dass trotz einer höheren Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks von Versuchsgebäude 4 (siehe Abb. 301 und Tab. 112), die absolute Änderung des instationären U-Werts kleiner war, als beim Versuchsgebäude 1 (siehe Abb. 335 und Tab. 116). Auch beim berechneten Heizwärmebedarf konnte ein solcher Zusammenhang festgestellt werden. So beläuft sich dessen Änderung (von Bauteilzustand trocken zum Bauteilzustand feucht) beim Versuchsgebäude 1 auf 78,28 kWh und 46,37 kWh (erste und zweite Heizphase 2020). Beim Versuchsgebäude 4 beträgt die Anderung hingegen 44,10 kWh und 28,34 kWh (siehe Abb. 339 und Tab. 117).

Um die energetischen Auswirkungen der Hydrophobierung zu überprüfen, die messtechnisch im Verlauf der Freilandversuche ermittelt wurden, sind in Tab. 121 die gemessenen und berechneten instationären U-Werte der Außenwand West für die Versuchsgebäude 1 und 2 zusammengestellt. Daraus geht hervor, dass sowohl messtechnisch als auch rechnerisch mit der Hydrophobierung eine Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften verbunden ist. Obwohl die durch Bauteilsimulationen berechnete Verbesserung des instationären U-Wertes geringer ausfällt, als die Verbesserung des vor Ort gemessenen instationären U-Werts, bestätigt diese tendenziell die Messergebnisse.

'ersuchs- gebäude	Gemessener instationärer U-Wert (01.10.17 bis 31.12.17)	Berechneter instationärer U-Wert (01.10.20 bis 31.12.20)	Anstieg des gemessenen instationären U-Werts	Anstieg des berechneten instationären U-Werts
> ~~	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[%]	[%]
1	1,692	1,828	7 60	1.20
2	1,563	1,806	-7,02	-1,20

	Tab.	121 -	Auswirkungen	der Hydrophobieru	ing auf den	instationären	U-Wert	(Außenwand	West), '	Т1
--	------	-------	--------------	-------------------	-------------	---------------	---------------	------------	----------	----

Hinsichtlich der Auswirkungen der Hydrophobierung auf den Heizwärmeverbrauch werden die Messwerte der Freilandversuche durch die Ergebnisse der Simulation ebenfalls tendenziell bestätigt (siehe Tab. 122). Sowohl die Mess- als auch die Berechnungswerte weisen für die gewählte Heizphase einen kleineren Energieaufwand zum Beheizen des hydrophobierten Versuchsgebäudes 2 gegenüber dem unbehandelten Versuchsgebäude 1 aus. Im Vergleich zum prozentualen Anstieg des instationären U-Werts der Außenwand West (siehe Tab. 121), ist jedoch der Unterschied zwischen dem prozentualen Anstieg des Heizwärmeverbrauchs und des Heizwärmebedarfs geringer.

rsuchs- ebäude	Heizwärmeverbrauch (01.10.17 bis 31.12.17)	Heizwärmebedarf (01.10.20 bis 31.12.20)	Anstieg des Heizwärmeverbrauchs	Anstieg des Heizwärmebedarfs
Ve	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
1	2.106,11	2.502,09	2.66	
2	2.050,16	2.480,95	-2,00	-0,85

Tab. 122 - Auswirkungen der Hydrophobierung auf den Heizwärmeverbrauch und -bedarf, T1

Die messtechnisch ermittelten Auswirkungen der hydrophoben Fassadenfarbe auf den instationären U-Wert der Außenwand West des Versuchsgebäudes 3 werden durch die Bauteilsimulation mit einer intakten Fassadenfarbe nicht bestätigt (siehe Tab. 123). Wie zuvor bereits erläutert, ist dies darauf zurückzuführen, dass am Versuchsgebäude kein wirksamer Feuchteschutz durch die Fassadenfarbe gegeben ist. Der gemessene instationäre U-Wert ist daher höher, als der mit einem wirksamen Feuchteschutz berechnete instationäre U-Wert.

Tab.	123 -	Auswirkungen	der hydrophoben	Fassadenfarbe auf de	n instationären U	U-Wert (Außenv	wand West), 7	Г1
							, ,	

'ersuchs- gebäude	Gemessener instationärer U-Wert (01.10.17 bis 31.12.17)	Berechneter instationärer U-Wert (01.10.20 bis 31.12.20)	Anstieg des gemessenen instationären U-Werts	Anstieg des berechneten instationären U-Werts
> ~	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[%]	[%]
1	1,692	1,828	15.60	4.65
3	1,956	1,743	15,00	-4,05

Ergänzend zu Tab. 119 und Tab. 120 zeigt sich mit der Tab. 123 und Tab. 124, dass die energetische Relevanz der hydrophob eingestellten Fassadenfarbe nicht nur im defekten Zustand (Mess- bzw. Verbrauchswerte), sondern auch im intakten Zustand (Rechen- bzw. Bedarfswerte), bauteilbezogen größer sind, als gebäudebezogen. Für beide Zustände zeigt sich prozentual eine größere Änderung beim instationären U-Wert der Außenwand West (siehe Tab. 123), als beim Heizwärmebedarf und Heizwärmeverbrauch (siehe Tab. 124).

rsuchs- ebäude	Heizwärmeverbrauch (01.10.17 bis 31.12.17)	Heizwärmebedarf (01.10.20 bis 31.12.20)	Anstieg des Heizwärmeverbrauchs	Anstieg des Heizwärmebedarfs
Ve ge	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
1	2.106,11	2.502,09	6.90	2.25
3	1.961,00	2.418,25	-0,89	-3,35

Tab. 124 - Auswirkungen der hydrophoben Fassadenfarbe auf den Heizwärmeverbrauch und -bedarf, T1

In der Summe wird anhand der Messungen im Rahmen des Untersuchungskonzeptes 1 und anhand der Simulationsberechnungen des Untersuchungskonzeptes 2 deutlich, dass am Versuchsstandort die energetische Relevanz von Feuchtigkeit in Außenwänden aus Ziegelsichtmauerwerk als gering eingeschätzt werden kann. Mit den Messungen des instationären U-Wertes an der Außenwand West des Versuchsgebäudes 1 und 2 konnte zwar nachgewiesen werden, dass die Hydrophobierung des Mauerwerks in der vierten Heizphase (01.10.2017 bis 31.12.2017) die Wärmedämmeigenschaften der Außenwand um bis zu 7,62 % verbessert, sich diese Verbesserung aber nur geringfügig im Heizwärmeverbrauch widerspiegelt. So beträgt die Einsparung beim Versuchsgebäude 2 gegenüber dem Versuchsgebäude 1 in der gleichen Heizphase lediglich 2,66 %.

Diese messtechnisch gewonnene Erkenntnis wird durch die Simulationsberechnungen tendenziell bestätigt. Besonders aussagekräftig sind an dieser Stelle die Bauteil- und Gebäudesimulationen des Versuchsgebäudes 1 für den trockenen und feuchten Zustand der Außenwände. Hier zeigt sich am Beispiel der am stärksten feuchtigkeitsbelasteten Außenwand West, dass der Feuchtigkeitseinfluss auf deren Wärmedämmeigenschaften rechnerisch maximal 2,87 % beträgt. Beim Heizwärmebedarf ist der maximale Feuchtigkeitseinfluss mit 2,02 % noch kleiner. Die beiden Ergebnisse beziehen sich auf die Variante aktive Luftentfeuchtung und auf die erste Heizphase des letzten Simulationsjahres. In der Variante manuelle Lüftung nimmt allerdings der Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert der Außenwand West und auf den Heizwärmebedarf ähnliche Werte an.

Energetisch relevant wird der Feuchtigkeitseinfluss auf die Wärmedämmeigenschaften unter den Wetterbedingungen am Versuchsstandort, wenn es sich nicht um Ziegelsichtmauerwerk, sondern um ein außenseitig verputztes Mauerwerk mit defekter Fassadenfarbe handelt. Anhand der Messungen am Versuchsgebäude 2 und 3 wird deutlich, dass allein durch die höhere Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks die Wärmedämmeigenschaften der Außenwand West von Versuchsgebäude 3 trotz des Außenputzes, um bis zu 25,15 % kleiner sind, als beim Versuchsgebäude 2. Obwohl die erheblich reduzierten Wärmedämmeigenschaften der Außenwand West von Versuchsgebäude 3 zu keinem höheren Heizwärmeverbrauch gegenüber dem Versuchsgebäude 2 führen, sind damit allerdings kleinere Oberflächentemperaturen auf der Außenwandinnenseite verbunden. Diese messtechnisch gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der energetischen Auswirkungen der defekten Fassadenfarbe wurden im Rahmen der Bauteil- und Gebäudesimulationen tendenziell bestätigt.

Die energetischen Auswirkungen der hydrophoben Fassadenfarbe konnten für den intakten Zustand mit Hilfe der Bauteil- und Gebäudesimulationen untersucht werden. Wie bei der Hydrophobierung zeigte sich jedoch auch bei der hydrophoben Fassadenfarbe, dass unter den Wetterbedingungen am Versuchsstandort nur mit einer geringen Verbesserung des Wärmeschutzes der Außenwände und des Heizwärmebedarfs zu rechnen ist. Im Vergleich von Versuchsgebäude 1 und 3 beläuft sich die Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften der Außenwand West lediglich auf 4,65 % und die Verbesserung des Heizwärmebedarfs auf 3,35 %. Unter Berücksichtigung eines möglichen Defekts der Fassadenfarbe, wie z.B. durch fehlende hydrophobe Eigenschaften oder Mikrorisse, erscheint der Mehrwert dieses Wandaufbaus im Vergleich zur Hydrophobierung fraglich.

Unabhängig von den Versuchsgebäuden 1 bis 4, bei denen die Untersuchungsergebnisse maßgeblich durch die Wetterbedingungen am Versuchsstandort geprägt sind, zeigte sich beim aktiv beregneten Versuchsgebäude 5, dass die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit nicht nur bauteilbezogen, sondern auch gebäudebezogen von Relevanz sein können. Damit wird zugleich deutlich, dass die Feuchtigkeitsbelastung von Mauerwerk und die damit verbundenen energetischen Auswirkungen nicht nur durch die Konstruktion der Außenwand, sondern auch durch die örtliche Lage abhängig sind. Während sich am Versuchsstandort in 17121 Loitz (Mecklenburg-Vorpommern) entsprechend der Schlagregenbeanspruchungsgruppe 1 eine eher geringe energetische Relevanz von Mauerwerksfeuchtigkeit bei ziegelsichtigen Außenwänden zeigt, kann diese in Regionen der Beanspruchungsgruppe 3 deutlich größer ausfallen. Demnach wären auch größere energetische Auswirkungen durch eine Hydrophobierung oder durch einen hydrophoben Fassadenanstrich zu erwarten. Am Beispiel des Standorts Holzkirchen, dessen Normalregensumme mit 1.184,62 mm im Feuchtereferenzjahr deutlich höher ausfällt, als am Versuchsstandort mit 487,08 mm im Jahr 2016 und 869,18 mm im Jahr 2017, soll dieser Zusammenhang nachfolgend verdeutlicht werden.⁹⁴



Abb. 345 - Schlagregenrose für Holzkirchen (links), Versuchsstandort 2016 (Mitte) und Versuchsstandort 2017 (rechts)

Um die Schlagregeneinwirkungen des Standorts Holzkirchen und des Versuchsstandorts Loitz zu vergleichen, sind für diese in Abb. 345 die Schlagregenrosen dargestellt. Die Schlagregenrose von Holzkirchen bezieht sich auf das Feuchtereferenzjahr (kombiniert aus dem ersten Halbjahr 2006 gefolgt von dem zweiten Halbjahr 2005). Die Schlagregenrosen des Versuchsstandorts beziehen sich hingegen auf den Messzeitraum des Jahres 2016 und 2017. Wie bei der Normalregensumme zeigen sich auch bei der Schlagregensumme erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Standorten.

⁹⁴ Die Normalregensumme von 487,08 mm bezieht sich auf den Messzeitraum vom 16.01.2016 bis zum 01.01.2017 (jeweils 00:00 Uhr).

Die sich anschließenden Bauteil- und Gebäudesimulationen der Versuchsgebäude 1 bis 4 erfolgten für den Standort Holzkirchen mit exakt den gleichen Eingaben, wie für den Versuchsstandort Loitz. Allerdings wurde im Rahmen der Simulationsberechnungen auf das Versuchsgebäude 5 verzichtet, da eine künstliche Beregnung bei den Wetterbedingungen von Holzkirchen zu einer unrealistisch hohen Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände geführt hätte. Zudem wurde nur die Variante aktive Luftentfeuchtung rechnerisch berücksichtigt, um den Vergleich der Versuchsstandorte nicht unnötig zu verkomplizieren. Die mit den Simulationen erzielten Berechnungsergebnisse sind nachfolgend, beginnend beim Gesamtwassergehalt der Außenwand West, aufgeführt.



Abb. 346 - Gesamtwassergehalt der Außenwand West für das letzte Jahr der Simulation (Holzkirchen), A1

Anhand von Abb. 346 wird deutlich, dass die Außenwände mit einem fehlenden oder defekten Feuchteschutz erheblich höhere Gesamtwassergehalte aufweisen, als bei den Bauteilsimulationen für den Versuchsstandort Loitz (siehe Abb. 298). Zugleich zeigt sich, dass auch bei einer deutlich höheren Schlagregeneinwirkung auf die Außenwand West (siehe Abb. 345) die Hydrophobierung und die hydrophobe Fassadenfarbe zu einer starken Senkung der Feuchtigkeitsbelastung führen. Obwohl der gemittelte Gesamtwassergehalt für das letzte Simulationsjahr beim Versuchsgebäude 1 um den Faktor 8,7 größer ist, als beim Versuchsgebäude 1 am Versuchsstandort Loitz, zeigen die gemittelten Gesamtwassergehalte der Versuchsgebäude 2 und 3 unabhängig vom Versuchsstandort eine ähnliche Größe (siehe Tab. 125 und Tab. 111).

Tab	125 -	Gesamtwassergehalt der	Außenwand V	West für das	letzte Jahr	der Simulation	(Holzkirchen)	Т1
Iav.	123 -	Gesamitwassergenant der	Ausenwanu	west ful uas	letzte Jain	uel sinuation	(HOIZKIICHEII),	11

Versuchsgebäude mit	Kleinster Gesamtwassergehalt	Größter Gesamtwassergehalt	Gemittelter Gesamtwassergehalt
	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]
1	8,342	22,008	11,751
2	0,465	0,930	0,627
3	1,153	2,760	1,734
3^{*}	29,155	48,056	35,696
4	15,410	28,382	18,794



Der Verlauf der Wärmestromdichte ist für die Außenwand West der Versuchsgebäude 1 bis 4 in Abb. 347 und Abb. 348 über die erste und zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres (2020) dargestellt. Aus den damit berechneten instationären U-Werte geht hervor, dass das hydrophobierte Versuchsgebäude 2 um bis zu 11,19 % und das Versuchsgebäude 3 mit Außenputz und hydrophob eingestellter Fassadenfarbe um bis zu 14,21 % bessere Wärmedämmeigenschaften aufweist, als das Versuchsgebäude 1 (siehe Tab. 126). Gegenüber dem Standort Loitz (siehe Tab. 114) sind daher mit beiden Maßnahmen bauteilbezogen größere energetische Auswirkungen verbunden. Diese zeigen sich auch beim Versuchsgebäude 3^{*}, das im Vergleich zum Versuchsgebäude 3 durch einen um bis zu 38,31 % höheren instationären U-Wert der Außenwand West gekennzeichnet ist.

Zeit- raum	Versuchsgebäude mit	Gemittelte Wärmestromdichte	Summierter TransWärmeverlust	Instationärer U-Wert
	aktiver Luitenneuchtung	[W/m ²]	[kWh/m²]	[W/(m ² K)]
Heizphase 1 - 2020	1	-40,331	116,15	1,965
	2	-35,852	103,25	1,747
	3	-34,772	100,14	1,694
	3*	-48,087	138,49	2,343
	4	-11,135	32,07	0,542
Zeit- raum	Versuchsgebäude mit	Gemittelte Wärmestromdichte	Summierter TransWärmeverlust	Instationärer U-Wert
	aktiver Luitentieuchtung	[W/m ²]	[kWh/m²]	[W/(m ² K)]
Heizphase 2 - 2020	1	-33,871	-74,79	1,949
	2	-30,078	-66,41	1,731
	3	-29,055	-64,15	1,672
	3*	-39,163	-86,47	2,254
	4	-9,250	-20,42	0,532

Tab. 126 - Simulationsergebnisse zum Wärmeschutz der Außenwand West (1. und 2. Heizphase, Holzkirchen), T1



Abb. 349 - Instationäre U-Werte der Außenwand West (1. und 2. Heizphase, Holzkirchen), A1

Hinsichtlich des Feuchtigkeitseinflusses auf den instationären U-Wert der Außenwand West zeigen sich in beiden Heizphasen des letzten Simulationsjahres die höchsten absoluten Änderungen beim Versuchsgebäude 1 und 3^{*}. Der kleinste absolute Feuchtigkeitseinfluss ist bei den Versuchsgebäuden 2, 3 und 4 gegeben (siehe Abb. 349 und Tab. 127). Damit resultiert für den Standort Holzkirchen eine ähnliche Größenverteilung bei den absoluten Werten des Feuchtigkeitseinflusses, wie für den Versuchsstandort Loitz (siehe Tab. 116). Die Ergebnisse unterscheiden sich aber dahingehend, dass der Feuchtigkeitseinfluss am Standort Holzkirchen sowohl absolut mit bis zu 0,688 W/(m²K) als auch relativ mit bis zu 41,57 % deutlich höhere Werte annimmt (siehe Tab. 127).

Zeit- raum	Versuchsgebäude mit aktiver Luftentfeuchtung	Instationärer U-Wert (trocken)	Instationärer U-Wert (feucht)	Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert	
		[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[%]
Heizphase 1 - 2020	1	1,729	1,965	0,236	13,650
	2	1,729	1,747	0,018	1,041
	3	1,655	1,694	0,039	2,356
	3*	1,655	2,343	0,688	41,571
	4	0,468	0,542	0,074	15,812
Zeit- raum	Versuchsgebäude mit aktiver Luftentfeuchtung	Instationärer U-Wert (trocken)	Instationärer U-Wert (feucht)	Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert	
		[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[%]
Heizphase 2 - 2020	1	1,713	1,949	0,236	13,777
	2	1,713	1,731	0,018	1,051
	3	1,639	1,672	0,033	2,013
	3*	1,639	2,254	0,615	37,523
	4	0,462	0,532	0,070	15,152

Tab. 127 - Feuchtigkeitseinfluss auf den instationären U-Wert der Außenwand West (1. und 2. Heizphase, Holzkirchen), T1



Abb. 350 - Heizwärmebedarf der Versuchsgebäude (1. und 2. Heizphase, Holzkirchen), A1

Gebäudebezogen sind die energetischen Auswirkungen der Hydrophobierung und des Außenputzes mit hydrophober Fassadenfarbe am Standort Holzkirchen ebenfalls größer, als am Versuchsstandort Loitz (siehe Abb. 350 und Tab. 128 sowie Abb. 339 und Tab. 117). So resultiert in den Heizphasen des letzten Simulationsjahres beim Versuchsgebäude 2 eine Einsparung um bis zu 4,38 % und beim Versuchsgebäude 3 um bis zu 6,60 % jeweils gegenüber dem Versuchsgebäude 1. Der Mehrbedarf von Versuchsgebäude 3^{*} im Vergleich zum Versuchsgebäude 3 beträgt über den gleichen Zeitraum bis zu 15,38 %. Aus der Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs für den feuchten und trockenen Bauteilzustand der Außenwände geht zudem der Feuchtigkeitseinfluss hervor (siehe Tab. 128).

Zeit- raum	Versuchsgebäude mit aktiver Luftentfeuchtung	Heizwärmebedarf (trocken)	Heizwärmebedarf (feucht)	Feuchtigkeitseinfluss auf den Heizwärmebedarf	
		[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
Heizphase 1 - 2020	1	5.167,76	5.447,12	279,36	5,41
	2	5.167,76	5.208,61	40,85	0,79
	3	5.012,68	5.087,55	74,87	1,49
	3*	5.012,68	5.870,12	857,44	17,11
	4	1.497,28	1.614,33	117,05	7,82
Zeit- raum	Versuchsgebäude mit aktiver Luftentfeuchtung	Heizwärmebedarf (trocken)	Heizwärmebedarf (feucht)	Feuchtigkeitseinfluss auf den Heizwärmebedarf	
		[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
Heizphase 2 - 2020	1	3.365,10	3.544,28	179,18	5,32
	2	3.365,10	3.396,52	31,42	0,93
	3	3.262,27	3.310,66	48,39	1,48
	3*	3.262,27	3.778,53	516,26	15,83
	4	971,98	1.041,46	69,48	7,15

Tab. 128 - Feuchtigkeitseinfluss auf den Heizwärmebedarf (1. und 2. Heizphase, Holzkirchen), T1



Der Kurvenverlauf für die Heizleistung der Versuchsgebäude 1 bis 4 ist über die beiden Heizphasen des letzten Simulationsjahres in Abb. 351 und Abb. 352 dargestellt. Im Vergleich zu den Verläufen für den Standort Loitz (siehe Abb. 341 und Abb. 342) zeigt sich eine ähnliche Größenverteilung. Auch hier sind die höchsten Werte der Heizleistung beim Versuchsgebäude 3^{*} und die kleinsten Werte der Heizleistung beim Versuchsgebäude 3 gegeben (Versuchsgebäudes 5 bleibt dabei jedoch unberücksichtigt). Weiterhin erreicht das Versuchsgebäude 2 mit 3,07 KW in der ersten Heizleistung, als das Versuchsgebäude 1 mit 3,16 KW. Beim Versuchsgebäude 3 ist dieser Unterschied gegenüber Versuchsgebäude 1 mit 5,60 % etwas größer. Der Vergleich von Versuchsgebäude 3 und 3^{*} zeigt zudem einen feuchtigkeitsbedingten Anstieg des maximalen Tageswert der Heizleistung um 9,37 %, d.h. von 2,99 KW beim Versuchsgebäude 3 auf 3,27 KW beim Versuchsgebäude 3^{*}.



Mit den Mess- und Simulationsergebnissen für den Standort Loitz und den Simulationsergebnissen für den Standort Holzkirchen wird deutlich, dass die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit sowohl bauteil- als auch gebäudebezogen maßgeblich davon abhängig sind, in welcher Region bzw. in welcher Schlagregenbeanspruchungsgruppe sich das betrachtete Bauwerk befindet.

Für Standorte in der Schlagregenbeanspruchungsgruppe 1 (z.B. der Versuchsstandort Loitz) werden sich Maßnahmen zur Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme über die Außenwandoberfläche, wie z.B. durch eine Hydrophobierung oder durch einen Außenputz mit hydrophober Fassadenfarbe, nur im geringen Umfang auf die Transmissionswärmeverluste und auf den Heizwärmeverbrauch eines Gebäudes auswirken. So konnte mit den Messungen am Versuchsstandort, aber auch mit den Simulationen dargelegt werden, dass die Einsparung bei den Transmissionswärmeverlusten der Außenwände und beim Heizwärmeverbrauch bzw. Heizwärmebedarf prozentual den einstelligen Bereich nicht übersteigt. Eine Ausnahme bildet hier lediglich der Fall einer defekten Fassadenfarbe. So zeigte sich sowohl bei den Messungen als auch bei den Simulationen, dass sich auch unter den Wetterbedingungen am Versuchsstandort hohe Wassergehalte im Mauerwerk von Außenwänden einstellen können, die dann wiederum bauteilbezogen energetisch von Relevanz sind. Im Vergleich zum Ziegelsichtmauerwerk konnten hier um bis zu 15,57 % höhere Transmissionswärmeverluste über eine gesamte Heizphase durch Messungen ermittelt werden.

Für Standorte in der Schlagregenbeanspruchungsgruppe 3 (z.B. der Standort Holzkirchen) zeigen die Simulationsberechnungen, aber auch die Messungen am aktiv beregneten Versuchsgebäude 5, dass Mauerwerksfeuchtigkeit sowohl bauteil- als auch gebäudebezogen energetisch von größerer Relevanz sein kann. Dementsprechend können hydrophobierende Maßnahmen zur Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme über die Außenwandoberflächen auch größere Einspareffekte erzielen, als sich am Versuchsstandort Loitz messtechnisch und rechnerisch zeigte. So ist bauteilbezogen mit einer Hydrophobierung der Außenoberfläche von Ziegelsichtmauerwerk eine Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im niedrigen zweistelligen Prozentbereich möglich. Ähnliche Werte für die Reduzierung der Transmissionswärmeverluste zeigen sich auch für das nachträgliche Auftragen eines Außenputzes mit hydrophob eingestellter Fassadenfarbe. Gebäudebezogen konnte ermittelt werden, dass beide Maßnahmen am Standort Holzkirchen zwar größere energetische Auswirkungen mit sich bringen, als am Standort Loitz, jedoch beläuft sich die zu erwartende Einsparung auf einen einstelligen Prozentbereich. Wie am Versuchsstandort Loitz zeichnet sich auch in den Simulationen für den Standort Holzkirchen das Versuchsgebäude mit einer defekten Fassadenfarbe durch hohe Transmissionswärmeverluste und Heizwärmebedarfswerte ab. Im Vergleich zum Versuchsgebäude mit intakter Fassadenfarbe beläuft sich der Anstieg der Transmissionswärmeverluste auf bis zu 38,30 % und des Heizwärmebedarfs auf bis zu 15,38 %.

Zu beachten ist bei den Mess- und Simulationsberechnungen für den Versuchsstandort Loitz und für den Standort Holzkirchen, dass der Einfluss von Dachüberständen auf die Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände nicht untersucht wurde. Je nach Größe des Dachüberstands und je nach Höhe des Gebäudes können sich auch größere Änderungen bei der Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände und deren Transmissionswärmeverluste einstellen. Da in Deutschland geneigte Dächer im Bestand häufig durch einen Dachüberstand im Trauf- und Ortgangbereich gekennzeichnet sind, sollte vor Ort durch eine Bestandsaufnahme am Bauwerk überprüft werden, wie stark sich der Dachüberstand tatsächlich auf die Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände auswirkt. Diese Empfehlung gilt auch für zurückspringende Fassaden, wasserableitende Putzgesimse und Mauerwerksfriese. Weiterhin ist zu beachten, dass im Rahmen der Simulationsberechnungen ausschließlich mit einem feuchtigkeitsabhängigen Zuschlag der Wärmeleitfähigkeit von 7,85 %/M.-% für das Mauerwerk der Außenwände gerechnet wurde. Dieser Zuschlag, der sich aus dem feuchtigkeitsabhängigen Zuschlag der Wärmeleitfähigkeit für die Ziegel von 5,98 %/M.-% (gewichtet über den Volumenanteil der Ziegel im Mauerwerk) und dem feuchtigkeitsabhängigen Zuschlag der Wärmeleitfähigkeit für den Mörtel von 12,64 %/M.-% (gewichtet über den Volumenanteil des Mörtels im Mauerwerk) ergibt, kann aber auch deutlich höher ausfallen. So wird im Forschungsbericht von ACHTZIGER⁹⁵ für das Material Ziegel ein Wertebereich des feuchtigkeitsabhängigen Zuschlags der Wärmeleitfähigkeit von 4 %/M.-% bis 36,1 %/M.-% ausgewiesen (Mitteltemperatur von 10 °C und Gültigkeit bis 2 M-%).⁹⁶ Der Vergleich des Höchstwertes (36,1 %/M.%) und des im Rahmen der Simulationen verwendeten Wertes (5,98 %/M.-%) des feuchtigkeitsabhängigen Zuschlags der Wärmeleitfähigkeit für Ziegel verdeutlicht noch einmal, dass die Bauteil- und Gebäudesimulationen des Untersuchungskonzepts 2 einen konservativen Ansatz verfolgen. Die erzielten Berechnungsergebnisse zeigen somit nicht die maximal möglichen energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit auf.

Für die Praxis empfiehlt es sich, am Bauwerk nicht nur die tatsächliche Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks im hygrothermisch eingependelten Zustand möglichst flächig zu erfassen, sondern auch wichtige hygrothermische Materialparameter der Wandbaustoffe zu bestimmen. Erst wenn die tatsächliche Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit⁹⁷ der Wandbaustoffe bekannt sind, lässt sich tendenziell einschätzen, in welcher Höhe Einsparungen bei den Transmissionswärmeverlusten und beim Heizwärmebedarf durch feuchtigkeitsreduzierende Maßnahmen zu erwarten sind. Als Orientierung ist festzuhalten, dass die energetische Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit bei einschaligen Außenwänden aus Ziegelsichtmauerwerk erst bei einer hohen Schlagregenbeanspruchung, d.h. in Regionen der Beanspruchungsgruppe 3, relevant sein können. Für Regionen der Beanspruchungsgruppe 1 und 2 sind feuchtigkeitsreduzierende Maßnahmen in Hinblick auf die energetischen Auswirkungen nicht zu empfehlen, da diese zu gering ausfallen. Für Außenwände mit sehr saugfähigem Außenputz und defekter Fassadenfarbe (z.B. durch Risse) zeigten sich aber bei den Messungen und Berechnungen der beiden Untersuchungskonzepte hohe Wassergehalte des Mauerwerks selbst in Regionen mit niedriger Schlagregenbelastung. Dies verdeutlicht, dass vor allem für denkmalgeschützte Gebäude deren Fassaden oft Schäden des Außenputzes oder der Fassadenfarbe aufweisen (siehe Abb. 1), die Fassadeninstandhaltung auch in energetischer Hinsicht von Relevanz ist. Der Einsatz einer intakten hydrophoben Fassadenfarbe kann gegenüber dem defekten bzw. beschädigten Zustand der Fassade zu deutlichen energetischen Einsparungen führen. Bei vorhandener Wirksamkeit der hydrophoben Eigenschaften ist diese vor allem bauteilbezogen zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste zu empfehlen.

⁹⁵ ACHTZIGER 1984, S. 161

⁹⁶ Die in ACHTZIGER 1984, S. 161 genannten Höchstwerte des feuchtigkeitsabhängigen Zuschlags der Wärmeleitfähigkeit stammen aus Dänemark (Quelle: JESPERSEN 1953, S. 187 - 193) und berücksichtigen auch den Wärmetransport durch Wasserdampfdiffusion mit Phasenwechsel (Porendiffusion bzw. Latentwärmeeffekte). Der im Rahmen des Forschungsprojektes ermittelte feuchtigkeitsabhängige Zuschlag der Wärmeleitfähigkeit beinhaltet hingegen (weitestgehend) nur den Wärmetransport durch ortsgebundenes Wasser, da der Wärmetransport durch Porendiffusion bzw. Latentwärmeeffekte in der Simulationssoftware gesondert eingeht.

⁹⁷ Laut ACHTZIGER 1984, S. 167 resultiert unabhängig von der Trockenrohdichte der untersuchten Ziegel ein feuchtigkeitsabhängiger Zuschlag der Wärmeleitfähigkeit von 14 bis 15 %/M.-% (gültig bis 2 M.-%). Dieser Wert kann als erste Orientierung dienen.

Sollte zur Reduzierung der Feuchtigkeitsbelastung und der feuchtigkeitsbedingten Wärmeverluste bei einschaligen Außenwänden aus Ziegelsichtmauerwerk eine nachträgliche Hydrophobierung der Außenwandoberfläche durchgeführt werden, so sind vor der Maßnahme die Verarbeitungshinweise des Herstellers und die allgemein anerkannten Regeln der Technik zu beachten. Zielsetzung ist es, eine ausreichende Eindringtiefe und einen vollflächigen Auftrag des Hydrophobierungsmittels, ohne Fehlstellen, zu gewährleisten. Damit sollen zu hohe Spannungen in der Trennfläche zwischen dem behandelten und dem unbehandelten Material, aber auch ein Hinterwandern der hydrophobierten Mauerwerksschicht sowie das Auffeuchten der dahinter liegenden Mauerwerksbereiche verhindert werden. Weitere Hinweise zur Planung und Umsetzung von hydrophobierenden Imprägnierungen, gibt das von der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V herausgegebene Merkblatt mit dem Titel "Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen" (WTA-Merkblatt 3-17).⁹⁸

Zu beachten ist jedoch im gesamten Themenkomplex "feuchtigkeitsbedingte Wärmeverluste", dass auch eine vollständig wirksame Hydrophobierung oder hydrophob eingestellte Fassadenfarbe nur die durch Aufnahme von Niederschlagswasser beeinträchtigten Wärmedämmeigenschaften einer Außenwand wiederherstellen kann. Im vollständig trockenen Zustand einer Außenwand geht mit einer Hydrophobierung oder einer hydrophob eingestellten Fassadenfarbe keine Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften einher. Zugleich ist darauf hinzuweisen, dass infolge der Messungen am Versuchsstandort Loitz und infolge der Simulationsberechnungen für Loitz und Holzkirchen, die Innendämmung aus Calciumsilikatplatten (Dicke 8 cm zur Einhaltung des Mindestwärmeschutzes) stets deutlich besser abgeschnitten hat, als die feuchtigkeitsreduzierenden Maßnahmen. Dabei ist zudem festgestellt worden, dass sich Mauerwerksfeuchtigkeit energetisch weniger stark auf die Wärmedämmeigenschaften gedämmter Außenwände als ungedämmter Außenwände auswirkt. Dennoch können feuchtigkeitsreduzierende Maßnahmen, wie z.B. mit einer Hydrophobierung, auch bei von innengedämmten Außenwänden von Vorteil oder sogar notwendig sein. So konnte anhand der Simulationsberechnungen für den Standort Holzkirchen festgestellt werden, dass die von innen gedämmten Außenwände durch einen erheblich höheren Gesamtwassergehalt gekennzeichnet sind, als die ungedämmten und ziegelsichtigen Außenwände. Eine Reduzierung des Gesamtwassergehalts ist hier vor allem für die Bauwerkserhaltung von Interesse, um z.B. Frostschäden an der Oberfläche des Mauerwerks zu verhindern.⁹⁹

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass eine Hydrophobierung oder eine hydrophob eingestellte Fassadenfarbe bei Außenwänden von klassischen Bestandsgebäuden (ohne aktive Luftentfeuchtung) nicht nur zu einem geringeren Wassergehalt des Mauerwerks führen können, sondern auch zu einer geringeren Luftfeuchtigkeit im Innenraum und zu einer höheren Temperatur auf der Außenwand-Innenoberfläche. Damit verbunden sind eine Verbesserung des Innenraumklimas, der thermischen Behaglichkeit und eine Senkung der Lüftungswärmeverluste. Allerdings sind auch diese Vorteile nur dann gegeben, wenn sich das Bestandsgebäude in einer Region mit hoher Schlagregenbelastung befindet und Außenwände in einer feuchtigkeitsempfindlichen Konstruktion aufweist.¹⁰⁰

⁹⁸ WTA-MERKBLATT 3-17, S. 6 - 7

⁹⁹ BLUDAU 2007, S. 6

¹⁰⁰ LENGSFELD 2007, S. 8

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die energetische Ertüchtigung von thermischen Gebäudehüllen ist ein wichtiger Aspekt, um den Energieaufwand zur Klimatisierung von Innenräumen zu reduzieren. Im Denkmalbestand ist jedoch der Einbau von Wärmedämmstoffen in denkmalpflegerischer und häufig auch in bauphysikalischer Hinsicht problematisch und oft gar nicht möglich. Alternative Lösungsansätze, wie die Reduzierung von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten, finden bei Ertüchtigungsmaßnahmen häufig keine Beachtung, obwohl das Thema eine hohe Relevanz mit sich bringt. Deutlich wird dies anhand der Wärmeleitfähigkeit von Wasser, die je nach Aggregatzustand 23- bis 90-fach höher ist, als jene von Luft. Wird beispielsweise die in Sichtmauerwerk-Außenwandziegeln enthaltene Porenluft durch Schlagregeneinwirkung verdrängt, so führt dies zu einer signifikanten Änderung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Außenwandmaterials.

Zielsetzung des Forschungsprojektes "Quantifizierung und Reduzierung von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten im denkmalgeschützten Gebäudebestand" war es daher, die Wechselbeziehungen zwischen feuchtigkeitsbelastetem Ziegelmauerwerk und den daraus resultierenden Wärmeverlusten zu untersuchen, Änderungen der Dämmeigenschaften und des Energieaufwands zum Beheizen zu quantifizieren sowie denkmalgerechte Ertüchtigungsmaßnahmen auszuarbeiten und zu analysieren, die zu einer Reduzierung von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten führen. Zum Erreichen dieser Ziele kamen 2 Untersuchungskonzepte zur Anwendung. Im Rahmen des 1. Untersuchungskonzeptes "Messen und Auswerten" wurden 5 Versuchsgebäude mit der gleichen Kubatur errichtet und mittels eines Wärme- und Feuchtemonitorings über 4 Heizphasen der Jahre 2016 und 2017 überwacht. Dabei kamen verschiedene einschalige Wandaufbauten, wie z.B. mit außenseitig ziegelsichtigem, mit hydrophobiertem, mit verputztem und mit innenseitig gedämmtem Mauerwerk zur Anwendung. Es wurde aber auch die künstliche Beregnung eines Versuchsgebäudes berücksichtigt. Parallel dazu erfolgten mit dem 2. Untersuchungskonzept "Berechnen und Auswerten" für alle Wandkonstruktionen der Versuchsgebäude hygrothermische Bauteilsimulationen. Diese dienten zur Untersuchung der sich einstellenden Wärmestromdichte, der instationären U-Werte bzw. Wärmedämmeigenschaften, der Feuchtigkeitsbelastung und -verteilung sowie der Entwicklung der Bauteiltemperaturen für den gesamten Versuchszeitraum von 2 Jahren. Mittels der hygrothermischen Gebäudesimulation sollte daraufhin bestimmt werden, welchen Einfluss Mauerwerksfeuchtigkeit auf den Heizwärmebedarf der Versuchsgebäude bei aktiver Luftentfeuchtung und bei manueller Lüftung hat. Auf Basis der Mess- und Simulationsergebnisse beider Untersuchungskonzepte wurden abschließend verschiedene Empfehlungen zur energetischen Ertüchtigung von Außenwänden mittels feuchtereduzierenden Maßnahmen ausgearbeitet.

Mit dem Abschlussbericht zum Forschungsprojekt wird die Planung, Durchführung und Auswertung der Untersuchungskonzepte detailliert dokumentiert. Dazu erfolgt zu Beginn die Zusammenfassung des beim Forschungsprogramms *ZukunftBau* eingereichten Forschungsantrags mit allen wichtigen inhaltlichen Schwerpunkten. Dabei wird Bezug genommen auf die bauliche Ausgangssituation in Deutschland, auf den daraus resultierenden Forschungsansatz, auf die Forschungsziele sowie auf die Forschungsmethodik. Anschließend erfolgt die Beschreibung der Planung und der baulichen Ausführung der 5 Versuchsgebäude mit Hinweisen zur geometrischen Konzeption der Baukörper, zur konstruktiven Umsetzung der thermischen Gebäudehüllen sowie zur automatisierten Heizungs-, Entfeuchtungs- und Monitoringtechnik.

Im weiteren Verlauf des Berichts werden die Ergebnisse des 1. Untersuchungskonzeptes vorgestellt, die den Ansatz des Forschungsprojektes unter den Wetterbedingungen am Versuchsstandort in Loitz (Mecklenburg-Vorpommern) bestätigen. So zeigen die Langzeitmessungen mit dem installierten Monitoringsystem und die Kurzzeitmessungen mit einem mobilen Mikrowellenfeuchtemessgerät, dass die sich einstellende Feuchtigkeitsbelastung bei ungedämmten Außenwänden aus einschaligem Ziegelmauerwerk, deren Dämmeigenschaften und Transmissionswärmeverluste in einem relevanten Umfang beeinflussen kann. Auf Grundlage des gemessenen Stromverbrauchs für die Beheizung (Heizwärmeverbrauch) konnten auch die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit gebäudebezogen nachgewiesen und quantifiziert werden.

Besonders deutlich wird der Einfluss von Mauerwerksfeuchtigkeit auf den Heizwärmeverbrauch bei modifizierten Außenklimabedingungen. An dem Versuchsgebäude 5, bei dem die ziegelsichtigen Außenwände aktiv beregnet wurden, zeigt sich ein Mehrverbrauch in der vierten Heizphase von 16,10 % gegenüber dem ebenfalls ziegelsichtigem Versuchsgebäude 1 und von 19,27 % gegenüber dem hydrophobierten Versuchsgebäude 2. Bauteilbezogen werden die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit beim Versuchsgebäude 3 (Außenputz mit defekter Fassadenfarbe) sehr deutlich. Hier konnte unter den gegebenen Wetterbedingungen am Versuchsstandort nachgewiesen werden, dass sich an der nach Westen ausgerichteten Außenwand ein Gesamtwassergehalt einstellt, der mit einer signifikanten Veränderung der Wärmedämmeigenschaften verbundenen ist. In der vierten Heizphase resultiert für diese Außenwand ein instationärer U-Wert, der um 15,60 % größer ist, als beim ziegelsichtigen Versuchsgebäude 1 und um 25,14 % größer als beim hydrophobierten Versuchsgebäude 2. Dies ist umso beachtlicher, da das Versuchsgebäude 3 mit einem 2 cm starken Außenputz ausgestattet wurde. Gebäudebezogen reduziert sich aber die energetische Relevanz von Mauerwerkfeuchtigkeit, da unter realen Wetterbedingungen nicht alle Außenwände einer starken Schlagregeneinwirkung ausgesetzt sind. Deutlich wird dies anhand der vor Ort aufgezeichneten Wetterdaten. Hier zeigt sich, dass die höchsten Schlagregeneinwirkungen bei der Außenwand West vorliegen und die weiteren Außenwände eine kleinere Beanspruchung durch Schlagregenereignisse aufweisen. Die damit verbundenen Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch werden ebenfalls am Beispiel von Versuchsgebäude 3 sichtbar. Obwohl der Wärmeschutz der Außenwand West stark reduziert ist, erreicht dieses in der vierten Heizphase einen Heizwärmeverbrauch, der um 6,89 % kleiner ist als beim Versuchsgebäude 1 und um 4,35 % kleiner als beim Versuchsgebäude 2.

Die Messergebnisse der 5 Versuchsgebäude zeigen auch, dass die normativ bestimmten stationären U-Werte nur bedingt zur Beurteilung der realen Dämmeigenschaften von feuchtigkeitsbelasteten und ungedämmten Wänden aus einschaligem Ziegelmauerwerk geeignet sind. Die energetischen Auswirkungen feuchtereduzierender Maßnahmen können hingegen mit den stationären U-Werten überhaupt nicht quantifiziert werden, obwohl diese infolge des *1. Untersuchungskonzeptes* sowohl bauteil- als auch gebäudebezogen nachgewiesen wurden. So stellte sich in der vierten Heizphase bei der westlichen Außenwand des hydrophobierten Versuchsgebäudes 2 ein um 7,62 % kleinerer instationärer U-Wert ein, als beim unbehandelten Versuchsgebäude 1. Der Heizwärmeverbrauch ist gegenüber dem Versuchsgebäude 1 in derselben Heizphase allerdings nur um 2,66 % gesunken. Zurückzuführen ist dies darauf, dass größere Einsparungen nur dann beim Heizwärmeverbrauch zu erwarten sind, wenn mehrere Außenwände eine starke Schlagregenbelastung aufweisen. Ist diese auf eine Außenwand begrenzt, so können bauteilbezogen Wärmeverluste deutlich reduziert werden, jedoch spiegelt sich die damit erzielte Einsparung nur gedämpft im Heizwärmeverbrauch wider.

Anknüpfend an das 1. Untersuchungskonzept erfolgt die Vorstellung der Ergebnisse, die infolge des 2. Untersuchungskonzepts erzielt wurden. In beiden Simulationsvarianten der 5 Versuchsgebäude (aktive Luftentfeuchtung und manuelle Lüftung) zeigt sich am Beispiel der Außenwand West im hygrothermisch eingeschwungenen Zustand, dass die Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks die Wärmedämmeigenschaften und die Transmissionswärmeverluste des Bauteils in einem relevanten Umfang beeinflussen kann. Die energetischen Auswirkungen waren aber nicht nur bauteil-, sondern auch gebäudebezogen beim Heizwärmebedarf und bei der Heizleistung rechnerisch nachweisbar. Um die Vergleichbarkeit mit dem Untersuchungskonzept 1 zu wahren, kamen bei den Simulationen nur die am Versuchsstandort erfassten Wetterdaten der Jahre 2016 und 2017 sowie individuell im Labor bestimmte Stoffgrößen für die verbauten Materialien der Außenwände zum Einsatz.

Wie beim 1. Untersuchungskonzept wurden die Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit auf den Heizwärmebedarf besonders beim aktiv beregneten Versuchsgebäude 5 deutlich. Gegenüber dem Versuchsgebäude 1 konnte ein um 18,43 % höherer Heizwärmebedarf in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres berechnet werden (Variante manuelle Lüftung). Unter Berücksichtigung der gleichen Simulationsbedingungen beträgt die Steigerung des Heizwärmebedarfs im Vergleich zum hydrophobierten Versuchsgebäude 2 sogar 19,46 %. Bauteilbezogen werden die energetischen Auswirkungen einer hohen Feuchtigkeitsbelastung des Mauerwerks bei der Gegenüberstellung der Versuchsgebäude 3 und 3^{*} deutlich. Das Versuchsgebäude 3 stellt dabei die Simulationsvariante Außenputz mit einer intakten hydrophoben Fassadenfarbe dar. Das Versuchsgebäude 3^{*} weist den gleichen Wandaufbau auf, aber mit einer defekten hydrophoben Fassadenfarbe. Mit dem Vergleich konnte gezeigt werden, dass allein aufgrund des Feuchtigkeitseinflusses das Versuchsgebäude 3^{*} bei der Außenwand West einen um 12,67 % höheren instationären U-Wert aufweist, als die Außenwand West des Versuchsgebäudes 3 (Variante manuelle Lüftung). Noch größere Auswirkungen auf den Wärmeschutz zeigen sich aber bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 5. Aufgrund der hohen Feuchtigkeitsbelastung stellt sich in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres ein um 23,32 % höherer instationärer U-Wert ein, als bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 1 (Variante manuelle Lüftung). Durch die Gegenüberstellung von instationären U-Werten sowie von Heizwärmebedarfswerten für den trockenen Bauteilzustand (Wassergehalt: 0 kg/m³) und für den feuchten Bauteilzustand (Wassergehalt gemäß Wetterbedingungen) konnte über die Simulationen gezeigt werden, dass Mauerwerksfeuchtigkeit gebäudebezogen von kleinerer energetische Relevanz ist, als bauteilbezogen. So stellt sich bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 3^{*} ein durch Mauerwerksfeuchtigkeit verursachter Anstieg des instationären U-Wertes um 13,47 % ein, während sich der durch Mauerwerksfeuchtigkeit verursachte Anstieg des Heizwärmebedarfs lediglich auf 7,02 % beläuft (Variante manuelle Lüftung, zweite Heizphase des letzten Simulationsjahres).

Weiterhin haben die Simulationsberechnungen gezeigt, dass die hydrophobierte Außenwand West des Versuchsgebäudes 2 gegenüber der unbehandelten Außenwand West des Versuchsgebäudes 1 einen 1 % bis 2 % kleineren instationären U-Wert in den Heizphasen des letzten Simulationsjahres aufweist (Variante aktive Luftentfeuchtung). Die Auswirkungen der Hydrophobierung auf den Heizwärmebedarf des Versuchsgebäudes 2 stellen sich hingegen noch gedämpfter dar. Im Vergleich zum unbehandelten Versuchsgebäude 1 beläuft sich die Einsparung in der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres auf 1,07 % und in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres auf 0,85 % (Variante aktive Luftentfeuchtung). Für die Variante manuelle Lüftung ergeben sich ähnlich niedrige Änderungen beim instationären U-Wert und beim Heizwärmebedarf.

Die energetischen Auswirkungen des Außenputzes mit einer intakten hydrophoben Fassadenfarbe gegenüber dem unbehandelten Ziegelsichtmauerwerk zeigen sich bei der Gegenüberstellung der Versuchsgebäude 1 und 3. Bauteilbezogen ergibt sich für die Außenwand West in der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres ein um 5,01 % kleinerer instationärer U-Wert und in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres ein um 4,65 % kleinerer instationärer U-Wert beim Versuchsgebäude 3 (Variante aktive Luftentfeuchtung). Gebäudebezogen zeigt sich für die beiden Heizphasen des letzten Simulationsjahres, dass sich beim Versuchsgebäude 3 ein etwa 3 % kleinerer Heizwärmebedarf einstellt, als beim Versuchsgebäude 1 (Variante aktive Luftentfeuchtung). Für die Variante manuelle Lüftung zeigen sich die energetischen Auswirkungen des Außenputzes mit einer intakten hydrophoben Fassadenfarbe sowohl bauteil- als auch gebäudebezogen in einer ähnlichen Größenordnung.

Im Anschluss an die Darlegung der Mess- und Berechnungsergebnisse erfolgt im Abschlussbericht deren Vergleich. Hier zeigt sich zunächst, dass die im Rahmen des 2. Untersuchungskonzeptes durchgeführten Simulationsberechnungen die Messungen des 1. Untersuchungskonzepts tendenziell bestätigen. In der Summe wird aber anhand der Ergebnisse beider Untersuchungskonzepte deutlich, dass am Versuchsstandort in Loitz die energetische Relevanz von Feuchtigkeit in Außenwänden aus Ziegelsichtmauerwerk als gering eingeschätzt werden kann. Mit den Messungen des instationären U-Wertes an der Außenwand West des Versuchsgebäudes 1 und 2 konnte zwar dargelegt werden, dass die Hydrophobierung des Mauerwerks in der vierten Heizphase (01.10.2017 bis 31.12.2017) die Wärmedämmeigenschaften leicht verbessert, jedoch spiegelt sich diese Verbesserung kaum im Heizwärmeverbrauch wider. Diese messtechnisch gewonnene Erkenntnis konnte ebenfalls mit den Bauteil- und Gebäudesimulationen nachgewiesen werden. Besonders aussagekräftig sind an dieser Stelle die Simulationsergebnisse des Versuchsgebäudes 1 für den trockenen und feuchten Zustand der Außenwände. Hier zeigt sich am Beispiel der am stärksten feuchtigkeitsbelasteten Außenwand West, dass der Feuchtigkeitseinfluss auf deren Wärmedämmeigenschaften am Versuchsstandort Loitz rechnerisch maximal 2,87 % beträgt. Beim Heizwärmebedarf ist der Feuchtigkeitseinfluss mit 2,02 % noch kleiner. Beide Ergebnisse beziehen sich auf die Variante aktive Luftentfeuchtung und auf die erste Heizphase des letzten Simulationsjahres. Eine Ausnahme bildet jedoch Mauerwerk mit einem sehr saugfähigen Außenputz und einer defekter Fassadenfarbe (z.B. durch Risse), wie der Vergleich der instationären U-Werte für die Außenwand West der Versuchsgebäude 2 und 3 zeigt. Hier kann Mauerwerksfeuchtigkeit auch unter den Wetterbedingungen am Versuchsstandort die Wärmedämmeigenschaften der Außenwand erheblich verändern.

Unabhängig von den Versuchsgebäuden 1 bis 4, bei denen die Untersuchungsergebnisse maßgeblich durch die Wetterbedingungen am Versuchsstandort geprägt sind, zeigt sich beim aktiv beregneten Versuchsgebäude 5, dass die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit nicht nur bauteilbezogen, sondern auch gebäudebezogen von Relevanz sein können. Damit wird zugleich deutlich, dass die Feuchtigkeitsbelastung von Mauerwerk und die damit verbundenen energetischen Auswirkungen nicht nur durch die Konstruktion der Außenwand, sondern maßgeblich auch durch die örtliche Lage geprägt sind. Während sich am Versuchsstandort in Loitz gemäß der Schlagregenbeanspruchungsgruppe 1 tendenziell geringe energetische Auswirkungen zeigen, können diese in Regionen der Schlagregenbeanspruchungsgruppe 3 größer ausfallen, wie die Simulationen für den Standort Holzkirchen zeigen. Demnach sind auch größere energetische Auswirkungen durch eine Hydrophobierung oder durch einen hydrophoben Fassadenanstrich zu erwarten. Im weiteren Verlauf des Abschlussberichtes erfolgte die Dokumentation der Simulationsergebnisse für die Versuchsgebäude am Standort Holzkirchen. Die Bauteil- und Gebäudesimulationen sind auch hier mit exakt den gleichen Eingaben, wie für den Versuchsstandort Loitz, umgesetzt worden. Es wurde lediglich auf das Versuchsgebäude 5 verzichtet, da eine künstliche Beregnung bei den Wetterbedingungen am Standort Holzkirchen zu einer unrealistisch hohen Feuchtigkeitsbelastung der Außenwände geführt hätte. Zudem wurde in den Simulationsberechnungen nur die Variante aktive Luftentfeuchtung berücksichtigt, um den Vergleich der Versuchsstandorte nicht unnötig zu verkomplizieren.

Infolge der Simulationsberechnungen zeigte sich, dass bauteilbezogen mit einer Hydrophobierung der Außenoberfläche von Ziegelsichtmauerwerk eine Reduzierung der Transmissionswärmeverluste in einem sehr niedrigen zweistelligen Prozentbereich möglich ist. So beträgt die Einsparung bei der Außenwand West des Versuchsgebäudes 2 im Vergleich zum Versuchsgebäude 1 in den beiden Heizphasen des letzten Simulationsjahres ca. 11 %. Das Versuchsgebäude 3 mit Außenputz und einer intakter hydrophober Fassadenfarbe erreicht gegenüber dem Versuchsgebäude 1 leicht höhere Einsparungen. In der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres betragen diese 13,78 % und in der zweiten Heizphase des letzten Simulationsjahres 14,23 %. Gebäudebezogen konnte ermittelt werden, dass beide Maßnahmen am Standort Holzkirchen zwar größere energetische Auswirkungen mit sich bringen, als am Standort Loitz, allerdings beläuft sich die zu erwartende Einsparung im Vergleich zum Versuchsgebäude 1 auf einen einstelligen Prozentbereich. Beim Versuchsgebäude 2 ist die Einsparung beim Heizwärmebedarf gegenüber Versuchsgebäude 1 in der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres mit 4,38 % am größten. Die größte Einsparung des Versuchsgebäudes 3 gegenüber Versuchsgebäude 1 beträgt 6,60 %. Diese wird ebenfalls in der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres erreicht. Wie am Standort Loitz zeichnet sich auch in den Simulationen für den Standort Holzkirchen das Versuchsgebäude 3^{*} mit einer defekten Fassadenfarbe durch hohe Transmissionswärmeverluste und Heizwärmebedarfswerte ab. Im Vergleich zum Versuchsgebäude 3 mit intakter Fassadenfarbe beläuft sich der Anstieg der Transmissionswärmeverluste auf bis zu 38,30 % und beim Heizwärmebedarf auf bis zu 15,38 % (jeweils in der ersten Heizphase des letzten Simulationsjahres).

Als Empfehlung ist festzuhalten, dass die energetischen Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit bei einschaligen Außenwänden aus Ziegelsichtmauerwerk erst bei hohen Beanspruchungen durch Schlagregen, d.h. in Regionen der Beanspruchungsgruppe 3, relevant sein können. Für Regionen der Beanspruchungsgruppe 1 und 2 sind feuchtigkeitsreduzierende Maßnahmen in Hinblick auf die energetischen Auswirkungen nicht zu empfehlen, da diese zu gering ausfallen. Für Außenwände mit sehr saugfähigem Außenputz und defekter Fassadenfarbe (z.B. durch Risse) zeigten sich aber bei den Messungen und Berechnungen der beiden Untersuchungskonzepte hohe Wassergehalte des Mauerwerks selbst in Regionen mit einer niedrigen Schlagregenbelastung. Dies verdeutlicht, dass vor allem für denkmalgeschützte Gebäude bei denen die Fassaden häufig Schäden des Außenputzes oder der Fassadenfarbe aufweisen, die Fassadeninstandhaltung auch in energetischer Hinsicht von Relevanz ist. Der Einsatz einer intakten hydrophoben Fassadenfarbe kann auf einem saugfähigen Außenputz gegenüber einer defekten bzw. einer beschädigten Fassadenfarbe bauteilbezogen zu deutlichen energetischen Einsparungen führen. Bei vorhandener Wirksamkeit der hydrophoben Eigenschaften ist diese daher zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste der Außenwände zu empfehlen. Zu beachten ist jedoch im gesamten Themenkomplex "feuchtigkeitsbedingte Wärmeverluste", dass auch eine vollständig wirksame Hydrophobierung oder hydrophob eingestellte Fassadenfarbe nur die durch Aufnahme von Niederschlagswasser beeinträchtigten Wärmedämmeigenschaften einer Außenwand wiederherstellen kann. Im vollständig trockenen Zustand einer Außenwand geht mit einer Hydrophobierung oder einer hydrophob eingestellten Fassadenfarbe keine Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften einher. Zugleich ist darauf hinzuweisen, dass infolge der Messungen am Versuchsstandort Loitz und infolge der Simulationsberechnungen für Loitz und Holzkirchen, die Innendämmung aus Calciumsilikatplatten (Dicke 8 cm zur Einhaltung des Mindestwärmeschutzes) stets deutlich besser abgeschnitten hat, als die feuchtigkeitsreduzierenden Maßnahmen. Dabei ist zudem festgestellt worden, dass sich Mauerwerksfeuchtigkeit energetisch weniger stark auf die Wärmedämmeigenschaften gedämmter Außenwände als ungedämmter Außenwände auswirkt. Dennoch können feuchtigkeitsreduzierende Maßnahmen, wie z.B. mit einer Hydrophobierung, auch bei von innengedämmten Außenwänden von Vorteil oder sogar notwendig sein. So konnte anhand der Simulationsberechnungen für den Standort Holzkirchen festgestellt werden, dass die von innen gedämmten Außenwände durch einen erheblich höheren Gesamtwassergehalt gekennzeichnet sind, als die ungedämmten und ziegelsichtigen Außenwände. Eine Reduzierung des Gesamtwassergehalts ist hier vor allem für die Bauwerkserhaltung von Interesse, um z.B. Frostschäden an der Oberfläche des Mauerwerks zu verhindern.

Vorausschauend bleibt bezüglich weiterem Forschungspotential festzuhalten, dass die energetischen Auswirkungen einer hohen Feuchtigkeitsbelastung von Außenwänden und von Maßnahmen zur Reduzierung dieser Feuchtigkeitsbelastung aktuell nur im Rahmen von hygrothermischen Bauteilund Gebäudesimulationen abgebildet werden können. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Forschungsberichtes wäre es daher für Bestandsgebäude mit hoher Schlagregenbelastung und feuchtigkeitsempfindlichen Außenwandkonstruktionen sinnvoll, eine Methode zu entwickeln und zu validieren, mit der feuchtigkeitsbedingte Wärmeverluste und deren Reduzierung im normierten Monatsbilanzverfahren einfließen können. Nach der DIN V 18599 oder DIN 4108-6 / DIN 4701-10, in denen der Berechnungsvorgang definiert ist, werden Bestandsbauten weitestgehend unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt der thermischen Hülle energetisch bewertet. So kommen zur Einschätzung der Wärmedämmeigenschaften von Außenbauteilen stationäre, d.h. zeitlich konstanten U-Werte zur Anwendung. Bei der Berechnung dieser U-Werte sind neben den Wärmeübergangswiderständen vor allem die Dicke und der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bauteilschichten von Bedeutung. Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit einer Bauteilschicht bezieht sich aber auf konstante und normativ definierte Vorgaben zur Materialtemperatur und -feuchtigkeit. So sind die in der DIN 4108-4 angegebenen Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk für einen Ausgleichfeuchtigkeitsgehalt festgelegt worden, der sich bei einer Lufttemperatur von 23 °C und relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % einstellt. Tatsächlich treten aber bei Bestandsgebäuden mit fehlendem konstruktiven Feuchteschutz (wie z.B. bei einschaligem Ziegelsichtmauerwerk) erheblich höhere Feuchtigkeitsbelastungen auf. Wird nun derart feuchtigkeitsbelastetes Mauerwerk infolge des Monatsbilanzverfahrens mit stationären U-Werten und den dazugehörigen Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit rechnerisch abgebildet, so führt dies zu einer verfälschten Einschätzung der realen Transmissionswärmeverluste des Bauteils. Weitergehende Forschungstätigkeiten im Rahmen des Themenkomplexes feuchtigkeitsbedingte Wärmeverluste könnten hier ansetzen, um Lösungen zu erarbeiten mit denen feuchtigkeitsbelastete Außenwände realistischer im Monatsbilanzverfahren oder auch in der Heizlastberechnung abgebildet werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] BLAZEJCZAK, JÜRGEN u.a.: Energiewende erfordert hohe Investitionen. In: DIW Wochenbericht, Jg. 80 (2013), Heft 26, S. 19 - 30.
- [2] BERLIN-INSTITUT FÜR BEVÖLKERUNG UND ENTWICKLUNG (Hrsg.): Die Zukunft der Dörfer. Zwischen Stabilität und demografischem Niedergang. Köln 2011.
- [3] BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG IM BUNDESAMT FÜR BAU-WESEN UND RAUMORDNUNG (Hrsg.): Datenbasis zum Gebäudebestand. BBSR-Analysen KOMPAKT 09/2016. Bonn 2016.
- [4] BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG IM BUNDESAMT FÜR BAU-WESEN UND RAUMORDNUNG (Hrsg.): Wachsen oder Schrumpfen. BBSR-Analysen KOMPAKT 12/2015. Bonn 2015.
- [5] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin 2010.
- [6] CAMMERER, Walter: Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie (5. Aufl.). Berlin / Heidelberg 1995.
- [7] DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH (DENA): Dena-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin 2016.
- [8] DUZIA, Thomas / BOGUSCH, Norbert: Basiswissen Bauphysik. Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes (2. Aufl.). Stuttgart 2014.
- [9] ESDORN, Horst (Hrsg.): Raumklimatechnik. Band 1 Grundlagen. Berlin / New York 2008.
- [10] FOUAD, Nabil (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2012. Gebäudediagnostik. Berlin 2012.
- [11] FOUAD, Nabil (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2015. Simulations- und Berechnungsverfahren. Berlin 2015.
- [12] FOUAD, Nabil / RICHTER, Torsten: Leitfaden Thermografie im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung. Stuttgart 2006.
- [13] FREYMUTH, Hans u.a.: Lehrbuch der Bauphysik. Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima (5. Aufl.). Stuttgart / Leipzig / Wiesbaden 2002.
- [14] GORNIG, Martin / MICHELSEN, Claus: Bauwirtschaft volle Auftragsbücher und gute Wachstumsaussichten. In: DIW Wochenbericht, Jg. 84 (2017), Heft 1 + 2, S. 32 - 42.
- [15] HEGGER, Manfred u.A.: Baustoff Atlas (1. Aufl.). München 2005.
- [16] HOLM, Andreas Hagen: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes. Stuttgart 2001.

- [17] HOOS, Thorsten / MERZKIRCH, Alexander / MAAS, Stefan u.A.: Messtechnische Ermittlung der U-Werte von Außenwänden im Vergleich mit Typologiewerten für den Gebäudebestand. In: Bauphysik, Jg. 37 (2015), Heft 5.
- [18] ICOMOS DEUTSCHLAND, ICOMOS LUXEMBURG, ICOMOS ÖSTERREICH, ICOMOS SCHWEIZ (Hrsg.): MONUMENTA I. Internationale Grundsätze und Richtlinien der Denkmalpflege. Stuttgart 2012.
- [19] JESPERSEN, o.A.: Die Wärmeleitzahlen feuchter Stoffe und ihre Messung. In: Gesundheitsingenieur, Jg. 74 (1953), Heft 11 / 12.
- [20] KRISCHER, Otto / KAST, Werner: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik (3. Aufl.). Berlin / Heidelberg / New York 1978.
- [21] KRUS, Martin: KRUS, Martin: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Stuttgart 1995.
- [22] KÜNZEL, Hartwig: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Stuttgart 1994.
- [23] PISTOHL, Wolfram: Handbuch der Gebäudetechnik. Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Energiesparen. Planungsgrundlagen und Beispiele (7. Aufl.). Köln 2009.
- [24] SPENGLER, Daniel u.a.: The climate and soil moisture network at TERENO Northeastern German Lowland Observatory - Demmin (Poster). TERENO International Conference 2014. From Observation to Prediction in Terrestrial Systems. Bonn 2014.
- [25] STATISTISCHES BUNDESAMT: Bautätigkeit und Wohnungen. Mikrozensus Zusatzerhebung 2006, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte (Fachserie 5 / Heft 1). Wiesbaden 2008.
- [26] STATISTISCHES BUNDESAMT: Bauen und Wohnen. Mikrozensus Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte. (Fachserie 5 / Heft 1). Wiesbaden 2012.
- [27] STATISTISCHES BUNDESAMT: Bauen und Wohnen. Mikrozensus Zusatzerhebung 2014, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte (Fachserie 5 / Heft 1). Wiesbaden 2016.
- [28] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas (11. Aufl.). Berlin / Heidelberg 2013.
- [29] VIERL, Peter: Putz und Stuck. Herstellen, Restaurieren. München 1987.
- [30] WEISSMANN, Claudia: Analyse erneuerbarer Energiesysteme in vernetzten Wohnquartieren. Entwicklung eines simulationsbasierten Ansatzes zur energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung. Darmstadt 2017.

- [31] WESCHE, Karlhans: Baustoffe für tragende Bauteile. Band 1 Grundlagen. Baustoffkenngrößen, Mess- und Prüftechnik, Statistik und Qualitätssicherung (3. Aufl.) Wiesbaden / Berlin 1996.
- [32] WILLEMS, Wolfgang / SCHILD, Kai / DINTER, Simone: Handbuch Bauphysik Teil 1. Wärmeund Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung (1. Aufl.). Wiesbaden 2006.
- [33] WILLEMS, Wolfgang (Hrsg.): Lehrbuch der Bauphysik. Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima (7. Aufl.). Wiesbaden 2013.

Quellenverzeichnis

Abschlussarbeiten

- [1] BURGAß, Robert: Feuchtigkeitsbedingte Wärmeverluste am Beispiel von Ziegelmauerwerk (Masterthesis). Darmstadt 2015.
- [2] FISCHER, Anna-Lena: Analyse von Materialparametern für hygrothermische Simulationsberechnungen von 5 Versuchsgebäuden (Masterthesis). Darmstadt 2016.
- [3] HUYENG, Tim-Jonathan: Weiterentwicklung eines kapazitiven Temperatur-Feuchte-Sensors für den überhygroskopischen Feuchtebereich (Masterthesis). Darmstadt 2017.
- [4] RÜHL, Maximilian: Hygrothermische Analyse von feuchtem Mauerwerk (Masterthesis). Darmstadt 2017.
- [5] SORGE, Sandra Jessica: Untersuchungen zur Wärmekapazität am Beispiel von einschaligen Außenwänden aus Ziegelmauerwerk (Bachelorthesis). Darmstadt 2015.
- [6] SORGE, Sandra Jessica: Materialparameter-Studie für hygrothermische Simulationsberechnungen von 5 Versuchsgebäuden (Masterthesis). Darmstadt 2017.
- [7] ZINDLER, Janek: Planung eines Versuchsstandes zur Untersuchung von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten (Bachelorthesis). Darmstadt 2015.

Bedienungsanleitungen

- [1] HF SENSOR GMBH: Bedienungsanleitung zum Mikrowellenfeuchtemessgerät MOIST 350 B.
- [2] TROTEC GmbH & CO. KG: Bedienungsanleitung zum Luftentfeuchter TTK 65 E.

Forschungsanträge

[1] SCHÄFER, Stefan / BURGAß, Robert: Quantifizierung und Reduzierung von feuchtigkeitsbedingten Wärmeverlusten im denkmalgeschützten Gebäudebestand. Antragsrunde 2014.

Forschungsberichte

- ACHTZIGER, Joachim / CAMMERER, Joseph: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Bericht zum Forschungsvorhaben Nr. BI 5 - 80 01 83 - 4. Gräfelfing 1984.
- [2] BLUDAU, Christian / ZIRKELBACH, Daniel: Beurteilung der energetischen Auswirkung von hydrophobierenden Imprägnierungen und Anstrichen. IBP-Bericht HTB-13/2007. Holzkirchen 2007.

- [3] INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH: Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt 2010.
- [4] LENGSFELD, Kristin / KRUS, Martin: Hygrothermische Raumklimasimulationen zur Berechnung des Heizenergieaufwandes nach erfolgter Hydrophobierung. IBP-Bericht RKB-21-2007. Holzkirchen 2007.

Gesetze

[1] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV 2016), letzte Änderung: 24. Oktober 2015.

Internetquellen

- [1] Http://www.calsitherm.de/pdf/CS_Techn.%20Hinweise.pdf- 16.06.2016
- [2] Http://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihenundtrends/ zeitreihenundtrends.html - 21.06.2016

Merkblätter

- [1] WTA-Merkblatt 2-4: Beurteilung und Instandsetzung gerissener Putze an Fassaden. August 2008.
- [2] WTA-Merkblatt 3-17: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen. Juni 2010.

Normen

- [1] DIN 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 4. Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. Februar 2013.
- [2] DIN 66317-2: Bestimmung der Dichte fester Stoffe Teil 2: Gaspyknometrie. Dezember 2004.
- [3] DIN EN 772-3: Prüfverfahren für Mauersteine Teil 3. Bestimmung des Nettovolumens und des prozentualen Lochanteils von Mauerziegeln mittels hydrostatischer Wägung (Unterwasserwägung). Oktober 1998.
- [4] DIN EN 772-11: Pr
 üfverfahren f
 ür Mauersteine Teil 11. Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbetonsteinen, Betonwerksteinen und Natursteinen sowie der anf
 änglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln. Juli 2011.
- [5] DIN EN 772-13: Prüfverfahren für Mauersteine Teil 13. Bestimmung der Netto- und Bruttotrockenrohdichte von Mauersteinen (außer Natursteinen). September 2000.
- [6] DIN EN 1015-10: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk Teil 10. Bestimmung der Trockenrohdichte von Festmörtel. Mai 2007.

- [7] DIN EN 1015-18: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk Teil 18. Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von erhärtetem Mörtel (Festmörtel). März 2003.
- [8] DIN EN 1062-1: Beschichtungsstoffe Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich - Teil 1: Einteilung. August 2004.
- [9] DIN EN 12664: 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. Mai 2001.
- [10] DIN EN 13755: Prüfverfahren für Naturstein. Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck. August 2008.
- [11] DIN EN 13829: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden. Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden. Differenzdruckverfahren (ISO 9972:1996, modifiziert). Februar 2001.
- [12] DIN EN ISO 6946: Bauteile Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient -Berechnungsverfahren. April 2008.
- [13] DIN EN ISO 9972: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren (ISO 9972:2015). Dezember 2015.
- [14] DIN EN ISO 12571: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. Dezember 2013.
- [15] DIN EN ISO 12572: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit. Verfahren mit einem Prüfgefäß. Mai 2017.
- [16] DIN EN ISO 15148: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen. März 2003.
- [17] DIN V 18599-2: Energetische Bewertung von Gebäuden Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2. Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen. Oktober 2016.
- [18] VDI / VDE 3512-3: Temperaturmessung f
 ür die Geb
 äudeautomation. Montage von Temperaturf
 ühlern. Februar 2009.

Produkt-Datenblätter

- [1] AHLBORN MESS- UND REGELUNGSTECHNIK GMBH: Almemo Handbuch. Oktober 2011.
- [2] ALUJET GMBH: Datenblatt Alujet Optima Blu. September 2010.
- [3] CAPAROL FARBEN LACKE BAUTENSCHUTZ GMBH: Datenblatt AmphiSilan NQG (Nr. 145). Mai 2016.
- [4] CAPAROL FARBEN LACKE BAUTENSCHUTZ GMBH: Datenblatt Disboxan 451 Imprägniercreme (Nr. 451). Juni 2014.
- [5] DEUTSCHE FOAMGLAS GMBH: Datenblatt FOAMGLAS PERINSUL S (Standard). Januar 2016.
- [6] DÖRKEN GMBH & CO KG: Datenblatt Delta-Maxx. September 2016.
- [7] DOW DEUTSCHLAND ANLAGENGESELLSCHAFT MBH: Datenblatt Roofmate SL-A. Juli 2012.
- [8] DOW DEUTSCHLAND ANLAGENGESELLSCHAFT MBH: Datenblatt Roofmate SL-AP. Juli 2015.
- [9] KNAUF GIPS KG: Door Insulation (DRS Fireboard). August 2011.
- [10] NOVOFERM GMBH: Datenblatt Feuerschutztüren T30 (T30-1 H8-5). Juli 2003.
- [11] OTTERBEIN GMBH & CO KG: Datenblatt Calcidur NHL 2. April 2014.
- [12] PAUL BAUDER GMBH & CO. KG: Datenblatt BauderFLEX DNA. Dezember 2014.
- [13] PAUL BAUDER GMBH & CO. KG (2): Datenblatt Bauder V 60 S 4. März 2014.
- [14] SENSIRION AG: Datenblatt Sensorelement SHT 7x (SHT 71, SHT 75). Dezember 2011.
- [15] TEMPERATURE CONTROL GMBH: Datenblatt Raumpendelfühler. Februar 2009.
- [16] UHU GMBH & CO KG: Datenblatt UHU airmax Luftentfeuchter. Dezember 2012.
- [17] URSA DEUTSCHLAND GMBH: Datenblatt Spannfilz SF 32 / SF 35 / SF 40. März 2016.
- [18] URSA DEUTSCHLAND GMBH (2): Datenblatt Kerndämmplatte KDP 32/V / KDP 2/V / KDP 1/V. März 2016.
- [19] VENTS VENTILATION SYSTEMS: Datenblatt VENTS VKO1-Serie. März 2016.
- [20] ZIRO: Datenblatt Diffufol Dampfbremsfolie. Mai 2007.

Prüfberichte

- [1] DR. ROBERT-MURJAHN-INSTITUT GMBH: Prüfbericht 2008/212-1_1-Zweitschrift. Mai 2008.
- [2] MFPA LEIPZIG GMBH: Prüfprotokoll PP III/W 04 32. Juni 2004.

Richtlinien

[1] VATh-Richtlinie Bauthermografie: Bauthermografie zur Planung, Durchführung und Dokumentation infrarotthermografischer Messungen an Bauwerken oder Bauteilen von Gebäuden. Nürnberg 2016.

Software

- [1] WUFI Pro 6.0, Programm-Version 6.0.2.2027, Datenbank-Version: 26.0.17.0
- [2] WUFI Plus 3.1, Programm-Version 3.1.0.3, Datenbank-Version: 24 / 79
- [3] FLIR Tools+, Programm-Version 6.3

Abbildungsnachweis

- A1 Eigene Abbildung
- A2 Eigene Abbildung basierend auf ACHTZIGER 1984, S. 163
- A3 Eigene Abbildung basierend auf KRISCHER 1978, S. 280
- A4 Eigene Abbildung basierend auf http://de.wikipedia.org 11.02.2015
- A5 Eigene Abbildung basierend auf https://www.gaia-mv.de 11.02.2015
- A6 Eigene Abbildung basierend auf http://www.dwd.de 27.01. bis 28.02.2015
- A7 Eigene Abbildung basierend auf https://kunden.dwd.de 27.01. bis 28.02.2015
- A8 Eigene Abbildung basierend auf http://www.dwd.de 19.04.2018
- A9 Eigene Abbildung basierend auf eigenen Datenbestand und WUFI Pro 6.0
- A10 Eigene Abbildung basierend auf Google Earth Pro 7.3.1.4507
- A11 Eigene Abbildung basierend auf SPENGLER 2014, S. 1
- A12 Eigene Abbildung basierend auf RÜHL 2017, S. 34
- A13 Eigene Abbildung basierend auf RÜHL 2017, S. 35
- A14 Eigene Abbildung basierend auf RÜHL 2017, S. 39
- A15 Eigene Abbildung basierend auf RÜHL 2017, Anhang 3
- A16 Eigene Abbildung basierend auf RÜHL 2017, Anhang 3 und 4
- A17 Eigene Abbildung basierend auf RÜHL 2017, Anhang 5
- A18 Eigene Abbildung basierend auf SENSIRION AG 2011, S. 2
- A19 Eigene Abbildung basierend auf FISCHER 2016, S. 1 192
- A20 Eigene Abbildung basierend auf SORGE 2017, S. 1 486

Tabellennachweis

- T1 Eigene Tabelle
- T2 Eigene Tabelle basierend auf http://www.dwd.de 19.04.2018
- T3 Eigene Tabelle basierend auf http://www.hf-sensor.de 22.05.2018
- T4 Eigene Tabelle basierend auf Bedienungsanleitung zum Messgerät MOIST 350 B
- T5 Eigene Tabelle basierend auf SORGE 2017, S. 183 186
- T6 Eigene Tabelle basierend auf CAPAROL FARBEN LACKE BAUTENSCHUTZ GMBH 2016, S. 2; DR. ROBERT-MURJAHN-INSTITUT GMBH 2008, S. 3 und 5; DIN EN 1062-1, S. 7 bis 8
- T7 Eigene Tabelle basierend auf FISCHER 2016, S. 1 192
- T8 Eigene Tabelle basierend auf SORGE 2017, S. 1 486
- T9 Eigene Tabelle basierend auf WILLEMS 2013, S. 215

Anhang

Anhang 1 - Extremwertanalyse

Extremwertanalyse zur Kubatur der Versuchsgebäude

1. Ausgangssituation

Der Sachverhalt stellt eine Extremwertaufgabe mit Nebenbedingung dar. Das Volumen V ist eine vorgegebene konstante Größe. Die Höhe H ist maximal zu wählen und daher ebenfalls konstant.

Aus

$$V = A_D * H$$

mit

V = konstantH = konstant

folgt, dass die Dachfläche A_D ebenfalls konstant sein muss. Variabel ist hingegen das Verhältnis der Länge L zur Breite B.

Für eine gegebene Höhe H und eine gegebene Dachfläche A_D ist das Verhältnis der Länge L zur Breite B zu ermitteln, welches die Mantelfläche A_M maximiert.

2. Zielfunktion und Nebenbedingungen

Aufstellung der Zielfunktion:

$$Max A_M(L, B)$$

Mit

$$A_M = 2 * H * L + 2 * H * B$$
$$A_M = 2 * H * (L + B)$$

Aufstellung der Nebenbedingung:

$$V = H * L * B$$

Mit

$$H = konstant$$

$$H = \frac{V}{L * B}$$

3. Kombination von Zielfunktion und Nebenbedingungen

Einsetzen der Nebenbedingung in die Zielfunktion:

$$A_M = 2 * \frac{V}{L * B} * (L + B)$$
$$A_M = 2 * \frac{V * L}{L * B} + 2 * \frac{V * B}{L * B}$$
$$A_M = 2 * \frac{V}{B} + 2 * \frac{V}{L}$$

Ableitung der Zielfunktion nach L:

$$A_M(L) = 0 - 2 * V * L^{-2}$$

Bestimmung des Extremwerts durch Nullsetzen:

$$A_M(L) = 0 = -2 * V * L^{-2}$$

$$0 = \frac{2 * V}{L^2}$$

Überprüfung Maximum/Minimum durch 2. Ableitung:

$$A_M``(L) = -\frac{4*V}{L^3} < 0$$

Es liegt ein Maximum vor, da A_{M} `` < 0.

Interpretation des Extremwerts:

$$0 = \frac{2 * V}{L^2}$$

Mit V=konstant gilt:

$$\lim_{L \to \infty} \frac{2 * V}{L^2} = 0$$

Da V ungleich Null ist, muss L unendlich groß werden, damit die Gleichung erfüllt ist.

Da $A_{\scriptscriptstyle D}$ konstant ist folgt hieraus:

$$\lim_{L\to\infty}B=0$$

4. Auswertung

Weil B durch A_D = konstant abhängig ist von L, muss B unendlich klein werden, wenn L unendlich groß wird.

Alternativ hätte der Extremwert auch durch die Ableitung nach B ermittelt werden können. Insofern ergibt sich gleichermaßen A_M maximal, wenn B unendlich groß und L unendlich klein gewählt wird.

Es folgt zusammenfassend, dass A_M maximal wird, bei einer maximalen Differenz Δ zwischen L und B (siehe Abbildung unten).



Anhang 2 - Windanalyse ganzjährig

Wind aus					1						
	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	Durchschnitt
Norden	130	280	117	69	316	245	146	147	187	240	187,7
Nord-Nord-Ost	80	178	68	72	221	118	553	116	126	100	163,2
Nord-Ost	410	453	268	342	394	463	489	374	383	381	395,7
Ost-Nord-Ost	502	572	517	390	522	607	459	242	445	572	482,8
Ost	823	930	562	469	811	962	494	417	618	601	668,7
Ost-Süd-Ost	592	387	406	310	476	458	262	244	310	316	376,1
Süd-Ost	425	287	298	321	439	559	356	215	346	416	366,2
Süd-Süd-Ost	421	363	430	271	291	510	385	252	474	460	385,7
Süd	773	636	851	503	383	552	982	786	735	520	672,1
Süd-Süd-West	765	750	800	547	618	718	1006	592	810	498	710,4
Süd-West	792	920	886	821	778	748	1182	702	767	764	836
West-Süd-West	841	917	1032	717	938	888	1087	852	906	1117	929,5
West	854	1022	1330	843	1179	1087	751	951	1118	1327	1046,2
West-Nord-West	309	520	627	250	522	398	266	351	388	429	406
Nord-West	127	265	244	170	312	238	208	176	179	210	212,9
Nord-Nord-West	124	280	180	121	326	209	158	119	181	238	193,6
Summe	7968	8760	8616	6216	8526	8760	8784	6536	2623	8189	8032,8
Vollständigkeit	90,96%	100,00%	98,36%	70,96%	97,33%	100,00%	100,27%	74,61%	91,02%	93,48%	91,70%
Kombination	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	Durchschnitt
N-S	903	916	968	572	669	797	1128	933	922	760	859,8
NNO-SSW	845	928	868	619	839	836	1559	708	936	598	873,6
NO-SW	1202	1373	1154	1163	1172	1211	1671	1076	1150	1145	1231,7
WSW-ONO	1343	1489	1549	1107	1460	1495	1546	1094	1351	1689	1412,3
0-W	1677	1952	1892	1312	1990	2049	1245	1368	1736	1928	1714,9
OSO-WNW	901	907	1033	560	998	856	528	595	698	745	782,1
SO-NW	552	552	542	491	751	797	564	391	525	626	579,1
SSO-NNW	545	643	610	392	617	719	543	371	655	698	579,3
Summe	7968	8760	8616	6216	8526	8760	8784	6536	7973	8189	8032,8
Vollständigkeit	90,96%	100,00%	98,36%	70,96%	97,33%	100,00%	100,27%	74,61%	91,02%	93,48%	91,70%
Meßstation: 174;	89 Greifswald,	Am St. Georgsfeld :	11	Meßzeitraum:	01.01 31.12. (00):00 bis 23:00 Uhr)		Höchstwerte:	Farblich hervorge	hoben und fett gedi	uckt
Versuchsfeld: 171	21 Loitz, Sandfi	eldstraße 14		Meßhöhe:	2,0 m über NN			Abweichungen:	Summe > 8760 h : Summe < 8760 h :	= Schaltjahr (z.B. 20 = Meßwerte unvolls)8) tändig
Mef. Entfernung: ca. 2	Sstation - Versu 21,70 km (Luftli	uchsfeld inie)		Einheit:	Summierte Stund 2014: 130 h Wind	enmittelwerte, d.h. aus Norden		Quelle:	Deutscher Wetter Abfrage über Wes	dienst ste-XL (27 28.01.1	5)

Anhang 3 - Windanalyse Heizphasen

			1	Auswertung Wind	richtung für Heiz	ohasen (April / Ok	tober) in h/a				
Wind aus	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	Durchschnitt
Norden	51	146	75	51	127	168	64	115	81	127	100,5
Nord-Nord-Ost	30	102	27	61	84	46	167	81	73	67	73,8
Nord-Ost	190	249	64	215	183	205	138	243	175	167	182,9
Ost-Nord-Ost	235	324	198	301	269	270	154	192	195	327	246,5
Ost	561	575	341	325	554	653	320	288	285	374	427,6
Ost-Süd-Ost	484	191	247	262	359	327	207	196	139	140	255,2
Süd-Ost	355	152	176	257	341	394	272	160	180	263	255
Süd-Süd-Ost	350	252	256	222	172	389	293	191	341	274	274
Süd	643	449	589	425	242	380	678	009	584	325	491,5
Süd-Süd-West	593	527	503	453	448	477	614	457	648	344	506,4
Süd-West	506	603	528	634	437	396	722	507	502	480	531,5
West-Süd-West	452	527	495	555	503	387	672	591	561	593	533,6
West	394	478	744	644	619	458	439	691	613	623	570,3
West-Nord-West	133	237	377	193	246	198	172	261	191	185	219,3
Nord-West	57	124	176	121	130	167	119	146	62	106	122,5
Nord-Nord-West	54	152	148	81	140	173	81	111	16	124	115,5
Summe	5088	5088	4944	4800	4854	5088	5112	4830	4738	4519	4906,1
Vollständigkeit	100,00%	100,00%	97,17%	94,34%	95,40%	100,00%	100,47%	94,93%	93,12%	88,82%	96,42%
Kombination	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	Durchschnitt
N-S	694	595	664	476	369	548	742	715	665	452	592
NNO-SSW	623	629	530	514	532	523	781	538	721	411	580,2
NO-SW	696	852	592	849	620	601	860	750	677	647	714,4
ONO-WSW	687	851	693	856	772	657	826	783	756	920	780,1
O-W	955	1053	1085	969	1173	1111	759	979	898	997	997,9
OSO-WNW	617	428	624	455	605	525	379	457	330	325	474,5
SO-NW	412	276	352	378	471	561	391	306	259	369	377,5
SSO-NNW	404	404	404	303	312	562	374	302	432	398	389,5
Summe	5088	5088	4944	4800	4854	5088	5112	4830	4738	4519	4906,1
Vollständigkeit	100,00%	100,00%	97,17%	94,34%	95,40%	100,00%	100,47%	94,93%	93,12%	88,82%	96,42%
Meßstation:	17489 Greifswald,	Am St. Georgsfeld 1	11	Meßzeitraum:	01.01 30.04. (00 01.10 31.12. (00):00 bis 23:00 Uhr)):00 bis 23:00 Uhr)		Höchstwerte:	Farblich hervorgeh	hoben und fett gedr	uckt
Versuchsfeld:	17121 Loitz, Sandf	feldstraße 14		Meßhöhe:	2,0 m über NN			Abweichungen:	Summe > 5088 h = Summe < 5088 h =	= Schaltjahr (z.B. 20 = Meßwerte unvolls)8) :ändig
Entfernung:	Meßstation - Vers ca. 21,70 km (Luftl	uchsfeld linie)		Einheit:	Summierte Stund Heizperiode 2014	enmittelwerte, d.h. : 51 h Wind aus Norc	den	Quelle:	Deutscher Wetter Abfrage über Wes	dienst te-XL (27 28.01.1	(9

			A	uswertung Windr	ichtung für Heizpl	hasen (Mai / Sept	ember) in h/a				
Wind aus	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	Durchschnitt
Norden	100	193	93	60	185	209	113	125	97	168	134,3
Nord-Nord-Ost	59	140	35	68	145	92	364	97	84	79	114,7
Nord-Ost	335	348	155	290	265	299	308	299	233	233	276,5
Ost-Nord-Ost	447	436	329	358	431	417	333	216	292	423	368,2
Ost	752	727	391	401	647	262	418	328	480	451	539,2
Ost-Süd-Ost	551	318	296	281	417	366	234	213	242	225	314,3
Süd-Ost	392	239	228	299	363	439	299	193	280	350	308,2
Süd-Süd-Ost	391	302	340	262	211	449	313	231	404	377	328
Süd	685	533	700	475	307	436	755	771	671	447	578
Süd-Süd-West	654	633	646	505	542	586	733	536	743	414	599,2
Süd-West	600	737	673	719	594	554	834	623	635	592	656,1
West-Süd-West	606	647	737	635	664	566	795	736	743	770	689,9
West	573	650	996	741	841	989	540	833	820	850	750
West-Nord-West	216	312	474	214	331	286	228	310	248	266	288,5
Nord-West	92	153	188	135	190	195	182	169	66	158	156,1
Nord-Nord-West	66	184	157	101	185	191	127	112	106	178	144
Summe	6552	6552	6408	5544	6318	6552	6576	5792	6177	5981	6245,2
Vollständigkeit	100,00%	100,00%	97,80%	84,62%	96,43%	100,00%	100,37%	88,40%	94,28%	91,29%	95,32%
Kombination	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	Durchschnitt
N-S	785	726	793	535	492	645	868	896	768	615	712,3
NNO-SSW	713	773	681	573	687	662	1097	633	827	493	713,9
MS-ON	935	1085	828	1009	859	853	1142	922	868	825	932,6
MSM-ONO	1053	1083	1066	663	1095	683	1128	952	1035	1193	1058,1
M-0	1325	1377	1357	1142	1488	1483	958	1161	1300	1301	1289,2
OSO-WNW	767	630	770	495	748	652	462	523	490	491	602,8
SO-NW	484	392	416	434	553	634	481	362	379	508	464,3
SSO-NNW	490	486	497	363	396	640	440	343	510	555	472
Summe	6552	6552	6408	5544	6318	6552	6576	5792	6177	5981	6245,2
Vollständigkeit	100,00%	100,00%	97,80%	84,62%	96,43%	100,00%	100,37%	88,40%	94,28%	91,29%	95,32%
Meßstation:	17489 Greifswald,	Am St. Georgsfeld 1	11	Meßzeitraum:	01.01 31.05. (00 01.09 31.12. (00):00 bis 23:00 Uhr)):00 bis 23:00 Uhr)		Höchstwerte:	Farblich hervorgeh	hoben und fett gedr	uckt
Versuchsfeld:	17121 Loitz, Sandf	feldstraße 14		Meßhöhe:	2,0 m über NN			Abweichungen:	Summe > 6552 h = Summe < 6552 h =	= Schaltjahr (z.B. 200 = Meßwerte unvolls ⁻)8) :ändig
Entfernung:	Meßstation - Vers ca. 21,70 km (Luftl	uchsfeld linie)		Einheit:	Summierte Stund Heizperiode 2014	enmittelwerte, d.h. : 100 h Wind aus No	rden	Quelle:	Deutscher Wetter Abfrage über Wes	dienst te-XL (27 28.01.1 ¹	(9

Anhang 4 - Windschattenanalyse

Windschattenanalyse

B/H		Falston F	Büro	
von	bis	Faktor F	Höhe Traufe:	3,17
2	3	2	Höhe First:	6,63
3	9,75	3	B maßgebend:	17,51
9,75	16,5	4	B/HTraufe:	5,52
16,5	23,25	5	B/HFirst:	2,64
23,25	30	6	FTraufe:	3
30	>30	7	FFirst:	3 1
			SchattenTraufe:	9,51
			SchattenFirst:	19,89
Nachbargebäude	1		Nachhargehäude 1 A	nhau
Höhe Traufe	4 89		Höhe Traufe:	3 36
Höhe First	6.92		Höhe First:	3 36
B maßgebend:	24.17		B maßgebend:	8.31
B/HTraufe:	4 94		B/HTraufe:	2.47
B/HEirst	3 49		B/HEirst*	2,17
FTraufe:	3		FTraufe:	2,17
FEiret	3		Furet	2
SchattenTraufe	14.67		SchattenTraufe:	6 72
SchattenFirst:	20.76		SchattenFirst:	6.72
o chattoni noti	20,70			0,72
Nachbargebäude	2		Überdachung 2	
Höhe Traufe:	6,25		Höhe Traufe:	4,50
Höhe First:	6,54		Höhe First:	6,14
B maßgebend:	28,71		B maßgebend:	8,31
B/HTraufe:	4,59		B/HTraufe:	1,85
B/HFirst:	4,39		B/HFirst:	1,35
FTraufe:	3		FTraufe:	2
FFirst:	3		FFirst:	2
SchattenTraufe:	18,75		SchattenTraufe:	9,00
SchattenFirst:	19,62		SchattenFirst:	12,28
Nachbargebäude :	3		Nachbargebäude 4	
Höhe Traufe:	6,86		Höhe Traufe:	3,77
Höhe First:	8,47		Höhe First:	5,49
B maßgebend:	51,29 2	2)	B maßgebend:	25,88
B/HTraufe:	7,48	-	B/HTraufe:	6,86
B/HFirst:	6,05		B/HFirst:	4,71
FTraufe:	3		FTraufe:	3
FFirst:	3		FFirst:	3
SchattenTraufe:	20.58		SchattenTraufe:	11.31
SchattenFirst:	25,41		SchattenFirst:	16,47
x 11 11 .	_		··· 1 1 4	
Nachbargebaude	5		Uberdachung I	2 50
Höhe First	5,42		Hohe First	3,39
	0,90		none Flist:	3,95
D maisgebend:	25,08		B maisgebend:	10,00
D/ ITraute:	4,03		D/ ITraute:	4,04
D/ HFirst.	3,03		D/ IIFirst:	4,22
FTraufe:	3		Flraufe:	3
Cohottony ()	3 16 06		Cohottony ()	3 10 77
SchattenFirst:	20.70		SchattenFirst:	10,77
				,
Container			Versuchsgebäude	
Hone Traufe:	2,20		Hohe Traufe:	3,95
Hohe First:	2,20		Hohe First:	3,95
B maisgebend:	8,13		B maßgebend:	5,05
B/HTraufe:	3,70		B/HTraufe:	1,28
B/HFirst:	3,70		B/HFirst:	1,28
FTraufe:	3		FTraufe:	2
FFirst:	3		First:	2
SchattenTraufe:	6,60		SchattenTraufe:	7,90
SchattenFirst:	6,60		SchattenFirst:	7,90

aus Plausibilitätsgründen 3 gewählt
aus Plausibilitätsgründen wurde die maßgebende Länge mit den Faktor 0,75 multipliziert

Anhang 5 - Thermografische Aufnahmen

Versuchsgebäude 4

Versuchsgebäude 3

Versuchsgebäude 2















Max -3,6°C º C Average -4,0°C ¢FLIR Bx1





Wand West





Bx1









Wand West













Wand West













Wand West











Max 8,0°C o C

Versuchsgebäude 4

26.10.2017













Bri

Wand Süd

TX

9,1

Max 9,1 ° C

Max 7,6 ° C

Average Bx1

8.6







Wand West

5,9

8,7

Max 8,5°C o (

Bx1

6'2

7 3 Max

C FLIR

6,7

SFLIR

srage 8,1 °









Versuchsgebäude 3

Versuchsgebäude 2

Versuchsgebäude 1

Bx1

8,8 6,8 Max 8,9°C o C Average 8,2°C ¢FLIR' Bx1

Wand Ost























5,6









BX1

Wand Süd

Bx1

8,4

Max 8,1

BX1

6,9

Max 6,6 ° C o

Bx1

63













Wand West

8,2

FLIR





Anhang 6 - Mikrowellenfeuchtemessung

Versuchsgebäude 1 10.03.2017 Profil "Mauerziegel" [M-%]

Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



















Süd

Versuchsgebäude 2 12.03.2017 Profil "Mauerziegel" [M-%]

West

Messkopf R1M

(2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)















Süd

Ost

Versuchsgebäude 3 12.03.2017	Profil "Mauerziegel" [M-%]	Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)	Messkopf DM (11 cm Tiefe)	Messkopf PM (25 cm Tiefe)
West		·	r	·
Süd		Im Rahmen der ersten Messfahrt wurde ausschließlich die Wand Nordost gemessen	Durch einen Messfehler ist die letzte Spalte des DM Sensors nicht vorhanden	
Ost			$ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0$	



West





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)



14 11,13,05 11,13,05 11,13,05 12,25 12,25 11,12,25 11,12,25 11,12,25 11,12,25 11,12,25 12,25 14,55 14,

200.0 160,0 120,0 100.0 80.0 40,0 50,0 0.0 200,0 100.0 96.0 -128.0 150.0 -160.0 -32.0 60.0 64.0 224,0 0.0 0'99 [um]











Süd

Versuchsgebäude 5 11.03.2017 Profil "Mauerziegel" [M-%]

Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)

Messkopf PM (25 cm Tiefe)















West

Süd

Ost



Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)

200.0

160.0

120.0

40,0 80,0 50,0

100,0

(W)

0.95

192.0

224.0

150,0

128.0



150,0 160,0 192,0 200,0

100,0 96.0

64,0

0.05

32.0

0'0

200,0

160,0

120.0

40,0

[wo]

224,0





0.0 90.0 90.0 190.0 190.0 190.0 190.0 190.0 200.0 200.0 200.0

100,0

50,0 -64,0

32,0

0.0







Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)

9800 1777 177 1777 1















West

Süd

Ost

Ŧ





Süd



0.056











000 0475, 04











Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)



11150 11150

9900 8817 8817 8817 8818 8817 81818 81817 818181

200,0 150,0

120,0

80,0

40,0

[uu]

224,0

100.0





150,0 200.0 50,0 0.00 0.00 128,0 32.0 0.0

400,0

360,0

320,0

260,0

240,0 250,0

200,0

150,0

120,0

80,0 40,0

.

256,0 [cm]





400,0 10 360.0 320.0 0.000 260.0 240.0 250.0 200,0 160,0 120.0 0 00 80,0 40.0 8 * ż



Süd

West

Versuchsgebäude 5 02.06.2017 Profil "Feuchteindex" [-]

West

Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)













Süd

Profil "Feuchteindex" [-] Versuchsgebäude 1 04.06.2017

Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)

Messkopf DM (11 cm Tiefe)

Messkopf PM (25 cm Tiefe)











200.0

100,0

0.0

<u>F</u>



000 0.05 0'0 -192.0 150,0 60,0 100,0 W

200.0 160.0 120,0 100,0 0'00 40,0 0 150,0 200,0 60.0 128,0 100.0 96.0 224,0 32.0 [uu] 0'0 0.96









Ost



Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)













West
























Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)















Süd

Versuchsgebäude 5 07.06.2017 Profil "Feuchteindex" [-]

West

Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)















Süd

Versuchsgebäude 1 24.10.2017 Profil "Feuchteindex" [-]

West

Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)















Süd



Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)









0.95

200.0

160.0

120.0

0.06

40,0 50,0

0.0

[uu]

999

100,0





150.0

-128,0

0'96 0'001

50.0

32.0

0'0

200,0

224,0





0'0









Versuchsgebäude 4 25.10.2017 Profil "Feuchteindex" [-]

West

Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)













Süd

Profil "Feuchteindex" [-] Versuchsgebäude 5 26.10.2017

Messkopf R1M (2-3 cm Tiefe)





Messkopf DM (11 cm Tiefe)



Messkopf PM (25 cm Tiefe)



9000 90000 9000 9000 9000 9000 90000 9000 9000 9000 9000 9000











100.0 40.0 [un]

200.0 160.0

Anhang 7 - Temperatur-Feuchte-Projektion



Versuchsgebäude 1 Ostseite, Thermografie 10.06.2017



Versuchsgebäude 1 Ostseite, Mikrowellenmessung Messkopf PM 04.06.2017



Versuchsgebäude 2 Ostseite, Thermografie 26.10.2017



Versuchsgebäude 2 Ostseite, Mikrowellenmessung Messkopf PM 26.10.2017



Versuchsgebäude 3 Ostseite, Thermografie 26.10.2017



Versuchsgebäude 3 Ostseite, Mikrowellenmessung Messkopf PM 27.10.2017



Versuchsgebäude 4 Südseite, Thermografie 07.06.2017



Versuchsgebäude 4 Südseite, Mikrowellenmessung Messkopf PM 06.06.2017



Versuchsgebäude 5 Ostseite, Thermografie 10.06.2017



Versuchsgebäude 5 Ostseite, Mikrowellenmessung Messkopf PM 07.06.2017

Anhang 8 - Ziegelsteckbriefe der Pilotstichprobe



Ziegel Z-2, ρ =1598,63 kg/m³



Ziegel Z-3, ρ =1663,99 kg/m³







Ziegel Z-6, ρ =1729,35 kg/m³



Ziegel Z-7, ρ =1732,60 kg/m³









Ziegel Z-11, ρ =1905,84 kg/m³





Ziegel Z-13, ρ =1983,73 kg/m³





Ziegel Z-15, $\rho = 1697,91 \text{ kg/m}^3$







```
Ziegel Z-18, \rho=1725,84 kg/m<sup>3</sup>
```



Ziegel Z-19, ρ =1592,50 kg/m³





Ziegel Z-21, ρ =2098,10 kg/m³



Ziegel Z-22, ρ =1682,47 kg/m³



Anhang 9 - Simulationsberechnungen

Bauteilaufbau: Bodenplatte

	Cabiaktan		außen			innen
н	omogene Schichten		1	2 3	5	2
W	ärmedurchlasswiderstand: 7,988 m²K/W (ohne Rsi,Rse)					
W	ärmeübergangskoeffizient (U-Wert): 0,123 W/m²K					
			0,08	0,1 0,1	0,25	
				Dicke	e [m]	88 88 84
Di	cke: 0,538 m					
Nr.	Material/Schicht (außen> innen)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Dicke [m]	Farbe
1	DOW Roofmate SL-A 80 mm	33	1500	0,035	0,08	
2	DOW Roofmate SL-AP 100 mm	33	1500	0,036	0,1	
3	DOW Roofmate SL-AP 100 mm	33	1500	0,036	0,1	
4	Diffufol-Dampfbremsfolie (Sd = 150 m)	130	2300	2,3	0	
5	Stahlbeton C20/25	2400	1000	2,5	0,25	
6	Elastomerbitumen-Dampfsperrschweißbahn BauderFLEX DNA (Sd = 1500 m)	1200	1500	0,17	0,004	
7	Bitumen-Schweißbahn Bauder V 60 S 4	1200	1500	0,17	0,004	

Bauteilaufbau: Eingangstür einschließlich Wärmedämmelement

	auße	innen			
Homogene Schichten	Ι	1	2	3	4 6
Wärmedurchlasswiderstand: 7,031 m²K/W (ohne Rsi,Rse)					
Wärmeübergangskoeffizient (U-Wert): 0,139 W/m²K					
		0,1	0 	0,1	0, 0,043
Dicke: 0,27 m			Dick	e [m]	1 : : 5 : : 1 1

Nr.	Material/Schicht (außen> innen)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Dicke [m]	Farbe
1	DOW Roofmate SL-AP 100 mm	33	1500	0,036	0,1	
2	OSB-Trägerplatte	650	1700	0,13	0,01	
3	DOW Roofmate SL-AP 100 mm	33	1500	0,036	0,1	
4	Luftschicht 15 mm	1,3	1000	0,0882	0,015	
5	Stahl	7800	450	50	0,001	
6	Mineralfaserplatte DRS Fire Board R5643	60	850	0,035	0,043	
7	Stahl	7800	450	50	0,001	

Bauteilaufbau: Flachdach

П.	marana Cabiaktan		außen			innen
	bmogene Schichten		1	1	2	3
W	ärmedurchlasswiderstand: 8,66 m²K/W (ohne Rsi,Rse)					
W	ärmeübergangskoeffizient (U-Wert): 0,113 W/m²K					
			0,06		0,24	0
				Dicke	e [m]	0
Di	cke: 0,315 m					5
Nr.	Material/Schicht (außen> innen)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Dicke [m]	Farbe
1	URSA Kerndämmplatte KDP 2/V	60	850	0,035	0,06	
2	URSA Spannfilz SF 35	60	850	0,035	0,24	
3	Siebdruckplatte - Birken-Sperrholz	700	1600	0,17	0,015	

Bauteilaufbau: Außenwand (Versuchsgebäude 1)



Bauteilaufbau: Außenwand (Versuchsgebäude 2)

	Cabiabban		außen		innen	
н	omogene Schichten		h	2		3
w	ärmedurchlasswiderstand: 0,352 m²K/W (ohne Rsi,Rse)					
W	ärmeübergangskoeffizient (U-Wert): 1,916 W/m²K					
			þ	0,245	i	0,0
			ò	Dicke	e [m]	2
Di	cke: 0,27 m		0 5			
Nr.	Material/Schicht (außen> innen)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Dicke [m]	Farbe
1	Hydrophobiertes Mauerwerk	1745,2	736,82	0,761	0,005	
2	Mauerwerk	1745,2	736,82	0,761	0,245	
3	Hydraulischer Kalkmörtel	1768,4	859	0,851	0,02	

Bauteilaufbau: Außenwand (Versuchsgebäude 3)

	Cabiabtan		außen			innen
н	omogene Schichten		2	3		4
W	ärmedurchlasswiderstand: 0,376 m²K/W (ohne Rsi,Rse)					
W	ärmeübergangskoeffizient (U-Wert): 1,833 W/m²K					
			₿ <u>0,</u>	0,2	5	0,
) 1 7 7	Dicke	e [m]	02
Di	cke: 0,29 m		3			
Nr.	Material/Schicht (außen> innen)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Dicke [m]	Farbe
1	Hydraulischer Kalkmörtel mit Fassadenfarbe	1768,4	859	0,851	0,003	
2	Hydraulischer Kalkmörtel	1768,4	859	0,851	0,017	
3	Mauerwerk	1745,2	736,82	0,761	0,25	
4	Hydraulischer Kalkmörtel	1768,4	859	0,851	0,02	

Bauteilaufbau: Außenwand (Versuchsgebäude 3^{*})

			außen			innen
Ho	omogene Schichten		1	2		3
W	ärmedurchlasswiderstand: 0,376 m²K/W (ohne Rsi,Rse)					
W	ärmeübergangskoeffizient (U-Wert): 1,833 W/m²K					
			0,	0,2	5	0, 02
				Dicke	e [m]	
Di	cke: 0,29 m					
Nr.	Material/Schicht (außen> innen)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Dicke [m]	Farbe
1	Hydraulischer Kalkmörtel mit defekter Fassadenfarbe	1768,4	859	0,851	0,02	
2	Mauerwerk	1745,2	736,82	0,761	0,25	
3	Hydraulischer Kalkmörtel	1768,4	859	0,851	0,02	

Bauteilaufbau: Außenwand (Versuchsgebäude 4)

			außen			innen
H	omogene Schichten			1	2	4
W	ärmedurchlasswiderstand: 1,766 m²K/W (ohne Rsi,Rse)					
W	ärmeübergangskoeffizient (U-Wert): 0,517 W/m²K					
				0,25	0, 0	,08
				Dicke	e[m] 2	
Di	cke: 0,354 m				2	2
		ρ	с	λ	Dicke	
Nr.	Material/Schicht (außen> innen)	[kg/m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[m]	Farbe
1	Mauerwerk	1745,2	736,82	0,761	0,25	
2	Hydraulischer Kalkmörtel	1768,4	859	0,851	0,02	
3	Calsitherm KP-Kleber	1410	1059	0,6	0,002	
4	Calsitherm Klimaplatte	222	1303	0,057	0,08	
5	Calsitherm KP-Kalkglätte	1150	850	0,28	0,002	

Bauteilaufbau: Außenwand (Versuchsgebäude 5)

1

2

Mauerwerk

Hydraulischer Kalkmörtel

außen innen Homogene Schichten 2 1 Wärmedurchlasswiderstand: 0,352 m²K/W (ohne Rsi,Rse) Wärmeübergangskoeffizient (U-Wert): 1,916 W/m²K Ċ. 0,0 2 0,25 Dicke [m] Dicke: 0,27 m λ Dicke ρ [kg/m³] С Material/Schicht (außen --> innen) Farbe Nr. [J/kgK] [W/mK] [m]

1745,2

1768,4

736,82

859

0,761

0,851

0,25

0,02

WUFI®Plus

Material: DOW Roofmate SL-A 80 mm Rohdichte [kg/m³] 33 Typische Baufeuchte [kg/m³] 0 Porosität 0,95 Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK²] 0,0002 1500 Farbe Spezifische Kapazität [J/kgK] Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/mK] 0,035 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl 80



0,03

0,025 L -20

0

20

40

Temperatur [°C]

60

80

WUFI®Plus

Material: DOW Roofmate SL-AP 100 mm

Rohdichte [kg/	n³] 33	Typische Baufeuchte [kg/m ³	0
Porosität	0,95	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²	0,0002
Spezifische Kapazität [J/k	[K] 1500	Farbe	
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/r	iK] 0,036		
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	80		





WUFI®Plus

Material: Diffufol-Dampfbremsfolie (Sd = 150 m)

Rohdichte	[kg/m ³]	130	Typische Baufeuchte	[kg/m ³]	0
Porosität		0,001	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0,0002
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	2300	Farbe		
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F	[W/mK]	2,3			
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		1500000			





WUFI®Plus

Material: Stahlbeton C20/25

Rohdichte [[kg/m³]	2400	Typische Baufeuchte	[kg/m ³]	100
Porosität		0,15	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0,0002
Spezifische Kapazität [[J/kgK]	1000	Farbe		
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [\	W/mK]	2,5			
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		80			





WUFI®Plus

Material: Elastomerbitumen-Dampfsperrschweißbahn BauderFLEX DNA (Sd = 1500 m)

Rohdichte [kg/m ³]	1200	Typische Baufeuchte [kg/m ³]	0
Porosität	0,001	Farbe	
Spezifische Kapazität [J/kgK]	1500		
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/mK]	0,17		
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	20000		



WUFI®Plus

Material: Bitumen-Schweißbahn Bauder V 60 S 4

Rohdichte	[kg/m ³]	1200	Typische Baufeuchte	[kg/m³
Porosität		0,001	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	1500	Farbe	
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F	[W/mK]	0,17		
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		20000		





0

WUFI®Plus

Materialdaten

Material: DOW Roofmate SL-AP 100 mm					
Rohdichte	[kg/m ³]	33	Typische Baufeuchte	[kg/m ³]	0
Porosität		0,95	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0,0002
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	1500	Farbe		
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/mK]	0,036			
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		80			





WUFI®Plus

Material: OSB-Trägerplatte

Rohdichte [kg/r	1 ³] 650	Typische Baufeuchte [kg/m ³]	95
Porosität	0,6	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte [%/M%]	1,5
Spezifische Kapazität [J/kg	K] 1700	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²]	0,0002
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/m	K] 0,13	Farbe	
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	30		





WUFI®Plus

Material: L	uftschicht	15	mm
-------------	------------	----	----

Rohdichte [kg/n	³] 1,3	Typische Baufeuchte [kg/m³]	0
Porosität	0,999	Farbe	
Spezifische Kapazität [J/kg	<] 1000		
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/m	<] 0,0882		
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	0,73		



WUFI®Plus

Material: Stahl

Rohdichte	[kg/m ³]	7800	Typische Baufeuchte	[kg/m³]	0
Porosität		0,95	Farbe		
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	450			
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F	[W/mK]	50			
Wasserdampfdiffusionswiderstandszał	ıl	1500000	1		


Materialparameter: Eingangstür einschließlich Wärmedämmelement

WUFI®Plus

Material: Mineralfaserplatte DRS Fire Board R5643

Rohdichte [kg/i	1 ³] 60	Typische Baufeuchte [kg/m	0 [1
Porosität	0,95	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK	2] 0,0002
Spezifische Kapazität [J/kg	K] 850	Farbe	
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/m	K] 0,035		
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	1		





Materialparameter: Flachdach

WUFI®Plus

/laterialdaten

Material: URSA Kerndämmplatte KDP 2/V

Rohdichte [kg/m3]	60	Typische Baufeuchte [kg/m] 0
Porosität	0,95	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK] 0,0002
Spezifische Kapazität [J/kgK]	850	Farbe	
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/mK]	0,035		
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	1]	





Materialparameter: Flachdach

WUFI®Plus

Material: URSA Spannfilz SF 35

material: ertert epaining er ee					
Rohdichte	[kg/m³]	60	Typische Baufeuchte	[kg/m ³]	0
Porosität		0,95	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0,0002
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	850	Farbe		
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F	[W/mK]	0,035		2	
Wasserdampfdiffusionswiderstandszał	าไ	1]		





Materialparameter: Flachdach

WUFI®Plus

Material: Siebdruckplatte - Birken-Sperrholz

Rohdichte [kg/	m³] 700	Typische Baufeuchte [kg/m ³]	101
Porosität	0,53	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte [%/M%]	1,5
Spezifische Kapazität [J/k	gK] 1600	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²]	0,0002
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/r	nK] 0,17	Farbe	
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	90		





WUFI®Plus

Materialdater

Material: Mauerwerk

Rohdichte	[kg/m ³]	1745,2	Typische Baufeuchte	[kg/m³]	0
Porosität		0,3438	Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m ³]	4,62
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	736,82	Freie Wassersättigung	[kg/m ³]	272,67
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F	[W/mK]	0,761	Wasserabsorptionskoeffizient	[kg/m ² s^0.5]	0,373
Wasserdampfdiffusionswiderstandszah	l	13,28	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp	o. [W/mK²]	0,0002
			Farbe		





Material:	Hydraulisc	her Kalkmörte
-----------	------------	---------------

Rohdichte	[kg/m³]	1768,4	Typische Baufeuchte [kg/m ³] 0
Porosität		0,2881	Bezugsfeuchtegehalt [kg/m3] 12,449
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	859	Freie Wassersättigung [kg/m ³	261,09
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/mK]	0,851	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s ⁰ .5]	0,371
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		14,9	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²] 0,0002
			Farbe	





Materialdater

Material: Hydrophobiertes Mauerwerk			
Rohdichte [kg/m ³]	1745,2	Typische Baufeuchte [kg/m ³	0
Porosität	0,3438	Bezugsfeuchtegehalt [kg/m ³	2,099
Spezifische Kapazität [J/kgK]	736,82	Freie Wassersättigung [kg/m³	45,68
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/mK]	0,761	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s^0.5]	0,0006
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	19,19	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²	0,0002
		Farbe	





Material: Mauerwerk

Rohdichte [kg/r	³] 1745,2	Typische Baufeuchte [kg/m³]	0
Porosität	0,3438	Bezugsfeuchtegehalt [kg/m ³]	4,62
Spezifische Kapazität [J/kg	K] 736,82	Freie Wassersättigung [kg/m³]	272,67
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/m	K] 0,761	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s^0.5]	0,373
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	13,28	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²]	0,0002
		Farbe	





Material: Hydraulischer Kalkmörtel

Rohdichte [kg/n	³] 1768,4	Typische Baufeuchte [kg/m ³]	0
Porosität	0,2881	Bezugsfeuchtegehalt [kg/m ³]	12,449
Spezifische Kapazität [J/kg	<] 859	Freie Wassersättigung [kg/m³]	261,09
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/m	<] 0,851	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s ^{0.5}]	0,371
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	14,9	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²]	0,0002
		Farbe	





WUFI®Plus

Material: Hydraulischer Kalkmörtel mit Fassadenfarbe

Rohdichte [kg/m ³]	1768,4	Typische Baufeuchte [kg/m ³]	0
Porosität	0,2881	Bezugsfeuchtegehalt [kg/m ³]	12,449
Spezifische Kapazität [J/kgK]	859	Freie Wassersättigung [kg/m³]	261,09
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/mK]	0,851	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s ^{0.5}]	0,0017
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	14,9	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²]	0,0002
		Farbe	



0,855

0,85

0,845 🕊 -20

0

20

Temperatur [°C]

40

60

Rohdichte [kg	g/m³]	1745,2	Typische Baufeuchte [kg/m ³	0
Porosität		0,3438	Bezugsfeuchtegehalt [kg/m3	4,62
Spezifische Kapazität [J/	/kgK]	736,82	Freie Wassersättigung [kg/m ³	272,67
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W	//mK]	0,761	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s^0.5]	0,373
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		13,28	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²	0,0002
			Farbe	





Material:	Hydraulischer	Kalkmörtel
-----------	---------------	------------

Rohdichte	[kg/m ³]	1768,4	Typische Baufeuchte [kg/	m³]	0
Porosität		0,2881	Bezugsfeuchtegehalt [kg/	m³]	12,449
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	859	Freie Wassersättigung [kg/	m³]	261,09
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F	[W/mK]	0,851	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s ⁰	.5]	0,371
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		14,9	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/m	K²]	0,0002
			Farbe		





Materialparameter: Außenwand (Versuchsgebäude 3^{*})

WUFI®Plus

Material: Hydraulischer Kalkmörtel mit defekter Fassadenfarbe

Rohdichte [kg/m ³]	1768,4	Typische Baufeuchte [kg/m ³]	0
Porosität	0,2881	Bezugsfeuchtegehalt [kg/m ³]	12,449
Spezifische Kapazität [J/kgK]	859	Freie Wassersättigung [kg/m³]	261,09
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/mK]	0,851	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s ^{0.5}]	0,371
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	14,9	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK2]	0,0002
		Farbe	



0,855

0,85

0,845 🕊 -20

0

20

Temperatur [°C]

40

60

Materialparameter: Außenwand (Versuchsgebäude 3^{*})

Material: Mauerwerk	Material:	Mauerwerk
---------------------	-----------	-----------

Rohdichte [kg/r	1745,2 ^{°°}	Typische Baufeuchte [kg/m ³]	0
Porosität	0,3438	Bezugsfeuchtegehalt [kg/m ³]	4,62
Spezifische Kapazität [J/kg	K] 736,82	Freie Wassersättigung [kg/m³]	272,67
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/m	K] 0,761	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s^0.5]	0,373
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	13,28	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²]	0,0002
		Farbe	





Materialparameter: Außenwand (Versuchsgebäude 3^{*})

Material:	Hydraulischer	Kalkmörtel
-----------	---------------	------------

Rohdichte	[kg/m ³]	1768,4	Typische Baufeuchte [kg/	m³]	0
Porosität		0,2881	Bezugsfeuchtegehalt [kg/	m³]	12,449
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	859	Freie Wassersättigung [kg/	m³]	261,09
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F	[W/mK]	0,851	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s ⁰	.5]	0,371
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		14,9	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/m	K²]	0,0002
			Farbe		





WUFI®Plus

Materialdaten

Material: Mauerwerk

[kg/m ³]	1745,2	Typische Baufeuchte	[kg/m³]	0
	0,3438	Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m ³]	4,62
[J/kgK]	736,82	Freie Wassersättigung	[kg/m ³]	272,67
[W/mK]	0,761	Wasserabsorptionskoeffizient	[kg/m ² s^0.5]	0,373
nl	13,28	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Ten	np. [W/mK²]	0,0002
		Farbe		
	[kg/m ³] [J/kgK] [W/mK] hl	[kg/m³] 1745,2 0,3438 0,3438 [J/kgK] 736,82 [W/mK] 0,761 nl 13,28	[kg/m³] 1745,2 Typische Baufeuchte 0,3438 Bezugsfeuchtegehalt [J/kgK] 736,82 Freie Wassersättigung [W/mK] 0,761 Wasserabsorptionskoeffizient nl 13,28 Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Ten Farbe Farbe	[kg/m³] 1745,2 Typische Baufeuchte [kg/m³] 0,3438 Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³] [J/kgK] 736,82 Freie Wassersättigung [kg/m³] [W/mK] 0,761 Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m²s^0.5] nl 13,28 Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK²] Farbe Farbe Farbe





Material:	Hydraulischer	Kalkmörtel
-----------	---------------	------------

Rohdichte [[kg/m³]	1768,4	Typische Baufeuchte	[kg/m ³]	0
Porosität		0,2881	Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m ³]	12,449
Spezifische Kapazität [[J/kgK]	859	Freie Wassersättigung	[kg/m ³]	261,09
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [\	W/mK]	0,851	Wasserabsorptionskoeffizient [k	g/m ² s^0.5]	0,371
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		14,9	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0,0002
			Farbe		





WUFI®Plus

Material: Calsitherm KP-Kleber

Rohdichte	[kg/m ³]	1410	Typische Baufeuchte [H	kg/m³]	53
Porosität		0,468	Bezugsfeuchtegehalt [H	kg/m³]	53
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	1059	Freie Wassersättigung [ł	kg/m³]	63
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F	[W/mK]	0,6	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s	s^0.5]	0,0038
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		23	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W	//mK²]	0,0002
			Farbe		





WUFI®Plus

Material: Calsitherm Klimaplatte

Rohdichte	[kg/m ³]	222
Porosität		0,92
Spezifische Kapazität	[J/kgK]	1303
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F	[W/mK]	0,057
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		5,4

		-
Typische Baufeuchte	[kg/m ³]	7,1
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m ³]	7,1
Freie Wassersättigung	[kg/m ³]	815
Wasserabsorptionskoeffizient	[kg/m ² s^0.5]	0,93
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Fe	uchte [%/M%]	1,656
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Te	mp. [W/mK²]	0,0002
Farbe		





WUFI®Plus

Material: Calsitherm KP-Kalkglätte

Rohdichte [kg/m	3] 1150	Typische Baufeuchte [kg/m ³]	80
Porosität	0,4346	Bezugsfeuchtegehalt [kg/m ³]	80
Spezifische Kapazität [J/kgl	(] 850	Freie Wassersättigung [kg/m ³]	260
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/m]	(] 0,28	Wasserabsorptionskoeffizient [kg/m ² s^0.5]	0,1337
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	12	Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp. [W/mK ²]	0,0002
		Farbe	





Anhang 10 - Ausführungsplanung

Planliste

Stand: 26.06.16

Gebäude I

Nummer	Bezeichnung	Stand
E-I-1.1	Lageplan	26.06.16
E-I-1.2	Grundriss	26.06.16
E-I-1.3	Querschnitt	26.06.16
E-I-1.4	Längsschnitt	26.06.16
E-I-2.1	Ansicht von Norden und Osten	26.06.16
E-I-2.2	Ansicht von Süden und Westen	26.06.16
E-I-3.1.1	Detail A – Traufe Querschnitt	26.06.16
E-I-3.1.2	Detail A – Traufe Längsschnitt	26.06.16
E-I-3.2	Detail B – Sockel	26.06.16
E-I-3.3.1	Detail C – Tür horizontal	26.06.16
E-I-3.3.2	Detail C – Tür vertikal	26.06.16

Gebäude II

Nummer	Bezeichnung	Stand
E-II-1.1	Lageplan	26.06.16
E-II-1.2	Grundriss	26.06.16
E-II-1.3	Querschnitt	26.06.16
E-II-1.4	Längsschnitt	26.06.16
E-II-2.1	Ansicht von Norden und Osten	26.06.16
E-II-2.2	Ansicht von Süden und Westen	26.06.16
E-II-3.1.1	Detail A – Traufe Querschnitt	26.06.16
E-II-3.1.2	Detail A – Traufe Längsschnitt	26.06.16
E-II-3.2	Detail B – Sockel	26.06.16
E-II-3.3.1	Detail C – Tür horizontal	26.06.16
E-II-3.3.2	Detail C – Tür vertikal	26.06.16

Gebäude III

Nummer	Bezeichnung	Stand
E-III-1.1	Lageplan	26.06.16
E-III-1.2	Grundriss	26.06.16
E-III-1.3	Querschnitt	26.06.16
E-III-1.4	Längsschnitt	26.06.16
E-III-2.1	Ansicht von Norden und Osten	26.06.16
E-III-2.2	Ansicht von Süden und Westen	26.06.16
E-III-3.1.1	Detail A – Traufe Querschnitt	26.06.16
E-III-3.1.2	Detail A – Traufe Längsschnitt	26.06.16
E-III-3.2	Detail B – Sockel	26.06.16
E-III-3.3.1	Detail C – Tür horizontal	26.06.16
E-III-3.3.2	Detail C – Tür vertikal	26.06.16

Gebäude IV

Nummer	Bezeichnung	Stand
E-IV-1.1	Lageplan	26.06.16
E-IV-1.2	Grundriss	26.06.16
E-IV-1.3	Querschnitt	26.06.16
E-IV-1.4	Längsschnitt	26.06.16
E-IV-2.1	Ansicht von Norden und Osten	26.06.16
E-IV-2.2	Ansicht von Süden und Westen	26.06.16
E-IV-3.1.1	Detail A – Traufe Querschnitt	26.06.16
E-IV-3.1.2	Detail A – Traufe Längsschnitt	26.06.16
E-IV-3.2	Detail B – Sockel	26.06.16
E-IV-3.3.1	Detail C – Tür horizontal	26.06.16
E-IV-3.3.2	Detail C – Tür vertikal	26.06.16

Gebäude V

Nummer	Bezeichnung	Stand
E-V-1.1	Lageplan	26.06.16
E-V-1.2	Grundriss	26.06.16
E-II-1.3	Querschnitt	26.06.16
E-V-1.4	Längsschnitt	26.06.16
E-V-2.1	Ansicht von Norden und Osten	26.06.16
E-V-2.2	Ansicht von Süden und Westen	26.06.16
E-V-3.1.1	Detail A – Traufe Querschnitt	26.06.16
E-V-3.1.2	Detail A – Traufe Längsschnitt	26.06.16
E-V-3.2	Detail B – Sockel	26.06.16
E-V-3.3.1	Detail C – Tür horizontal	26.06.16
E-V-3.3.2	Detail C – Tür vertikal	26.06.16

Gebäudeübergreifend

Nummer	Bezeichnung	Stand
E-1.5	Sparrenplan	26.06.16
E-1.6	Bodenplatte	26.06.16
E-3.4	Dämmelement	26.06.16
E-3.5	Kabeldurchführung	26.06.16

Technische Anlagen

Nummer	Bezeichnung	Stand
T-1.1	Lageplan/Leitungsführung	26.06.16
T-1.2.1	Beregnungsanlage Schnitt	06.10.15
T-1.2.2	Beregnungsanlage Ansicht	06.10.15
T-1.3.1	Messtechnik Versuchsgebäude I bis III	14.12.15
T-1.3.2	Messtechnik Versuchsgebäude IV	14.12.15
T-1.3.3	Messtechnik Mikrowellenfeuchtemessung	06.10.15
T-1.3.4	Detail Sensoren	26.06.16
T-1.3.5	Übersicht Messtechnik	26.06.16











17121 Loitz, Sandfeldstraße 14





Ansicht von Westen



H/B = 297 / 420



H/B = 297 / 420





H/B = 297 / 420

17121 Loitz, Sandfeldstraße 14

E-I-3.2

M 1:10














 Matter
 Parameters
 E-II-2.1 Ansicht von Norden und Osten

 Verdeser:
 Parameters
 Bartiel State
 Bartiel State

 Verdeser:
 Parameters
 Bartiel State
 Bartiel State

 Values:
 Datus:
 Bartiel State
 Bartiel State

 Materia:
 Parameters
 Bartiel State
 Bartiel State

 Materia:
 Parameters
 17121 Loitz, Sandfeldstraße 14





Ansicht von Westen









H/B = 297 / 420

17121 Loitz, Sandfeldstraße 14

E-II-3.2

M 1:10

















The sector of th







17121 Loitz, Sandfeldstraße 14

Plannummer:

E-III-3.2

M 1:10















 Properties
 E-IV-2.1 Ansicht von Norden und Osten

 Verfasser
 Burverhehen

 Verfasser
 Burverhehen

 Verfasser
 Burverhehen

 Verfasser
 Burverhehen

 None Zindler
 Datum

 Maßstah:
 Plannummer

 Milstah:
 Plannummer

 Milstah
 I7121 Loitz, Sandfeldstraße 14





Ansicht von Westen























 Vertises:
 Determinant
 <thDeterminant</th>
 <thDeterminant</th>
 <




Ansicht von Westen



H/B = 297 / 420







H/B = 297 / 420

Betriebsgelände Burgaß Bau GmbH

26.06.16

Plannummer: E-V-3.2

M 1:10

17121 Loitz, Sandfeldstraße 14































Messung jede zweite Binderschicht











Beispielhafte Verteilung der Feuchtigkeit in der Tiefe der Außenwand







5,46





3 Sensoren in 9. Binderschicht für Luftfeuchte und -temperatur