

BBSR-
Online-Publikation
56/2024

greenTES

Fassadenintegration von Photovoltaik und Begrünung im vorgefertigten Holzbausystem

von

Elisabeth Fassbender

Christine Hani

Benedikt Glas

Elisabeth Suttner

Prof. Manfred Stieglmeier

Dr.-Ing. Claudia Hemmerle

Thomas Engel

Serena Keller

Hanna Wirth

Tabea Horn

greenTES

Fassadenintegration von Photovoltaik und Begrünung
im vorgefertigten Holzbausystem

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.47

Projektlaufzeit: 11.2021 bis 12.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuerin

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Verena Kluth
verena.kluth@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Juniorforschungsgruppe Cleanvelope
Elisabeth Fassbender, M. Sc. (Projektleitung)
elisabeth.fassbender@tum.de

Technische Universität München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Dr.-Ing. Claudia Hemmerle
claudia.hemmerle@tum.de

Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Christine Hani, M. Sc.
christine.hani@tum.de

Elisabeth Suttner, M. Sc.
elisabeth.suttner@tum.de

Dr.-Ing. Thomas Engel
engel@tum.de

Serena Keller, M. Sc.
serena.keller@tum.de

Hanna Wirth, M. Sc.
hanna.wirth@tum.de

Tabea Horn, M. Sc.
tabea.horn@tum.de

Fachhochschule Salzburg, Forschungsbereich Holz- und biogene Technologien
Benedikt Glas, B. Eng.
benedikt.glas@fh-salzburg.ac.at
FH-Prof. Dipl.-Ing. Manfred Stieglmeier, M. Eng.
manfred.stieglmeier@fh-salzburg.ac.at

Redaktion

Technische Universität München

Stand

Juni 2024

Gestaltung

Technische Universität München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Elisabeth Fassbender, M. Sc.

Bildnachweis

Titelbild: Elisabeth Fassbender

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Fassbender, Elisabeth; Hani, Christine; Glas, Benedikt; Suttner, Elisabeth; Stieglmeier, Manfred; Hemmerle, Claudia; Engel, Thomas; Keller, Serena; Wirth, Hanna; Horn, Tabea, 2024: greenTES: Fassadenintegration von Photovoltaik und Begrünung im vorgefertigten Holzbausystem. BBSR-Online-Publikation 56/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Kurzfassung	11
Abstract	12
Einführung	13
Themenfeld & Problemstellung	13
Forschungsfragen & Zielsetzung	13
Forschungsdesign	15
Ausgangsbasis & Grundlagen	18
TES Energy Facade	18
'Grüne' Fassadensysteme	19
Fassadenbegrünung	19
Gebäudeintegrierte Photovoltaik	21
Bauphysik	21
Feuchteschutz im Holzbau	21
Wärmeschutz im Holzbau	27
Hygrothermische Messmethoden	29
Hygrothermische Simulation	32
Brandschutz: Bauordnungsrechtliche Anforderungen	36
Definitionen und Begriffsbestimmungen	36
Baurechtliche Anforderungen an Außenwände, Außenwandbekleidungen und Außenwandsysteme	37
Stand der Forschung: Brandversuche mit Photovoltaik	40
Systemauswahl	46
Fassadenbegrünung	46
Gebäudeintegrierte Photovoltaik	47
Konstruktive Entwicklung	49
greenTES Konstruktionsvarianten	49
System 1: Troggebundene Fassadenbegrünung	49
System 2: Fassadenbegrünung mittels Rinnensystem	51
System 3: Photovoltaik-Fassade - AVANCIS Skala	54
System 4: Photovoltaik-Fassade – GES – Glas-Glas-Module	55
System 5: Fassade mit Selbstklimmern	56

Detaillösungen	56
Kabelführung	56
Anschlussdetails	57
Elementstöße	57
Wandöffnungen	58
Mock-Up	58
Bauphysik	61
Messtechnische Untersuchung	61
Beschreibung und Begründung des Messkonzepts	61
Auswahl und Ausführung der Messtechnik	62
<i>Ausführung der Messtechnik</i>	63
Positionierung der Sensoren und Messgeräte	65
<i>Messzeitraum und Messintervall</i>	67
<i>Wetterdaten und zugrundeliegende Messtechnik</i>	68
<i>Sensorbenennung und Datenumwandlung</i>	69
Messergebnisse	71
Simulationsbasierte Untersuchung	106
Modellierung der greenTES-Fassaden	106
Validierung und Optimierung des Simulationsmodells anhand von Messdaten	115
Simulation von Anwendungsszenarien	125
Bauphysikalische Bewertung	135
Messtechnische Untersuchung	135
Simulationsbasierte Untersuchung	136
Brandschutz	138
Allgemeines sowie methodische Vorgehensweise	138
Durchwärmungsversuch	138
Untersuchungsziel	138
Prüfkriterien und-grundsätze zur Durchführung	138
Prüfkörperaufbau	138
Messstellenanordnung	140
Ergebnisse und Auswertung Durchwärmungsversuch	143
Großbrandversuche	153
Untersuchungsziel Großversuche	153
Methodische Vorgehensweise	153
Versuch 1	155
Versuch 2	162
Brandschutztechnische Bewertung	172
Ausblick Brandschutz	173
Workflow & Planungsprozesse (Benedikt Glas)	174
Holzbaugerechter Planungsprozess	174

Workflow der Vorfertigung mit Integration von PV- und Begrünungssystemen	175
Workflow Vorfertigung	175
Workflow Montage	177
Übertragbarkeit auf den Neubau	178
Lebenszyklusanalyse	178
Zusammenfassung & Diskussion	180
Fazit & Ausblick	183
Mitwirkende	184
Kurzbiographien	185
Abbildungsverzeichnis	188
Tabellenverzeichnis	194
Anlagen	196
A.1 Detailzeichnungen der greenTES-Konstruktionsvarianten	196
A.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	233
A.3 Ergebnisse der Modelloptimierung	242
A.4 Prüfbericht Durchwärmungsversuch	245
A.5 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 1	246
A.6 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 2	246
A.7 Einsatztaktische Stellungnahme der TUM Werkfeuerwehr	246
A.8 Bezeichnungen für Baustoffe und Bauteile nach DIN 4102 – Anhang A.1: Baustoffe	246
Literaturverzeichnis	248

Nomenklatur

Symbole	Einheit	Beschreibung
d	m	Schichtdicke
α	-	Strahlungsabsorptionskoeffizient
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
m	kg	Masse
μ	-	Wasserdampfdiffusionswiderstand
u	M.-%	Massebezogener Feuchtegehalt
v	g/m ³	Wasserdampfkonzentration
v _s	g/m ³	Wasserdampfkonzentration gesättigter Luft
p	Pa	Druck
P _{sat}	Pa	Wasserdampfsättigungsdruck
φ	%	Relative Luftfeuchte
ρ	kg/m ³	Rohdichte
s _d	m	Dampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke
V	m ³	Volumen
w	%	Baustoffvolumenbezogene Masse des Wassers

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
a	außen
AB	Anfangsbedingung
ANSI	American National Standards Institute
Aqua	Aquapanel Cement Board der Firma Knauff
BER	Berechnung
BIPV	Bauwerksintegrierte Photovoltaik
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
ETK	Einheits-Temperaturzeitkurve
FERMA	FERMACELL Gipsplatte
FD	Feuchte Dämmung
FQ	Feuchtequelle
FQT	Feuchtequelle durch Transpiration
FSR	Flame Speed Rate
HF	Holzfeuchte
HI	Hinterlüftungsebene
i	innen
ISO	Zellulosedämmstoff der Firma ISOCELL
Isopleth	In einem Feuchte- und Temperaturdiagramm anzeigende Linien gleicher Keimungszeit für Sporen
LIM	Lowest Isopleth for Mould (allgemein gültige minimale Keimungsisoplethe)
MAX	Maximum
MESS	Messung im Mock-Up
mH	Fassade Selbstklammer mit Hinterlüftung
MHolzBauRL	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise
MIN	Minimum
MST	Module Safety Test
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
MW	Mittelwert
oH	Fassade Selbstklammer ohne Hinterlüftung
PV	Photovoltaik
q50	Infiltrationsquelle
Q90	90 % Quartil

R	Regenbelastung
R ²	Bestimmtheitsmaß
RB	Randbedingung
Ref	Referenzfassade
rFx	relative Feuchte Position x
SD	Standardabweichung
SRQ	System Response Quantity
TaO	Temperatur Außenoberfläche
t _{ch}	Zeitpunkt des Beginns der Verkohlung hinter der Bekleidung
t _f	Zeitpunkt des Eintritts des Verlusts an Haftvermögen
TES	Timber based Element System
TiO	Temperatur Innenoberfläche
Tx	Temperatur in Position x
UK	Unterkonstruktion
UL	Underwriters Laboratories (Dienstleistungen in den Bereichen Prüfung und Zertifizierung)
wx	Wassergehalt Position x
WET	Wetterdaten
WG	Wirkungsgrad
WQ	Wärmequelle
WTA	Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.
WUFI	Wärme und Feuchte instationär (Simulationssoftware)

Kurzfassung

Das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2050 kann nur erreicht werden, wenn eine Steigerung der Sanierungsrate sowie eine Integration von erneuerbarer Energieerzeugung in Neubau- und Sanierungskonzepte erfolgt. Gleichzeitig erfordert der Klimawandel Anpassungsmaßnahmen, um auch in Zukunft ein gesundes Klima in Städten zu erreichen. Das Forschungsprojekt greenTES adressiert beide Probleme, indem die Integration von PV und Begrünung in vorgefertigte Holzbaukonstruktionen untersucht wird. Mit der TES Energy Facade (Timber based Element System) steht ein Bausystem und ein systematischer Workflow für die tiefe Sanierung von Bestandsgebäuden auf zukunftsfähige Standards zur Verfügung. Es erlaubt die Verwendung diverser Fassadenbekleidungen sowie die Integration von Gebäudetechnik und wird nun für die „grünen“ Komponenten PV und Begrünung erweitert. Vorfertigung und standardisierte Prozesse minimieren dabei den objektspezifischen Entwicklungsaufwand und Fehlerquellen beim Einsatz der neuen Fassadenbaustoffe.

Um flexible Maßnahmen bereit zu stellen, zielt die Forschung auf die konkrete, aber übertragbare Lösung kritischer Integrationsfragen ab. Sie klärt die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Begrünungssysteme und PV-Modulvarianten und die Eignung vorgefertigter Holzbausysteme am Beispiel der TES-Fassade grundlegend. Die konstruktive Integration verschiedener Begrünungs- und PV-Systeme wird konzeptionell entwickelt und anschließend anhand eines 1:1-Mock-Ups erprobt und optimiert. Hygrothermische Simulationen und deren messtechnische Validierung an den Mock-Ups untersuchen die bauphysikalischen Implikationen beider Systeme auf die Holzkonstruktion. Brandschutztechnische Bewertungen erfolgen durch umfangreiche Brandversuche.

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass eine Integration von Photovoltaik und Begrünung in den Holzbau mit einem hohen Vorfertigungsgrad möglich ist, wenn die Bewässerungsleitungen sowie elektrischen Leitungen in einem separat konzipierten Versorgungsschacht verlaufen. Insbesondere bei bodengebundenen Begrünungssystemen ist eine Hinterlüftung mit hohem Luftwechsel bauphysikalisch notwendig, um entstehende Feuchte abzutragen und Schäden an der Fassadenkonstruktion zu vermeiden. Aus brandschutztechnischer Sicht stellen bei Lösch- und Rettungsversuchen herabfallende Photovoltaikmodule eine Herausforderung dar. Eine Brandverleitung über mehrere Geschosse wird nicht verursacht. Ein Hemmnis für die verbreitete Nutzung der greenTES Fassaden stellen jedoch die hohen Kosten im Vergleich zu Wärmedämmverbundsystemen sowie die hohen Wandstärken dar. Die Forschungsergebnisse werden in der Praxis in Form eines Planungsleitfadens und digitaler Musterdetails zur Verfügung gestellt.

Abstract

A climate-neutral building stock by 2050 can only be realized by increasing the rate of renovation and by integrating renewable energy generation in new construction and renovation concepts. At the same time, climate change requires adaptation measures to maintain a healthy and liveable climate in cities. The research project greenTES addresses both problems by investigating the integration of photovoltaics and greenery systems into prefabricated timber building structures. Here, the TES Energy Facade (Timber based Element System) provides both a construction system and a systematic workflow for the deep retrofit of existing buildings to sustainable and future-oriented standards. It allows the application of diverse facade claddings as well as the integration of building technology systems and is now to be extended for the "green" components PV and greenery. Prefabrication and standardized processes minimize the object-specific development effort and occurring errors when applying the new facade materials.

To provide flexible measures, the research aims to conceive specific but transferable solutions of critical integration issues. The advantages and disadvantages of different vertical greenery systems and PV modules and the suitability of prefabricated timber building systems are fundamentally clarified using the TES façade as an example. The structural integration of different greenery and PV systems is conceptually developed and subsequently tested and optimized by means of a 1:1 mock-up. Hygrothermal simulations and their metrological validation on the mock-ups investigate the building-physical implications of both systems on the timber structure. Extensive fire tests allow the evaluation of fire safety.

The research results show that integrating photovoltaics and greening into timber construction with a high degree of prefabrication is feasible if the irrigation lines and electrical cables are run in a separately designed utility shaft. In particular, for ground-linked greening systems, a back-ventilation with a high air exchange rate is necessary to remove resulting moisture and prevent damage to the facade construction. From a fire safety perspective, descending photovoltaic modules pose a challenge during firefighting and rescue attempts. However, a fire spread across multiple stories is not to be expected. A barrier to the widespread use of the greenTES facades, however, are the high costs compared to External Thermal Insulation Composite Systems as well as the high wall thicknesses. The research results are made available in the form of a planning guide and digital sample details.

Einführung

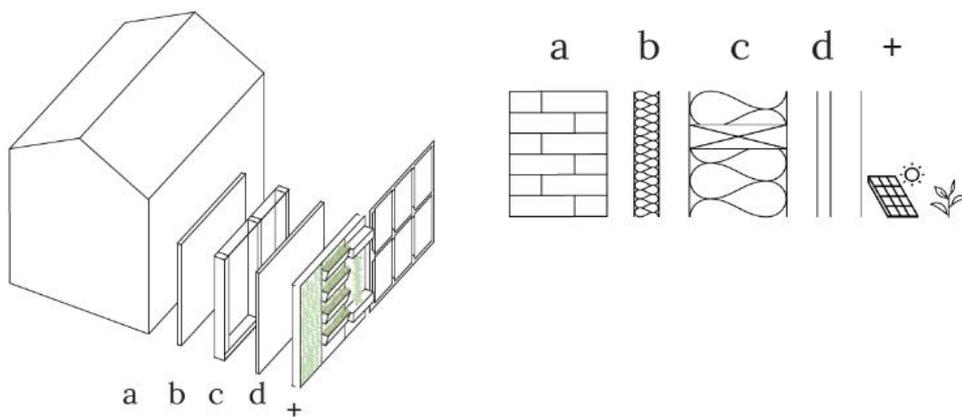
Themenfeld & Problemstellung

Das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2050 kann nur erreicht werden, wenn eine Steigerung der Sanierungsrate ebenso wie eine Integration von erneuerbarer Energieerzeugung in Neubau- und Sanierungskonzepte erfolgt. Gleichzeitig erfordert der Klimawandel Anpassungsmaßnahmen, um auch in Zukunft ein gesundes Klima in Städten zu erreichen. Dabei bieten insbesondere Fassaden Flächenpotenziale für Wärmeschutz und Erzeugung erneuerbarer Energien sowie für die Integration von Gebäudebegrünung zur Abmilderung der zunehmenden sommerlichen Wärmebelastung im Außenraum.

Bauherr:innen, Architekt:innen und Planer:innen stehen der Solarenergienutzung und Gebäudebegrünung in der Regel positiv gegenüber, sehen aber aufgrund von Vorbehalten hinsichtlich finanziellem, planerischem und genehmigungsrechtlichem Mehraufwand, gewerkeübergreifender Verantwortlichkeiten, gestalterischer Einschränkungen oder möglicher Langzeitschäden am Gebäude letztlich von einer Umsetzung ab [1, 2]. Vorgefertigte Holzbausysteme können hier eine Lösung bieten: Durch die Vorfertigung in der Werkhalle und standardisierte Prozesse werden Fehlerquellen und kostenintensive Sonderlösungen bei der Integration von Solarenergie und Begrünung vermieden und zugleich eine hohe ästhetische Qualität erreicht. Somit kann eine Sanierung ebenso wie ein Neubau zügig und zugleich nachhaltig in Hinblick auf Ressourcenschonung durch nachwachsende Rohstoffe und erneuerbare Energien erfolgen.

Daher untersucht das Forschungsprojekt greenTES die Integration von PV und Begrünung in vorgefertigte Holzbaukonstruktionen. Mit der TES Energy Facade (Timber based Element System) steht ein Bausystem und ein systematischer Workflow für die tiefe Sanierung von Bestandsgebäuden von außen auf zukunftsfähige Standards zur Verfügung. Es erlaubt die Verwendung diverser Fassadenbekleidungen sowie die Integration von Gebäudetechnik und wird nun, wie in Abbildung 1 zu sehen, für die „grünen“ Komponenten PV und Begrünung erweitert sowie für Anwendungen im Neubau geöffnet.

Abbildung 1 Schematische Darstellung der greenTES Konstruktionen



Forschungsfragen & Zielsetzung

Bislang wurde Photovoltaik in vorgefertigten Holzbausystemen lediglich im Einzelfall individuell umgesetzt, während Begrünung keine Anwendung fand. Das Projekt greenTES entwickelt nun übertragbare Lösungsansätze zur Integration der grünen Funktionen in ein ökologisches Bausystem auf Basis der TES Energy Facade. So kann der objektspezifische Anpassungs- und Entwicklungsaufwand für Einzelprojekte minimiert werden. Das gewählte Bausystem basiert zudem auf dem nachwachsenden Rohstoff Holz. Es ermöglicht den Erhalt von Gebäuden am Ende ihres Lebenszyklus, indem es eine rentable und zukunftsfähige Ertüchtigung anbietet.

Dabei eignen sich vorgefertigte Fassadensysteme in Holzbauweise für eine gestalterisch hochwertige, brandschutztechnisch sichere und hinsichtlich des Holzschutzes unbedenkliche Integration von fassadengebundener Begrünung und PV-Elementen. Differenzierte Wandaufbauten, definierte Prozessabläufe und hohe Ausführungsqualität der vorgefertigten Elemente erlauben eine effiziente Nutzung der Klimaschutz- und Klimaanpassungspotenziale von Neubau- und Sanierungsprojekten vor allem im mehrgeschossigen Wohnungsbau und bieten einen gestalterischen, wirtschaftlichen und ökologischen Mehrwert. Die Begrünungs- und Solarsysteme bedingen unterschiedliche Integrationslösungen. Für die wesentlichen Konstruktionsprinzipien lassen sich Auswahlkriterien, exemplarische Wandaufbauten, Fügungs- und Anschlussdetails, bauphysikalische Kennwerte sowie brandschutztechnischen Lösungsprinzipien darstellen, die eine robuste Übertragung auf eine Bandbreite an Anwendungsfällen erlauben. Eine Erweiterung des bestehenden Prozesses mit abgestimmten Planungs- und Bauabläufen kann die Gewerkeschnittstellen und Verantwortlichkeiten für die neuen Fassadenbaustoffe klären sowie den Gedanken der Vorfertigung in der Baupraxis festigen.

Die im Projekt erarbeiteten konzeptionellen, konstruktiven und technischen Anwendungslösungen und entsprechenden Prozessinnovationen können Hemmnisse für klima- und umweltfreundliche Bauweisen abbauen und Planer:innen wie Bauherr:innen zu einem verstärkten Einsatz dreifach grüner Fassadenlösungen als Alternative zu wenig nachhaltigen Standardausführungen mit Wärmedämmverbundsystem motivieren. Sie stehen allen Marktteilnehmer:innen offen. Eine grundlegende, durch Simulationen und Messungen belegte Charakterisierung der wärme- und feuchtetechnischen Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf Wandaufbauten sowie brandschutztechnische Nachweiskonzepte für PV-Fassaden sind über die im Projekt untersuchten Holzbaulemente hinaus von Interesse. Die einmalige forschende Durchführung der Großbrandversuche und Aufbereitung zu übertragbaren Musterkonzepten kommt einer Vielzahl von Praxisprojekten zugute.

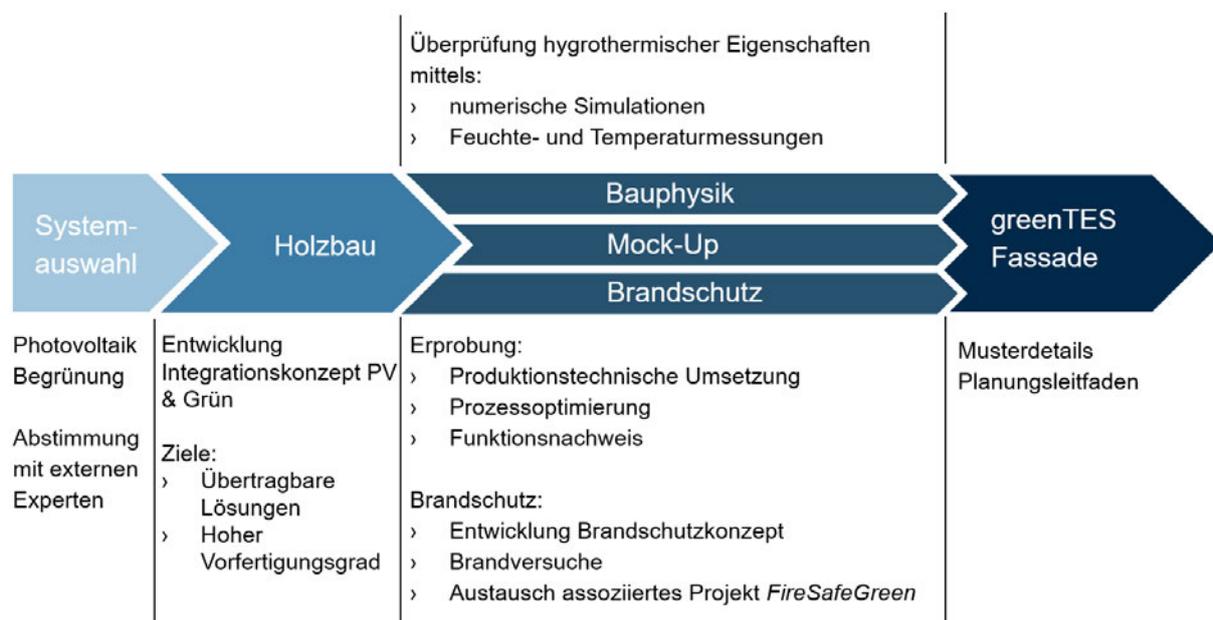
Insgesamt wurden im greenTES Projekt die folgenden Ziele angestrebt:

- Übertragbare gestalterische und konstruktive Lösungen für unterschiedliche Ansprüche
- Beleg der technischen Ausführbarkeit am 1:1-Modell
- Bauphysikalische Bewertung der Integration von Fassadenbegrünung oder BIPV
- Konzeptionelle und konstruktive brandschutztechnische Bewertung der Integration von PV und Begrünung im Holzbau
- Anwendungswissen über grüne Technologien in klimagerechten Fassaden und der Vorfertigung

Forschungsdesign

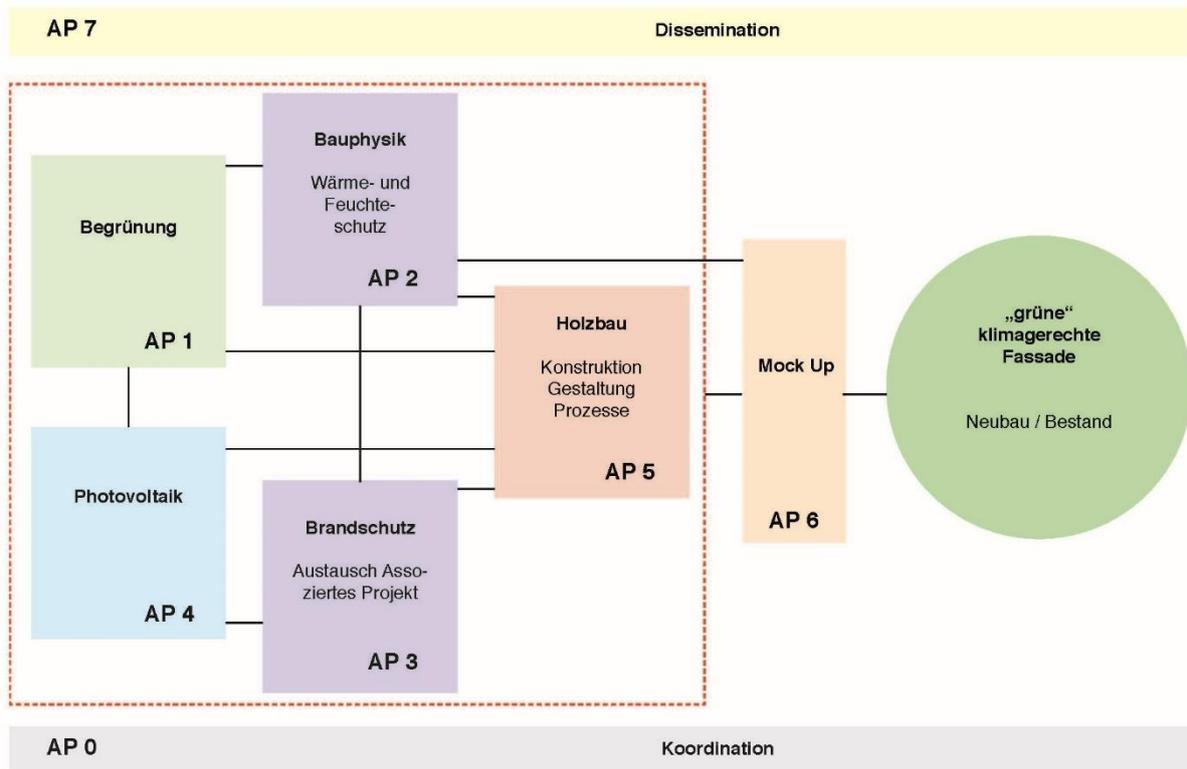
Das greenTES Projekt zielt mit dem in Abbildung 2 dargestellten Forschungsdesign auf die konkrete, aber übertragbare Lösung kritischer Integrationsfragen ab. Dabei werden die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Begrünungssysteme und PV-Modulvarianten und die Eignung vorgefertigter Holzbausysteme am Beispiel der TES Energy Facade grundlegend geklärt. Die konstruktive Integration wird konzeptionell entwickelt und anschließend anhand eines 1:1-Mock-Ups erprobt und optimiert. Hygrothermische Simulationen und deren messtechnische Validierung am Mock-Up untersuchen die bauphysikalischen Implikationen beider Systeme auf die Holzkonstruktion. Brandschutztechnische Bewertungen und Nachweise erfolgen durch einen Ofen- sowie zwei Großbrandversuche. Die Forschungsergebnisse einschließlich des integrierten Workflows und der Lebenszyklusanalyse werden der Praxis in Form eines Planungsleitfadens und digitaler Musterdetails zur Verfügung gestellt, um eine breite Anwendung zu generieren.

Abbildung 2 Methodische Vorgehensweise im greenTES Forschungsprojekt



Dabei teilen sich die einzelnen Aspekte des Forschungsprojekts in die folgenden acht, in Abbildung 3 gezeigten Arbeitspakete auf, um die Projektziele zu erreichen:

Abbildung 3 Arbeitspakete im greenTES Forschungsprojekt



Projektteam und Organisation

Das Forschungsprojekt greenTES wird in einem interdisziplinären Projektkonsortium mit verschiedenen Partnern aus der Forschung sowie der Praxis bearbeitet. Dabei liegt die Projektleitung bei der Juniorforschungsgruppe Cleanvelope, die dem Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen der TU München zugeordnet ist.

Die inhaltliche Verantwortung der Juniorforschungsgruppe Cleanvelope umfasst neben der Projektkoordination die Analyse, Bewertung und Auswahl der in die TES Energy Facade zu integrierenden Begrünungs- und Photovoltaiksysteme. Im Bereich der Begrünung unterstützt die Begrünungsexpertin Nicole Pfoser das Projektteam. Im Bereich der Photovoltaik kann auf Expertise der externen Projektpartner AVANCIS GmbH, GES Gebäudeenergiesysteme GmbH sowie ARMOR solar power films GmbH zurückgegriffen werden.

Die konstruktive Entwicklung sowie die Erarbeitung von Konstruktionsdetails liegt in der Verantwortung der Fachhochschule Salzburg, Forschungsbereich Holz und biogene Baustoffe. In Zusammenarbeit mit dem Architekten für Holzbau Frank Lattke sowie dem mittelständischen Holzbauunternehmen Gump & Maier GmbH werden die greenTES Fassaden konzipiert und optimiert. Gump & Maier GmbH fertigt zudem das greenTES Mock-Up an.

Der Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen untersucht zudem in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, ebenfalls der TU München, die hygrothermischen Einflüsse in den greenTES Fassaden. Dies geschieht zum einen mittels messtechnischer Untersuchungen am Mock-Up und zu anderen durch simulationsbasierte Analysen. Das Simulationsmodell wird dabei anhand der hygrothermischen Messdaten validiert.

Weiterhin konzipiert der Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion Brandversuche, welche die greenTES Fassaden in der PV-Variante unter verschiedenen Brandszenarien testen. Die Umsetzung, Auswertung und Interpretation der Ergebnisse liegen beim Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Die Probekörper

werden von der Gump & Maier GmbH hergestellt und die AVANCIS GmbH unterstützt bei der Montage der Photovoltaikmodule. Dokumentiert werden die Brandversuche schließlich vom Forschungslabor für Haustechnik des Lehrstuhls für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen. Weiterhin findet ein intensiver Austausch mit dem Forschungsprojekt Fire-Safe Green am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion statt, in welchem das Brandverhalten von begrünten Fassaden untersucht wird. [3]

Ausgangsbasis & Grundlagen

TES Energy Facade

Die TES Energy Facade ist eine in Holztafelbauweise vorgefertigte Fassade, welche ursprünglich zur Sanierung von Bestandsgebäuden entwickelt wurde.

Durch den stetig steigenden Bedarf an Gebäudesanierungen im Bestand ergeben sich bei Bauten der 1950er bis 1980er Jahre enorme Potentiale zur Einsparung wichtiger Ressourcen im Bereich Energie sowie zur Optimierung der Nachhaltigkeit in und an den Gebäuden. Durch eine angestrebte Sanierung von Bestandsgebäuden kann nicht nur Energie durch einen Wechsel von Energieträgern eingespart werden, sondern auch die CO₂-Emissionen von Gebäuden gesenkt werden. Auch die Gesetzgebung reagiert immer weiter darauf mögliche Potentiale, welche sich durch Sanierungen ergeben, weiter auszuschöpfen. So wurde unter anderem zuletzt das Gebäudeenergiegesetz im Jahr 2020 eingeführt, das die vorherigen einzelnen Regelungen aus EnEG, EnEV und EEWärmeG in einem Gesetz zusammenführt.

Ziel der TES Energy Facade sind die Senkung der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor, sowie die Verbesserung der Energieeffizienz von Bestandsbauten. Welches Potential in der Gebäudesanierung steckt und wie viel potentielle Gebäude derzeit in Deutschland sanierungsbedürftig sind, zeigt der aktuelle Ariadne-Report aus dem Jahr 2021 [4]. Aus diesem geht hervor, dass 2023 58 % aller Wohngebäude in Deutschland keine gedämmten Außenwandflächen besitzen.

Die TES Energy Facade wurde für diesen Anwendungsbereich konzipiert. Das System ermöglicht ein vorgefertigtes Holztafelbauelement, mit dem die gesamte Gebäudehülle im Bestand mittels dreidimensionalem Aufmaß und kurzen Bauzeiten energetisch saniert werden kann. Die hervorzuhebenden Eigenschaften der TES-Elemente liegen vor allem darin, dass die Bau- und Montagezeiten auf der Baustelle verkürzt werden, was dazu führt, dass Nutzer:innen weniger Einschränkungen während der verkürzten Bauzeit als bei herkömmlichen energetischen Sanierungen haben. Dies ist möglich, da die TES Energy Facade Elemente im Zuge der Vorfertigung bereits vormontiert auf die Baustelle gebracht werden und lediglich die Montage der gesamten Elemente noch zu kleineren Einschränkungen führt. Auch individuelle gestalterische Aspekte sowie technische Wünsche wie z.B. das Vorverlegen von Leerrohren für die Montage von fassadenseitigen PV-Modulen können bereits im Zuge der Vorfertigung berücksichtigt und eingeplant werden.

Der Grundaufbau der TES Energy Facade Module funktioniert, unabhängig von dem zu sanierenden Bestandsgebäude, nach dem folgenden Prinzip:

- Statisch wirksame Tragstruktur in Holztafelbauweise
- Wasserführende Schicht
- Gefachdämmung bzw. Dämmschicht

Alle Anschlüsse sowie Details, welche für die Einhaltung der bauphysikalischen sowie brandschutztechnischen Aspekte relevant sind, werden bereits bei der Vorfertigung berücksichtigt.

Die erfolgreiche Integration des greenTES-Fassadensystems in ein Bestandsgebäude erfordert eine ausführliche Planung und Vorbereitung. Ein Schritt in diesem Prozess ist die präzise Vermessung des Gebäudes. Diese ist entscheidend, da Fehler in diesem Stadium sich später in der Fertigung und Montage der Fassadenmodule als problematisch erweisen können. Idealerweise wird ein 3D-Modell des gesamten Gebäudes erstellt, das als Grundlage für die Anpassung und Planung der vorgefertigten Bauteile dient.

Es stehen mehrere Methoden zur Gebäudevermessung zur Verfügung, darunter die Photogrammetrie, Tachimetrie und der 3D-Laserscan. Diese digitalen Vermessungstechniken ermöglichen es, die Gebäudegeometrie präzise zu erfassen und ein genaues 3D-Modell zu erstellen. Je genauer das Aufmaß des Bestandsgebäudes ist, desto reibungsloser verläuft die Vorplanung der Fassadenmodule. Dank der

Fortschritte in der Vermessungstechnologie kann ein vollständiges Gebäude mittels 3D-Scans digital erfasst werden. Dabei können die bereits verwendeten Baustoffe im Bestandsgebäude identifiziert werden. Idealerweise werden die verschiedenen Vermessungsmethoden kombiniert, um wichtige Punkte der Fassade und die Oberflächenstruktur in einem Gesamtmodell zusammenzuführen und zu überprüfen, um Abweichungen zu vermeiden.

Eine weitere Überlegung ist die statische Machbarkeit der Montage der vorgehängten Fassadenmodule. Obwohl die greenTES-Module nichttragend sind, müssen sie an der Außenwand des Gebäudes befestigt werden. Daher ist es entscheidend, die Außenwand im Vorfeld auf ihre Tragfähigkeit zu prüfen, um ein Ausreißen der Befestigungen zu verhindern. Die Bauweise des Bestandsgebäudes und sein aktueller Zustand spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle. Es ist wichtig, die Module entsprechend vorzubereiten und die richtigen Verbindungsmittel auszuwählen. Der Sockel muss entsprechend vorbereitet werden, und eventuelle Schwachstellen im Bestand müssen behoben werden. [5]

'Grüne' Fassadensysteme

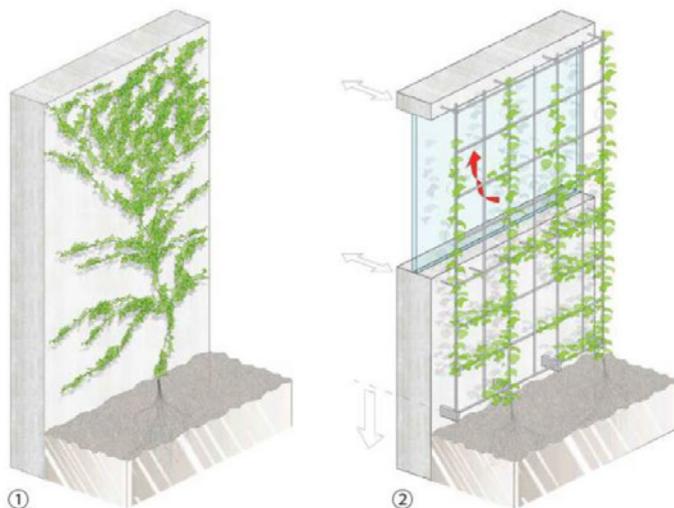
Fassadenbegrünung

Die Fassadenbegrünung lässt sich in Hinblick auf ihre Bauweise und Pflanzenauswahl in die bodengebundene Begrünung und die wandgebundene Begrünung aufteilen.

Bodengebundene Fassadenbegrünung

Bei der bodengebundenen Begrünung rankt die Pflanze an der Fassade, wurzelt jedoch direkt im Boden und bezieht ihre Wasser- und Nährstoffversorgung aus dem Erdreich [6]. Dabei kann es sich entweder um einen gewachsenen Boden oder um künstlich bereitgestelltes Bodenmaterial handeln [7]. Dadurch ergibt sich eine nachhaltige, kostengünstige und pflegeleichte Begrünungsform [8]. Bei der bodengebundenen Fassadenbegrünung unterscheidet man nach den Klettercharakteristika der Pflanze zwei Systeme: Den Direktbewuchs mit Selbstklimmern und den leitbaren Bewuchs mit Gerüstkletterpflanzen [9]. In Abbildung 4 sind die zwei Systeme der bodengebundenen Fassadenbegrünung dargestellt.

Abbildung 4 Bodengebundene Fassadenbegrünung als Direktbewuchs (1) oder als leitbarer Bewuchs (2) [9]



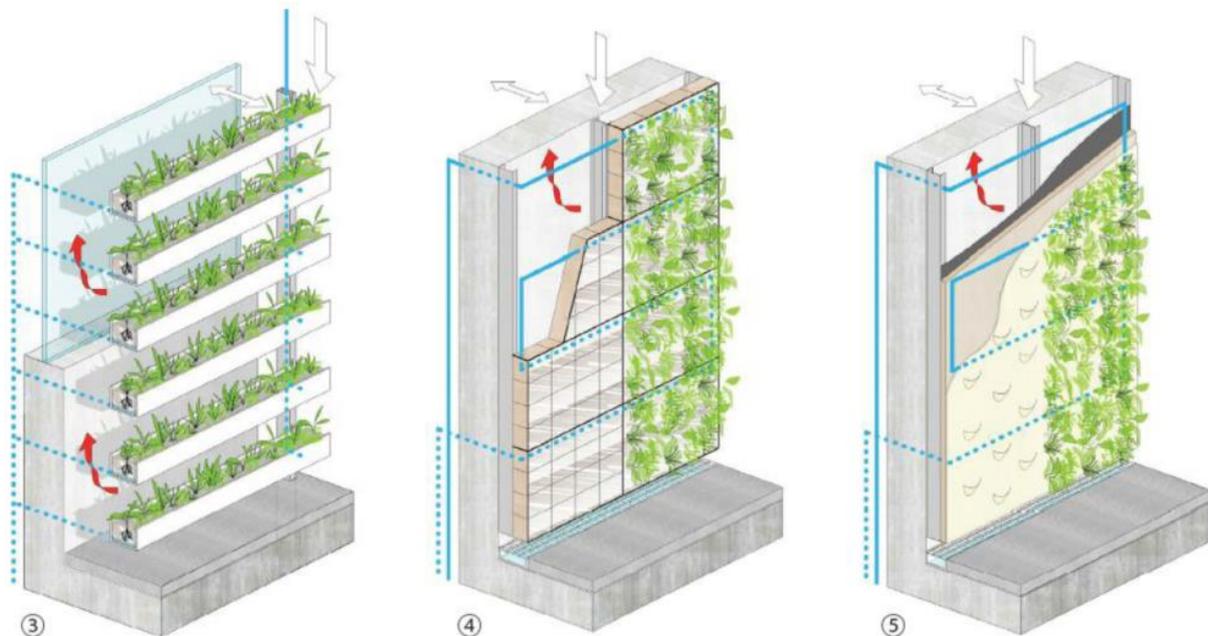
Beim Direktbewuchs kommt es ohne jegliche Kletterhilfen zu einem vollflächigen Bewuchs der Fassade mit selbstkletternden Pflanzen, wie zum Beispiel Wurzelkletterer oder Haftscheibenranker. Voraussetzung dafür

ist eine standfeste und rissfreie Fassadenoberfläche aus Beton oder verputztem Mauerwerk. Fugen, Wände mit außenliegender Wärmedämmung und hinterlüftete Fassaden sind ungeeignet. Ist die Wand ungeeignet, so benötigen die Pflanzen technische Konstruktionen wie Gitter, Netze oder Seile zum Festhalten. Die Kletterhilfen befinden sich in einem gewissen Abstand zur Gebäudewand und können daher zum Beispiel auch an Glasfassaden angebracht werden. Für beide Systeme ist die Wuchshöhe abhängig von der Pflanzenart und kann bis zu 30 m betragen. Die am häufigsten verwendeten Selbstklimmer sind Efeu und Kletterhortensien. Bei den Gerüstkletterern werden Blauregen oder Wildreben am meisten verwendet [8, 9].

Wandgebundene Fassadenbegrünung

Neben den bodengebundenen Begrünungsvarianten kommen vor allem im innerstädtischen Bereich aufgrund der fehlenden natürlichen Bodenflächen wandgebundene Begrünungssysteme immer häufiger zum Einsatz. Wandgebundene Fassadenbegrünungen können durch drei unterschiedliche Bauweisen realisiert werden. Abbildung 5 (3) zeigt die horizontale Ausführung. Hierbei werden die Pflanzen in horizontal laufenden Rinnen oder in mehreren Einzelbehältern übereinander angeordnet. Die Aufnahme der Pflanzenbehälter wird entweder durch eine Kragkonsole oder durch eine Sekundärkonstruktion realisiert [7, 9]. Die vertikale Umsetzung der wandgebundenen Begrünung ist in Abbildung 5 (4) und (5) dargestellt und erfolgt entweder als modulare Bauweise oder als flächige Bauweise. Bei der modularen Bauweise dienen vorgefertigte Einzelfelder, wie begrünte Matten oder Platten, als Substratspeicher [6]. Auf den 60-100 cm großen Quadraten oder Rechtecken werden die Pflanzen vorkultiviert und anschließend an der Fassade angebracht. Die Versorgung der Pflanzen findet dabei in der nicht sichtbaren Unterkonstruktion der Module statt. Durch die Vorkultivierung und den geringen Aufwand der Montage kann eine sofortige Wirkung der Begrünung erzielt werden. Für die flächige Bauweise wird an der Gebäudeaußenwand eine Sekundärkonstruktion verbaut. Diese dient als Abdichtung und als Hinterlüftungs- und Installationsraum. Auf die Konstruktion wird eine verrottungsfreie Trägerplatte installiert. Auf dieser ist ein wasseraufnahmefähiges Vlies gespannt, welches als Substratersatz dient. Darauf werden die Pflanzen befestigt [7, 9].

Abbildung 5 Wandgebundene Fassadenbegrünung als horizontale Ausführung (3), modulare Bauweise (4) und flächige Bauweise (5) [9]



Durch wandgebundene Systeme können Flächen und höhere Teile von Fassaden gezielter und schneller begrünt werden, da kein natürlicher Boden- bzw. Bodenwasseranschluss nötig ist. Durch die dauerhafte

künstliche Bewässerung entstehen zwar höhere Kosten und auch der Pflegeaufwand steigt, allerdings sind diese Systeme nahezu unabhängig von ihrem Standort [8, 9].

Gebäudeintegrierte Photovoltaik

Photovoltaikmodule produzieren durch die direkte Umwandlung von einfallender kurzwelliger solarer Strahlung elektrische Energie. Je nach Einfallwinkel wird ein Teil der Strahlung absorbiert und der andere Teil reflektiert. Der Anteil an absorbierter Strahlung sowie der Zell-Wirkungsgrad bestimmen, wie viel elektrische Energie produziert werden kann und wie viel Prozent der Strahlung in Wärme umgewandelt wird. Der Zell-Wirkungsgrad liegt für den Großteil der Module zwischen 15 und 24 %. Der in Wärme umgewandelte Anteil der solaren Einstrahlung erhöht die Modultemperatur, wodurch der elektrische Energieertrag nachteilig beeinflusst wird. Dabei unterscheiden sich PV-Module hinsichtlich der Technologie der Solarzellen in kristalline Module und Dünnschichtmodule [10, 11].

- **Kristalline Module:** Die PV-Zellen der kristallinen Module können nach ihrem Herstellungsverfahren in mono- und polykristalline Zellen unterteilt werden. Über den Siliziumzellen befindet sich häufig eine transparente Kunststoffolie aus Ethylen-Vinyl-Acetat, welche die Zellen vor Witterungseinflüssen oder Beschädigungen schützt. Auf der Vorderseite ist eine Glasscheibe angebracht. Die Rückseite besteht entweder auch aus Glas (Glas-Glas-Modul) oder aus einer Folie (Glas-Folien-Modul). An Fassaden wird häufiger das Glas-Glas-Modul verwendet [12].
- **Dünnschichtmodule:** Bei den Dünnschichtmodulen haben die PV-Zellen eine Schichtdicke von 1-2 μm , das heißt, sie sind um Faktor 100 dünner als kristalline Module. Die verwendeten Halbleitermaterialien sind amorphes Silizium oder andere Beschichtungsmaterialien wie Cadmiumtellurid (CDTe) oder Kupferindiumdiselenid (CIS). Diese Materialien werden in einer dünnen Schicht auf das Trägermaterial aufgedampft oder aufgesprüht. Als Trägermaterial kann dabei Glas als klassisches Glas-Glas-Modul verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Einbettung der Zellen in Kunststoff. Dadurch können sie leicht und flexibel eingesetzt und sogar auf gekrümmten Oberflächen installiert werden. Auch sind Dünnschichtmodule im Vergleich zu kristallinen Modulen weniger anfällig gegenüber Leistungsverlusten bei hohen Modultemperaturen. Allerdings ist ihr Wirkungsgrad niedriger, weshalb eine größere Fläche notwendig ist, um den gleichen Solarertrag wie bei kristallinen Modulen zu erreichen [12].

Konstruktiv können Photovoltaikfassaden in Kalt- und Warmfassaden unterteilt werden. Eine Kaltfassade ist von der Fassade thermisch entkoppelt und hinterlüftet, während die PV-Module bei einer Warmfassade ohne Hinterlüftung in die Fassade integriert sind.

Bauphysik

Feuchteschutz im Holzbau

Bei unzureichendem Schutz vor Wärme und Feuchtigkeit kann die Gebrauchstauglichkeit und Langlebigkeit von Holzkonstruktionen beeinträchtigt werden. Unter anderem führt ein Schwanken der Bauteilfeuchte bei Holzkonstruktionen zu Quell- und Schwindvorgängen. Bei zu großen Veränderungen kann eine Festigkeitsänderung des Bauteils folgen. Neben der Vermeidung von Feuchteintrag in das Bauteil soll hiermit ein Austrocknen von eingedrungener Feuchte gewährleistet werden. Ziel ist es, ein behagliches Innenraumklima zu schaffen, den Heizaufwand des Gebäudes zu minimieren und die Bausubstanz vor Wasser zu schützen. Im Folgenden werden die zu Grunde liegenden bauphysikalischen Prinzipien für die Projektergebnisse dargelegt.

Hygroskopische Eigenschaften

Die Feuchtigkeitsregulierung eines Materials steht in direktem Zusammenhang mit seiner Porosität sowie den hygroskopischen Eigenschaften. Hygroskopische Materialien haben die Fähigkeit, Wasserdampf aus der Umgebungsluft aufzunehmen, wobei das aufgenommene Wasser sowohl gasförmig als auch flüssig im Material gespeichert werden und an den inneren Oberflächen des hygroskopischen Baustoffs angelagert werden kann. [13, 14]

Die Berechnung des Feuchtegehalts eines Materials erfolgt durch das Verhältnis der Wassermasse zur Masse des trockenen Baustoffs, ausgedrückt in Masseprozent: [15]

$$u = \frac{m_w}{m_b} [15]$$

u Massebezogener Feuchtegehalt [M.-%]

m_w Masse des Wassers [kg]

m_b Masse des trockenen Baustoffs [kg]

An jedem Punkt der relativen Luftfeuchte tritt eine Gleichgewichtsfeuchte ein, welche als Sorptionsfeuchte bezeichnet wird. Die Sorptionsisotherme spiegelt den Gleichgewichtszustand der Feuchte bei konstanter Temperatur wider. [16] Für die im Forschungsprojekt greenTES herangezogene Software WUFI (vgl. **Hygrothermische Simulation**) wird die Sorptionsisotherme nach Holm [17] auf Basis der BET-Gleichung [18] adaptiert. Hiermit kann die Sorptionsisotherme verschiedener Baustoffe betrachtet werden. Die Sorptionsisotherme für Zellulose als Innendämmung wird in Abbildung 38 dargestellt und für die Auswertung der Ergebnisse herangezogen.

Im Gleichgewicht mit der Umgebungsluft findet bei einem entsprechenden Feuchtegehalt des Baustoffs kein weiterer Feuchtetransport mehr statt, was als Ausgleichsfeuchte bezeichnet wird. Messungen zur Bestimmung von Nennwerten der Ausgleichsfeuchte erfolgen üblicherweise bei einer Temperatur von 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte. Die entsprechenden Nennwerte gemäß DIN EN ISO 10456 [19] für Ausgleichsfeuchten zu Baustoffen, welche für das Forschungsprojekt relevant sind, werden in Tabelle 1 aufgeführt. [19]

Tabelle 1: Ausgleichsfeuchten von Zellulosefasern und Holzfaserdämmung [19]

	Rohdichte [kg/m ³]	$u_{23,50}$	$u_{23,80}$
lose Zellulosefasern	20 – 60	0,11	0,18
Holzfaserdämmplatte	40 – 250	0,02	0,03

Die *Wasserdampfdiffusion* durch ein Bauteil resultiert aus den unterschiedlichen Dampfdrücken auf seinen beiden Seiten, wobei Wassermoleküle durch das Material hindurchtreten. Die Geschwindigkeit dieses Vorgangs hängt von der molekularen Struktur der Baustoffebene ab. Eine Beschreibung dessen erfolgt mithilfe des Materialkennwerts der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ . Diese Zahl wird durch das Verhältnis der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten der Luft und des verwendeten Baustoffs ermittelt. Sie verdeutlicht, in welchem Maße der Wasserdampfdiffusionswiderstand des Materials größer ist als der einer vergleichbaren, stillstehenden Luftschicht gleicher Temperatur. [13]

$$\mu = \frac{\delta_0}{\delta}$$

μ Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]

δ_0 Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft $1,89 \cdot 10^{-10}$ [kg/msPa]

δ Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient des Materials [kg/msPa]

Hieraus lässt sich mit der Schichtdicke der s_d -Wert nach WTA-Merkblatt 6-8 [20] berechnen und in einen Bereich der Wasserdampfdurchlässigkeit zuordnen.

$$s_d = \mu \cdot d \quad [20]$$

s_d Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]

μ Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]

d Bauteilschichtdicke [m]

In Tabelle 2 sind die bei greenTES verwendeten Baustoffe und ihre zugehörigen s_d -Werte und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen aufgelistet.

Tabelle 2: Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m] von verwendeten Baustoffen

	Rohdichte [kg/m ³]	μ [-]	d [m]	s_d [m]
FERMACELL Gipsfaserplatte [26]	1150 ± 50	13	0,018	0,234
PFLEIDERER LivingBoard [27],[28]	660 – 700	100	0,015	1,5
KNAUF Aquapanel [29]	1150	66	0,0125	0,825
OMEGA Winddichtung [30]				0,02
ISCOCELL Zellulose [31]	28 – 65	3	0,2	0,6

Schlagregen

Ein effektiver Schutz gegen Schlagregen ist erforderlich, um erhebliche Feuchtigkeitseintrusionen in die Konstruktion durch kapillare Wasseraufnahme oder das Eindringen von Regenwasser zu verhindern. Eine erhebliche Zunahme der Baustofffeuchte kann zu Schäden an der Konstruktion führen, wie beispielsweise Holzerstörung durch Pilze oder Fäulnis sowie zur Verminderung des Wärmeschutzes. [13, 21]

Da der Schutz vor Schlagregen zu den grundlegenden Kriterien des Feuchteschutzes eines Gebäudes zählt, sind die regionale Beanspruchung in Deutschland und der bauphysikalische Nachweis für Außenwände in der DIN 4108-3 [22] festgelegt. Diese Norm unterteilt die Beanspruchung in drei Gruppen, wobei für Deutschland eine Jahresniederschlagsmenge von etwa 600 mm bis 800 mm angenommen wird. [21]

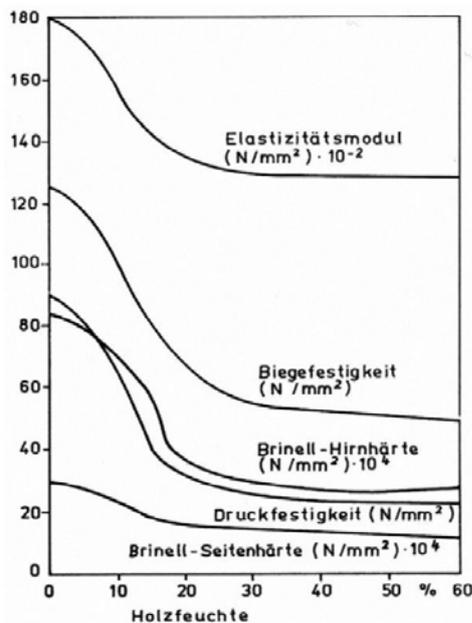
Eine mögliche Folge von Niederschlag ist die sogenannte Umkehrdiffusion. Wie im Abschnitt "Wasserdampfdiffusion" beschrieben, bewegt sich Wasserdampf normalerweise von innen nach außen. Wenn sich die Richtung aufgrund kurzfristiger Wasserdampfdruckänderungen umkehrt, spricht man von Umkehrdiffusion. Dieses Phänomen wird in der Regel durch intensive Sonneneinstrahlung nach Schlagregen ausgelöst und kann zu einer zusätzlichen Feuchtebelastung der Fassade führen. [21]

Baustoffeigenschaften Holz

Holz reagiert träge auf Veränderungen der Umgebungsfeuchte durch Diffusion. Das bedeutet, dass mehr Zeit notwendig ist, bis sich die Ausgleichsfeuchte im Inneren des Querschnitts stabilisiert, im Vergleich zur Anpassung an der Oberfläche. Diese Verzögerung führt dazu, dass sich unterschiedliche Holzfeuchten in verschiedenen Tiefen des Querschnitts einstellen. Als Folge entsteht ein Feuchtigkeitsgefälle zwischen den inneren Bereichen des Holzquerschnitts und der Oberfläche. Dieses Gefälle erzeugt Spannungen im Holz, die potenziell zu Rissen führen können. [21]

Durch seine hygroskopischen Eigenschaften, die mit einer Feuchtaufnahme und -abgabe einhergehen, zeigt Holz ein ausgeprägtes Quell- und Schwindverhalten. Dieser Prozess vollzieht sich im hygroskopischen Bereich unterhalb des Fasersättigungspunktes. Aufgrund der anisotropen Eigenschaften des Baustoffes gehen mit der Volumenveränderung Verformungen einher, deren Ausprägung von der Faserrichtung abhängig ist. Diese dynamischen Prozesse haben zudem Auswirkungen auf wichtige Materialeigenschaften von Holz, darunter Biegefestigkeit, Druckfestigkeit, Elastizität und Wärmeleitfähigkeit (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6: Einfluss der Holzfeuchte auf verschiedene Holzeigenschaften [23]



Gemäß DIN EN 1995-1-1 [24] erfolgt aufgrund der Materialeigenschaften des Holzes eine Kategorisierung in drei Nutzungsklassen (NKL). NKL 1 ist für beheizte Innenräume, NKL 2 für überdachte, offene Tragwerke und NKL 3 für Bauteile, die der Witterung ausgesetzt sind. Die DIN 68800-2 setzt entsprechende Grenzwerte für die Feuchtigkeit von Holzwerkstoffen fest, abhängig von dieser Klassifizierung. In der DIN 4108-3 [22] ist der Grenzwert für die Feuchtigkeit von Massivholz verankert. Die DIN 68800-1 [25] adressiert die Zusammenhänge zwischen Holzfeuchte, Pilzbefall und definiert die zugehörigen Grenzwerte. Das WTA-Merkblatt 6-8 [20] bietet ergänzende Richtwerte und schreibt vor, dass die Einstufung der NKL auf Grundlage des Mittelwerts der Materialfeuchte über den Materialquerschnitt erfolgt.

Tabelle 3: Feuchteschutztechnische Grenzwerte

Norm	Beschreibung	Grenzwert
DIN 4108-3 [22]	Kritische Luftfeuchte an Bauteiloberflächen	
	■ Für Tauwasserbildung	100 % r. F.
	■ Für Schimmelpilzbildung	80 % r. F.
	Holzfeuchte	≤ 20 M-%
	Im ersten Jahr nach Einbau:	
	Zul. Überschreitung von max. 3 Monaten	

Norm	Beschreibung	Grenzwert
	Kritischer Wassergehalt von Materialschichten für Frostschäden Sättigungsgrad	≤ 30 %
DIN 68800-1 [25]	Schutz vor Pilzbefall: Holzfeuchte Mittlere relative Luftfeuchte Holzerstörende Pilze	≤ 20 M-% ≤ 85 % ≤ Fasersättigung
DIN 68800-2 [26]	Holzfeuchte Holzwerkstofffeuchten NKL1 NKL2 vorübergehende Auffeuchtung für 3 Monate NKL3	≤ 20 M-% 15 M.-% 18 M.-% bis 20 M.-% 21 M.-%
WTA-Merkblatt 6-8 [20]	Holzwerkstofffeuchte NKL2 Im Tagesmittel vorübergehende Auffeuchtung für 3 Monate	≤ 18 M.-% bis 20 M.-%

Der Schutz von Holzbauteilen ist weiterhin relevant für die Vermeidung von *holzerstörenden Pilzen*, welche ab dem Punkt der Fasersättigung auftreten und *Holzfäule* verursachen. Hierdurch werden die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Konstruktion beeinträchtigt. [25] Die in DIN 68800-1 festgelegten Grenzwerte geben feuchtetechnische Kennwerte an, um mikrobiellen Bewuchs holzerstörender Pilze zu verhindern [27]. Für die greenTES-Elemente sind als relevanten Holzarten für die Holztafelkonstruktion vor allem Nadelhölzer insbesondere Fichte zu nennen. Die Fasersättigung tritt hier bei etwa 30 % ein. Die Vermehrung holzerstörender Pilze beginnt ab einer Holzfeuchte von 20 % bzw. einer relativen Luftfeuchte zwischen 95 % und 97 % und dadurch den Baustoff zu zersetzen [28, 29]. Zur sicheren Vermeidung von holzerstörenden Pilzen wird nach DIN 68800-1:2019 [25] eine Holzfeuchte von maximal 20 % festgelegt. [25]

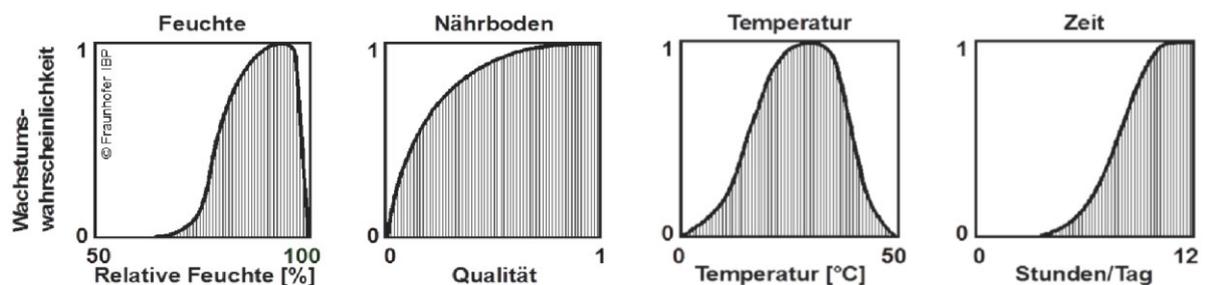
Weiterhin werden analog zur DIN 68800-2:2022 [26] Dämmstoffe innerhalb des Bauteils – hier Gefachdämmung der Holztafelwände – so einzubauen, dass sie die angrenzenden Holzbauteile nicht einer Feuchteerhöhung aussetzen. Weiterhin muss Tauwasserausbildung aus Wasserdampfdiffusion oder -konvektion verhindert werden. [26]

Schimmel ist entgegen der holzerstörenden ein holzverfärbender Pilz und wirkt sich nicht auf die Festigkeit des Holzes aus. [25] Dennoch können, neben potenziellen Gesundheitsrisiken bei hoher Sporenkonzentration, auch ästhetische Beeinträchtigungen und Geruchsbelästigungen auftreten. [25] Durch das WTA-Merkblatt 6-8 [20] eine Aussage zur Bildungswahrscheinlichkeit von Schimmel, Algen sowie holzerstörenden Pilzen im Bauteil getroffen werden.

Schimmelpilzbildung

Insbesondere in Innenräumen, an Wandoberflächen und auf der Raumseite der Dämmebene ist es entscheidend, das Wachstum von Schimmelpilzen zu unterbinden. Die Hauptursachen für Schimmelpilzbildung in Gebäuden sind Feuchteproduktion in Innenräumen, Tauwasserbildung, unzureichende Beheizung und Lüftung, Schlagregen sowie Baufeuchte in der Konstruktion. Für Innenräume wird die Bildung von Schimmel an Bauteiloberflächen über die DIN 4108 [22, 30] geregelt. In Abbildung 7 ist die Wachstumswahrscheinlichkeit von Schimmelpilzen abhängig der vier Indikatoren Feuchte, Nährboden, Temperatur und Zeit [31] angegeben. Als weitere Faktoren für die Wahrscheinlichkeit der Schimmelpilzbildung sind der pH-Wert sowie die Oberflächenbeschaffenheit nach DIN/TS 4108-8:2022 [32] zu nennen. Liegt die relative Luftfeuchte auf der Bauteiloberfläche an fünf aufeinanderfolgenden Tagen bei mehr als 80 %, ist von einer Schimmelpilzbildung auszugehen. [32] Da der Grenzwert an der Innenseite der Raumoberfläche bewertet wird, spielt dieser für die folgende Bewertung keine direkte Rolle, sollte aber zur vollständigen Bewertung auf Gebäudeebene bekannt sein. Wichtig für die nachfolgende Bewertung ist die Betrachtung der Schimmelbildung auf Bauteilebene.

Abbildung 7: Indikatoren für Schimmelpilzwachstum [31]



Hierzu werden für die Abschätzung des Schimmelwachstumsrisikos LIM-Kurven (Lowest Isoleth for Mold) verwendet. Abgeleitet werden die LIM-Kurven von den unteren Keimungsisoplethen. [31] Diese wurden 1982 beispielhaft nach [33] an der Spore *Aspergillus restrictus* untersucht. In Abbildung 8 ist die Keimungszeit (links) und die Wachstumsrate (rechts) in Abhängigkeit von relativer Feuchte und Temperatur dargestellt. Die Isolethen der Keimungszeit werden in Tagen angegeben, wobei die Äußerste den Bereich abgrenzt, ab welchem eine Keimung der Sporen stattfinden kann. Im Bereich um diese, können keine Pilze entstehen. Auf Basis der für Baustoffe relevanten Schimmelpilzarten wurden die Keimungsisoplethen als LIM-Kurven zusammengefasst. Diese Kurven, welche in Abbildung 9 dargestellt sind, beschreiben demnach die Auskeimungsgrenze in Abhängigkeit von relativer Feuchte und Temperatur für die drei baustoffrelevanten Substratgruppen.

Abbildung 8: Temperatur- und Feuchtediagramme zur Keimungs- und Wachstumsrate am Beispiel des *Aspergillus restrictus* nach [33]

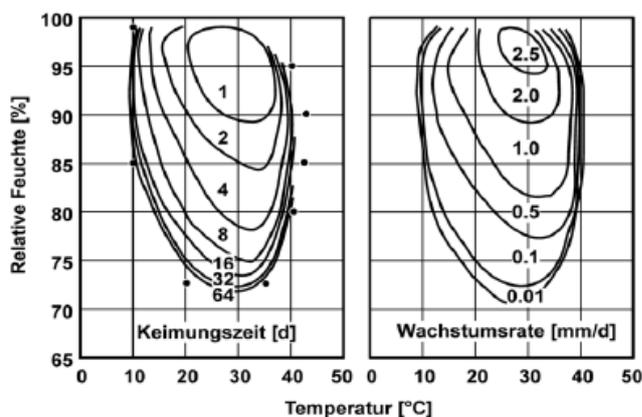
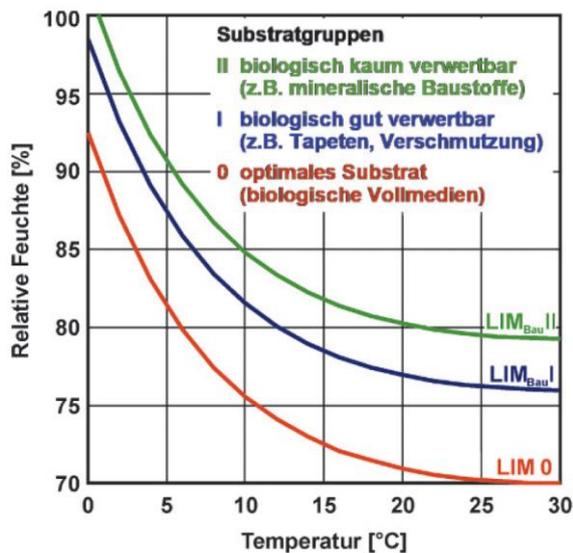


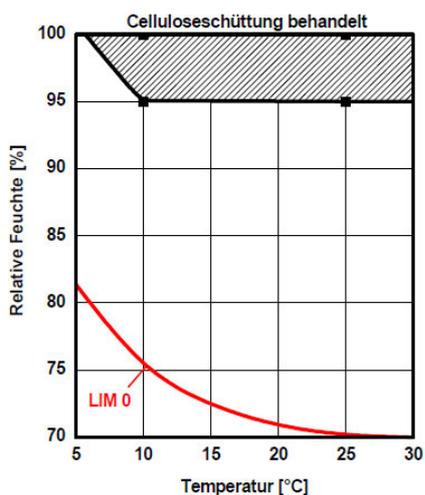
Abbildung 9: Schimmelsporenauskeimen je nach Substratart anhand der Grenzkurven [22]



Unterhalb der Kurve LIM 0 ist das Wachstum bautechnisch relevanter Schimmelpilze nicht möglich. Holz und Holzwerkstoffe gehören zur Substratgruppe I, sind biologisch gut verwertbare Baustoffe und somit eine potenzielle Nährstoffquelle für Schimmelpilze.

Neben dem Baustoff Holz ist für die Bewertung der greenTES-Elemente die Einordnung der Zellulosedämmung erforderlich. Dazu wurde auf Basis von [34] die LIM-Kurve für lose Zellulose ermittelt. Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, liegt die Schimmelsporenauskeimung dieser über der für biologisch kaum verwertbare Stoffe und weist hierdurch eine hohe Schadenstoleranz gegenüber Feuchte auf.

Abbildung 10: LIM-Kurve von Zelluloseschüttung behandelt [34] (Hier ist der Versatz des Diagrammnullpunktes im Vergleich zu Abbildung 9 zu berücksichtigen.)



Wärmeschutz im Holzbau

Bei den Mindestanforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden wird nach der Norm DIN 4108-2 [35] zwischen sommerlichem und winterlichem Wärmeschutz unterschieden. Im Winter soll die Wärme im Gebäudeinneren gehalten werden und nicht durch unzureichende Dämmung oder Wärmebrücken entweichen, was neben einem Komfortverlust auch höhere Heizkosten nach sich zieht. Zudem besteht die

Gefahr eines Tauwasserausfalls, wenn die Taupunkttemperatur an der Wandoberfläche erreicht wird. Im Sommer sind die klimatischen Bedingungen umgekehrt, weshalb es hier gilt, das Eindringen von Wärme in das Gebäude zu verhindern.

Dabei sind die folgenden Parameter und Kennwerte relevant:

- Spezifische Wärmekapazität: Energiemenge, die benötigt wird, um ein Material mit der Masse von 1 kg um 1 K zu erwärmen und ist insbesondere für den sommerlichen Wärmeschutz von Bedeutung. [36] In Tabelle 4 ist eine Zusammenstellung der Werte für die im Rahmen des greenTES Projektes verwendeten Baustoffe zu finden.

Tabelle 4 Spezifische Wärmekapazität der Baustoffe der greenTES-Konstruktionen

	c [J/kgK]
FERMACELL Gipsfaserplatte [37]	1100
PFLEIDERER LivingBoard [38]	1700
Holz [39]	1600
ISCOCELL Zellulose [40]	2110

- Wärmeleitfähigkeit: die Wärmemenge, die bei einer konstanten Temperaturdifferenz von 1 K und einer Dicke von 1 m Baustoff innerhalb einer Stunde durch eine Fläche von 1 m² übertragen wird. Dieser Wert ist abhängig von der Rohdichte, der Temperatur, dem Feuchtegehalt und vom atmosphärischen Druck der Poren eines Baustoffs. Durch eine Erhöhung der Feuchtigkeit in Dämmmaterialien steigt auch die Wärmeleitfähigkeit. Die Werte der im Forschungsprojekt verwendeten Baustoffe sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe der greenTES-Konstruktionen

	λ [W/mK]
FERMACELL Gipsfaserplatte [37]	0,32
PFLEIDERER LivingBoard [38]	0,12
Holz [39]	0,12
ISCOCELL Zellulose [40]	0,039

- Wärmeübergangswiderstand: Kennwert bei der Wärmeübertragung aus der Umgebung an eine Oberfläche. Es handelt sich dabei um den Widerstand, den die Grenzschicht dem Wärmestrom entgegensetzt. Der Wert ist definiert als Kehrwert des Wärmeübergangskoeffizienten. Dieser setzt sich zusammen aus den beiden Komponenten Strahlung und Konvektion.

- **Wärmedurchlasswiderstand:** Der Widerstand, den ein homogenes Bauteil einem definierten Wärmestrom entgegensetzt. Der Wärmedurchlasswiderstand ist daher besonders für den winterlichen Wärmeschutz von Bedeutung.
- **Wärmedurchgangswiderstand:** ergibt sich aus der Summe der Wärmedurchlasswiderstände und der Wärmeübergangswiderstände. Er bezeichnet den Gesamtwiderstand der Wärmewanderung durch ein Bauteil und wird häufig für die Bewertung der gesamten Konstruktion herangezogen.
- **Wärmedurchgangskoeffizient, auch U-Wert genannt,** ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes. Er gibt die Wärmemenge an, die pro Zeiteinheit durch eine Bauteilfläche von 1 m² bei einem Temperaturunterschied von 1 K hindurchgeht. Der U-Wert wird als Maß für den Wärmeverlust eines Gebäudes bzw. einer Fassade verwendet.
- **Luftdichtheit:** Dichtheit einer Gebäudehülle gegen Wärmetransport durch Konvektion bezeichnet. Sie hat Auswirkungen auf den sommerlichen sowie winterlichen Wärmeschutz eines Gebäudes und kann zusätzlich zu einer Erhöhung der Feuchtebelastung in der Konstruktion führen.
- **Luftwechselrate:** die Menge an Luft, gemessen als Volumenstrom, die zwischen Innen- und Außenraum innerhalb einer Stunde ausgetauscht wird.

Die Mindestanforderungen an den Wärmeschutz in Gebäuden sind in der DIN 4108-2 [35] beschrieben. Dort sind Mindestwerte für Wärmedurchlasswiderstände für verschiedene Bauteilkonstruktionen von Neubauten angegeben. Im GEG aus dem Jahr 2020 sind die Grenzwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten aufgeführt [41]. Die Werte aus beiden Richtlinien sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6 Wärmeschutztechnische Grenzwerte für Gebäude

Norm	Beschreibung	Grenzwert
DIN 4108-2 [35]	Mindestwerte für Wärmedurchlasswiderstände R	
	Außenwände beheizter Räume	1,2 m ² K/W
	Bauteile mit einer flächenbezogenen Masse $m' < 100 \text{ kg/m}^2$	1,75 m ² K/W
	Inhomogene nichttransparente Bauteile	1,75 m ² K/W
	Das gesamte Bauteil im Mittel	1,0 m ² K/W
GEG 2020 [41]	Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten für Außenwände bestehender Gebäude	
	U-Wert Wohngebäude	0,24 W/m ² K
	U-Wert Nichtwohngebäude	0,35 W/m ² K

Hygrothermische Messmethoden

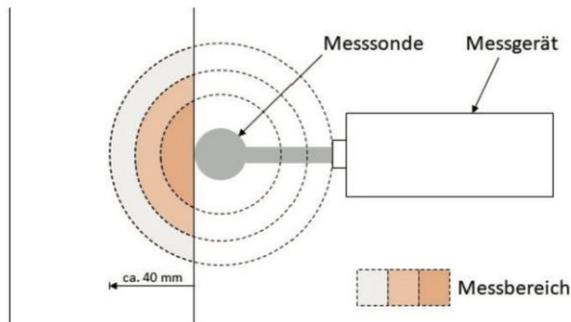
Um das hygrothermische Bauteilverhalten zu bestimmen, müssen die Feuchtigkeit und Temperatur des Materials gemessen werden. Daraus kann die Taupunkttemperatur und die Feuchte der einzelnen Bauteilschichten ermittelt werden. Es gibt verschiedene hygrothermische Messmethoden, die in verschiedenen Anwendungsfeldern eingesetzt werden. Für die Messungen am Mock-Up sollen indirekte, zerstörungsfreie Methoden angewandt werden. Dabei ist keine Probeentnahme notwendig.

Indirekte Messmethoden sind:

- die kapazitative oder auch dielektrische Methode,
- die Mikrowellenmethode,
- das hygroskopische oder
- das elektrische Widerstandverfahren.

Die kapazitive Methode, auch als dielektrische Methode bezeichnet, beruht auf dem Prinzip, dass die Feuchtigkeit die Dielektrizitätskonstante des Materials beeinflusst, was wiederum die Kapazität eines kapazitiven Sensors modifiziert. In Abbildung 11 wird die kapazitive Methode/dielektrische Methode illustriert.

Abbildung 11: Kapazitative Methode/ dielektrische Methode [42]

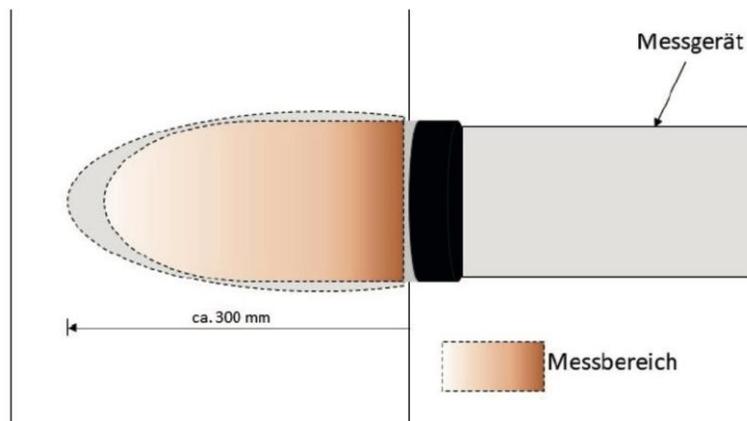


Der kapazitive Sensor besteht aus zwei leitenden Platten oder Elektroden, die durch ein Dielektrikum präzise voneinander separiert sind. Zur Durchführung der Messung wird der Sensor mit der Oberfläche des Bauteils in Kontakt gebracht. Veränderungen in der Feuchtigkeitsumgebung bewirken, dass das Dielektrikum Feuchtigkeit absorbiert und somit seine Dielektrizitätskonstante modifiziert. Dies führt zu einer messbaren Veränderung der Kapazität des Sensors. Die Menge an Feuchtigkeit im Material wird durch die exakte Messung dieser Kapazitätsänderung ermittelt. Diese Messung kann sowohl direkt durch die Erfassung der Kapazität erfolgen als auch mittels eines speziellen Feuchtigkeitsmessgeräts, welches die Kapazitätsveränderung in Feuchtigkeitswerte umrechnet. [43]

Im Falle eines kugelförmigen Sensors erstreckt sich der Messbereich für Hartholz von 0 bis 37 %, während bei Weichholz sogar bis zu 50 % messbar sind. Die Messtiefe beträgt dabei präzise 40 mm unterhalb der glatten Oberfläche. Durch die sequenzielle Erzeugung von elektrischen Feldern unterschiedlicher Intensität und die Erforschung unterschiedlicher Tiefen in Abhängigkeit des Elektrodenabstands können verschiedenartige Bereiche analysiert werden. Hierbei breitet sich das elektrische Feld umso tiefer aus, je größer der Abstand ist. Diese Methode ist standardisiert und universell anwendbar für Monitoringkonzepte, jedoch aufgrund von Limitationen in der Messtiefe eingeschränkt. Die kapazitive Methode zeichnet sich durch ihre Nichtinvasivität aus und hinterlässt keinerlei Beschädigungen, selbst nach dem Rückbau der durchgeführten Messungen. [43]

Die Mikrowellenmethode zur Feuchtigkeitsmessung nutzt die Wechselwirkung von Mikrowellenstrahlung mit Feuchtigkeit. Hierbei werden Mikrowellenimpulse durch das zu messende Material gesendet. Die reflektierte Mikrowellenenergie wird gemessen, um auf den Feuchtigkeitsgehalt im Material zu schließen (vgl. Abbildung 12). [44, 45]

Abbildung 12: Mikrowellenmethode [42]

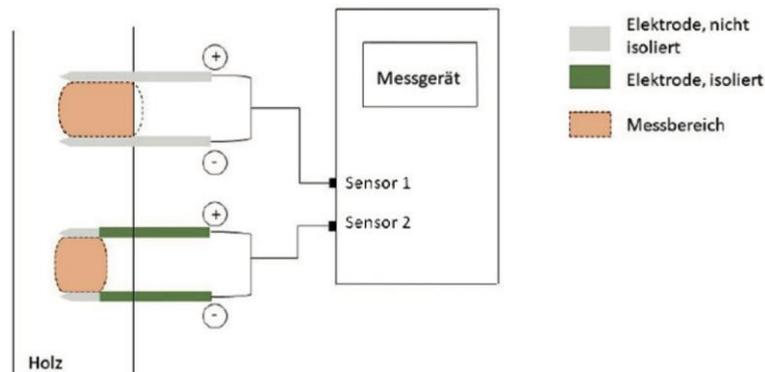


Diese Methode eignet sich auch für Messungen in Bestandsbauwerken mit erhöhten Versalzungsgraden und liefert präzise Ergebnisse ($\pm 0,5\%$) bei Messtiefen von 50-300 mm und einem Feuchtegehalt $< 30\%$. Die optimalen Frequenzen liegen im Bereich von 7-12 GHz. Die Grundlage der Mikrowellenmethode liegt darin, dass Wassermoleküle im Gegensatz zu Holz eine hohe Absorption von Mikrowellenstrahlung aufweisen. Beim Auftreffen von Mikrowellen auf feuchtes Material dringen sie ein, und die Wassermoleküle absorbieren einen Teil der Energie. Die reflektierte Mikrowellenenergie ist abhängig von der Feuchtigkeitsmenge im Material. Eine höhere Feuchtigkeit führt zu einer höheren Absorption und damit zu einer geringeren reflektierten Energie. Es gibt verschiedene Arten von Mikrowellenfeuchtigkeitsensoren, die für unterschiedliche Anwendungen entwickelt wurden. Einige verwenden kontinuierliche Mikrowellenstrahlung, während andere gepulste oder modulierte Mikrowellenimpulse einsetzen. Die reflektierte Energie wird entweder direkt gemessen oder mittels Phasenverschiebungen oder Interferenzen analysiert, um auf die Feuchtigkeit im Material zu schließen. Alternativ kann der Brechungsindex als messbarer Parameter für die Feuchtigkeitsbestimmung verwendet werden, wobei eine Metallplatte hinter der Probe erforderlich ist. Die Mikrowellenmethode bietet Vorteile wie schnelle Messgeschwindigkeit, die Fähigkeit zur Feuchtigkeitsmessung in undurchsichtigen Materialien sowie Unempfindlichkeit gegenüber Temperatur- und Druckänderungen. Sie findet Anwendung in verschiedenen Bereichen wie der Lebensmittelindustrie, Baustoffindustrie und Landwirtschaft. Die Kosten für Messgeräte sind jedoch höher im Vergleich zu alternativen Messmethoden. [44, 45]

Die hygroscopische Methode, auch als Gleichgewichtsfeuchte-Methode bekannt, beruht auf der Fähigkeit von Materialien, Feuchtigkeit aus der umgebenden Luft aufzunehmen oder abzugeben, bis ein Gleichgewichtszustand unter spezifischen Temperatur- und relativen Luftfeuchtigkeitsbedingungen erreicht ist (% rF oder g/m^3). Die grafische Darstellung dieser Wechselwirkung zwischen der Gleichgewichtsfeuchte eines Materials und der relativen Luftfeuchtigkeit bei konstanter Temperatur erfolgt durch die Sorptionsisotherme, welche sowohl Sorptionskurven für steigende als auch Desorptionskurven für fallende relative Luftfeuchten einschließt.

Das Verfahren zur Bestimmung von Feuchtigkeit durch elektrischen Widerstand nutzt die Messung des elektrischen Widerstands in einem Material. Es beruht auf der Tatsache, dass die elektrische Leitfähigkeit eines Materials von der darin enthaltenen Feuchtigkeitsmenge beeinflusst wird. [46, 47]

Abbildung 13 Elektrisches Widerstandsverfahren [42]



Das Verfahren verwendet elektrische Sensoren, die in das zu messende Material eingeführt werden. Diese Sensoren bestehen aus leitfähigen Materialien wie Metall oder Halbleitern und eignen sich für einen Feuchtegehalt 7 % - 30 %. Abbildung 13 veranschaulicht das elektrische Widerstandsverfahren. [47, 48]

Die Feuchtigkeit im Material beeinflusst den Widerstand des Sensors oder zwischen zwei mind. 30 mm entfernten Messpunkten. Je höher der Feuchtegehalt, desto niedriger ist der Widerstand. Durch die Messung des Widerstands kann die Feuchtigkeitsmenge im Material bestimmt werden. Dies kann entweder durch direkte Messung des Widerstands oder durch den Einsatz eines Feuchtigkeitsmessgeräts erfolgen, das den Widerstand in Feuchtegehaltswerte umrechnet und als Referenz zur Kalibrierung dient. Um einen Feuchtegradienten zu ermitteln, können unterschiedlich tief eingebrachte Elektroden in einem Abstand von 30mm zueinander in Holzbauteile eingebracht werden. Die Orientierung senkrecht zur Maserung reduziert Messwertchwankungen. Im Falle von Brettschichtholzproben sollten die Elektroden in der gleichen Lamelle angebracht werden. [47, 48]

Es eignen sich Bürstensonnen in vorgebohrten Löchern (Beton, Mauerwerk), Einschlagsonden (mit Hammerschlägen in Holz eingetrieben) oder Nadelspitzen (ingedrückt in Putz). Professionelle Feuchtigkeitsmessgeräte ermöglichen eine direkte Kalibrierung nach vorheriger Bestimmung der Oberflächentemperatur des Holzbauteils, z.B. durch berührungslose Infrarot-Temperaturmessgeräte. Unterschiedliche Materialien liefern verschiedene Ergebnisse, da sie sich abhängig von ihrer Dichte in ihren elektrischen Widerständen unterscheiden. Bei gebohrten Lochern muss ein Ausgleich der durch die Bohrung entstandenen Trocknung abgewartet werden, bevor Sensoren zuverlässige Ergebnisse liefern. Das Verfahren eignet sich für Langzeitmessungen, ist genormt und damit allgemein für Überwachungskonzepte anwendbar. [42, 46]

Mit der elektrischen Widerstandsmethode und dem hygroskopischen Verfahren sind nicht nur Langzeitmessungen möglich, sondern auch Feuchtegradienten gut darstellbar. Weiterhin kann mit der elektrischen Widerstandsmethode ein Feuchtegehalt von 7 – 30 % mit einer Genauigkeit von $\pm 1,0\%$ betrachtet werden. Das System bis zum Datenlogger ist auf Störquellen als empfindlich einzustufen. Messungen in der Dämmebene sind nicht möglich, da ein direkter ununterbrochener Kontakt zum Baustoff notwendig ist. Notwendig sind hier eine Kalibrierkurve sowie das Durchführen eine Temperaturkompensation. Das hygroskopische Verfahren kann hingegen in der Dämmebene positioniert werden, der Messbereich muss jedoch luftdicht umschlossen sein. [49]

Hygrothermische Simulation

Dynamische hygrisch-thermische Vorgänge in einem Bauteil können anhand computergestützter Modellierung, zum Beispiel mit Hilfe der Software WUFI (**W**ärme **u**nd **F**euchte **I**nstationär), abgebildet werden. WUFI (Wärme und Feuchte instationär) ist eine Simulationssoftware, die anhand eines numerischen Berechnungsverfahrens instationäre Wärme- und Feuchtefelder über einen Bauteilquerschnitt berechnet. Die kontinuierlichen Größen Temperatur und relative Feuchte werden anhand von Gitterelementen diskretisiert.

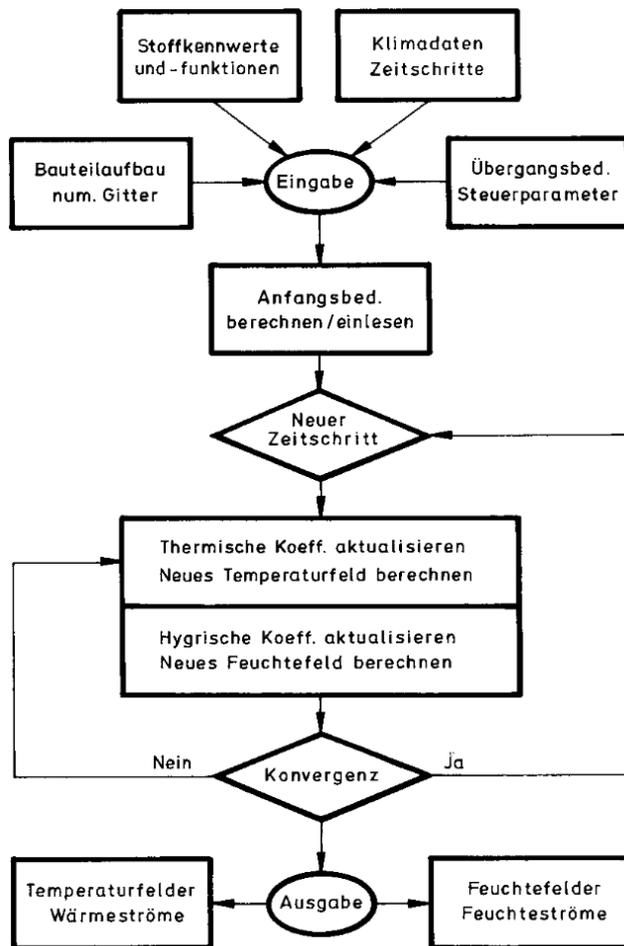
Dabei werden Bauteile eindimensional von innen nach außen betrachtet [50]. Die Grundlage für die Berechnung ist der gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport und kann in [50] nachvollzogen werden.

Zu den Eingabeparametern für die Simulationen gehört der Konstruktionsaufbau mit den materialspezifischen Parametern. Außerdem werden die Anfangsbedingungen (AB) für Wassergehalt und Temperatur im Bauteil oder in den Bauteilschichten und die Randbedingungen (RB) benötigt. Die Randbedingungen werden durch das Innen- und Außenklima gegeben. Auf welche Art und Weise das Klima das Bauteil beeinflusst, hängt mit den Bedingungen für den Oberflächenübergang zusammen, die ebenfalls zu den Eingabeparametern gehören. Die DIN EN 15026 [21] gibt allgemeine Verfahrensweisen und Parameter vor, die bei einer numerischen Simulation in Bezug auf die Eingabeparameter zu beachten sind [51].

Zusätzlich können in WUFI Wärme- und Feuchtequellen definiert werden. Die Implementierung der Wärme- und Feuchtequellen in einzelnen Schichten einer Konstruktion dient einerseits der korrekten Darstellung bestimmter Aufbauten, wie z.B. die Integration einer Wandheizung als Wärmequelle [52]. Andererseits werden somit Belastungsproben der Fassade für verschiedene Szenarien durchgeführt. Diese Szenarien sind in diversen technischen Regelwerken und Normen festgelegt [53–56]. Darin werden Wärme- und Feuchtequellen an bestimmten Positionen in der Fassade angesetzt, um so zu testen, ob es zu kritischen Tauwassermengen in der Konstruktion kommt.

Anhand der eingegebenen Informationen zum Simulationsmodell wird ein Temperaturfeld und ein Feuchtefeld über die diskrete Gitterstruktur für einen Zeitschritt berechnet. Konvergiert das Feuchtefeld in diesem Zeitschritt, so wird ein neuer Rechenschritt ausgeführt. Konvergiert es nicht, werden die thermischen Koeffizienten aktualisiert und der Rechenschritt wird wiederholt. In Abbildung 14 ist das Prinzip des Rechenverfahrens in WUFI abgebildet [50].

Abbildung 14 Ablaufschema des Berechnungsverfahrens, das der Software WUFI zugrunde liegt, aus [50].



WUFI hat Grenzen und Limitationen. In [52] werden Transportphänomene genannt, die in nur teilweise in WUFI repräsentiert werden, oder Koeffizienten und Widerstände, die vereinfacht werden. Dazu gehören:

- Aufnahme von drückendem Grundwasser
- Einflüsse von Salztransport
- Schichtgrenzen zwischen kapillar leitenden Material (z.B. Putz auf Ziegel)
- große Abweichungen der Materialkennwerte durch Feuchteinfluss
- ausgeprägte Hysterese
- Enthalpieströme durch den Transport von flüssigem Wasser
- konstanter Wärmeübergangskoeffizient

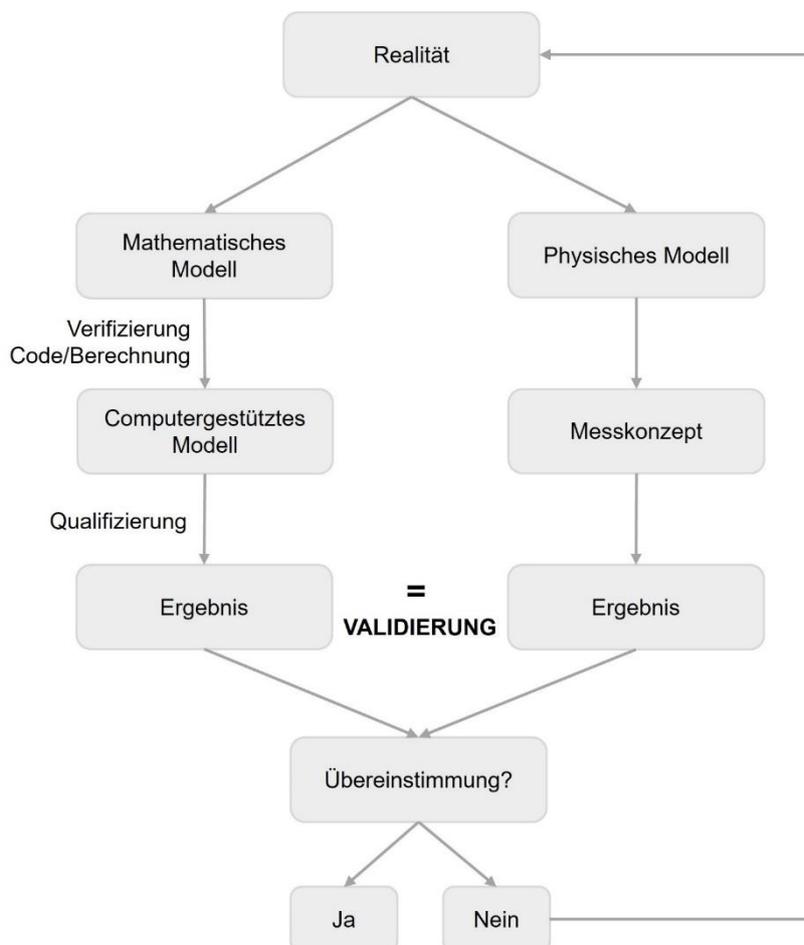
Grundlagen der Validierung

Die Validierung ist ein Prozess, der innerhalb der Modellentwicklung von Relevanz ist. Sie ist ein Werkzeug, mit dem die Glaubwürdigkeit oder die Mächtigkeit von Modellen in Bezug auf dessen Zweck bewertet wird [57].

Um zu verstehen, was validiert werden muss und auf welche Art und Weise, muss das Modell und der Modellzweck untersucht werden. Ein wissenschaftliches Modell beschreibt ein System oder einen Prozess mit

einem physikalischen Zusammenhang. Diese werden beobachtet oder experimentell ermittelt und durch ein mathematisches Modell beschrieben. Dies geht mit Vereinfachungen und Annahmen einher [58]. Die Modellentwicklung ist ein zyklischer Prozess und wird in Abbildung 15 dargestellt: Zunächst wird eine Theorie aus der Realität abgeleitet. Das Verhalten wird in ein mathematisches Modell übersetzt, abstrahiert und vereinfacht. Ein Computerprogramm simuliert dieses Szenario mit spezifischen Rand- und Anfangsbedingungen [59]. Die Ergebnisse werden interpretiert und es werden Erkenntnisse daraus gezogen [57]. Parallel wird ein Prototyp entwickelt, um Datenlücken zu schließen, Fehler zu erkennen, die Konstruktion zu verbessern und das Modell zu validieren. Die Ergebnisse müssen eine bestimmte Übereinstimmungsquote erfüllen, damit das Modell als validiert gilt [58].

Abbildung 15 Prozess der Modellentwicklung nach [59]



Die Elemente der Validierung werden aus [57, 60, 61] wie folgt extrahiert:

- Die Validierung ist ein Prozess.
- Die Validierung bewertet ein Modell.
- Die Validierung vergleicht das Modell mit der realen Welt.
- Die Validierung hat den Verwendungszweck des Modells als Maßstab.

Im Zuge einer Validierung werden verschiedene Methoden der deskriptiven Statistik angewandt. Die deskriptive Statistik ist ein Werkzeug, um Daten anhand von statistischen Kennzahlen zu beschreiben und zu vergleichen. Sie analysiert vorliegende Daten und interpretiert sie. Dadurch können Muster, Trends und

Verteilungen identifiziert werden [62]. Die folgenden Kennzahlen der deskriptiven Statistik werden bei der Modellvalidierung im Rahmen des greenTES Forschungsprojekts herangezogen:

- Mittelwert (MW): beschreibt das arithmetische Mittel aus allen Werten [62]
- Standardabweichung (SD): beschreibt die Streuung der Daten um den Mittelwert [62]
- Quartile (Q) oder Perzentile: geben Informationen über die Verteilung der Daten, also über den Streuungsbereich. Das erste Quartil, 25 % Perzentil, oder auch Q25, gibt den Wert an, unter dem 25 % der Daten des Datensatzes liegen. Es können beliebige Perzentile gewählt werden [63]
- Bestimmtheitsmaß R^2 : bestimmt den Anteil an Abweichungen und ist ein Fehlerindikator zwischen zwei Datensätzen. Dieser Faktor nimmt einen Wert zwischen null und eins an. Je näher der Wert an eins liegt, desto besser korrelieren die Daten miteinander und desto geringer ist die Menge an Abweichungen voneinander [63]

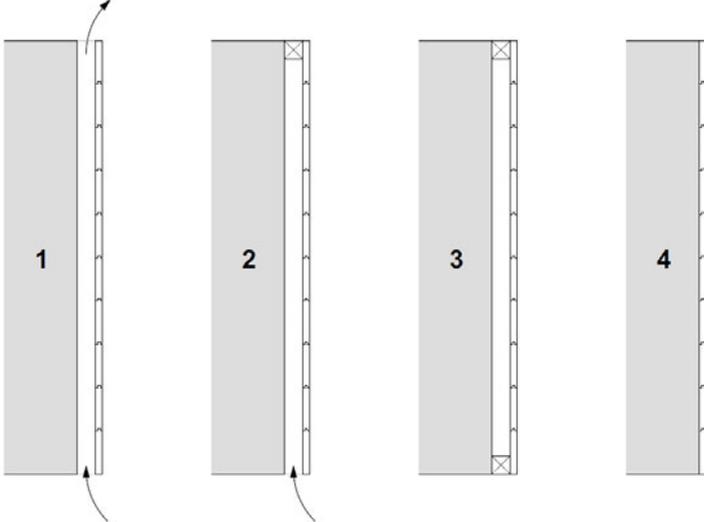
Brandschutz: Bauordnungsrechtliche Anforderungen

Definitionen und Begriffsbestimmungen

Zur Feststellung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen an die greenTES-Elemente werden im Folgenden die notwendigen Definitionen und Begriffsbestimmungen in Tabelle 7 festgelegt.

Tabelle 7: Begriffsbestimmungen

Begriff	Begriffsbestimmung
Außenwand	Die Außenwand umschließt den Innenraum eines Gebäudes und trennt ihn von der Außenluft ab. Dementsprechend können bauordnungsrechtlich in Abhängigkeit der Gebäudeklasse und der Materialität raumabschließende Anforderungen gestellt werden.
Nichttragende Außenwände	Nach MVV TB (A 2.1.5) sind nichttragende Außenwände Bauteile, die außer dem Eigengewicht keine Vertikallasten abtragen und nur für die Aufnahme der Eigengewichts- und Windlasten bemessen sind. Die Anforderungen an nichttragende Außenwände können in brandschutztechnischer Hinsicht regelmäßig von denen der tragenden Außenwände abweichen.
Fassade bzw. Bekleidung der Außenwand	Die Bekleidung der Außenwand (Fassade) als sichtbares Element wird direkt oder mittels einer Unterkonstruktion auf der Außenwand befestigt. Für die Außenwandbekleidung kann eine offene, geschlossene oder überdeckte Fugenausführung gewählt werden.
Ausführung von Hinterlüftungen	Die Außenwandbekleidung kann folgendermaßen auf die Außenwand aufgebracht werden: <ul style="list-style-type: none"> a) nicht hinter-/belüftete Bekleidung ohne ruhende Luftschicht b) nicht hinter-/belüftete Bekleidung mit ruhender Luftschicht c) mit Belüftung d) mit Hinterlüftung

Begriff	Begriffsbestimmung
	 <p data-bbox="1174 454 1455 719"> 1 hinterlüftete Bekleidung 2 belüftete Bekleidung 3 nicht hinterlüftete Bekleidung mit Luftschicht 4 nicht hinterlüftete Bekleidung ohne Luftschicht </p> <p data-bbox="392 891 1390 918">Abbildung X Übersicht der verschiedenen konstruktiven Ausführungen von Holzfassaden [64]</p> <p data-bbox="392 992 1461 1055">Die Wahl der Hinterlüftungsebene ergibt sich dabei aus den bauphysikalischen Anforderungen an den Witterungs- und Feuchteschutz in Verbindung mit der Art der Fassadenbekleidung.</p> <p data-bbox="392 1077 1461 1245">Brandschutztechnisch stellt eine hinterlüftete Außenwandbekleidung aus brennbaren Baustoffen das größte Brandausbreitungsrisiko dar. Aus diesem Grund werden mit zunehmenden Risikofaktoren (Be-/Hinterlüftung; Fugenausbildung etc.) weitere konstruktive Maßnahmen wie die Anordnung horizontaler Brandsperren, die Begrenzung der Tiefe des Hinterlüftungsspalt es oder die Unterbrechung der Hinterlüftung notwendig.</p>

Baurechtliche Anforderungen an Außenwände, Außenwandbekleidungen und Außenwandsysteme

Vorbemerkungen

In den nachfolgenden Absätzen wird exemplarisch auf die Musterbauordnung (MBO), 2022 [65] verwiesen. Die einzelnen 16 Landesbauordnungen enthalten weitgehend sinngemäße Anforderungen. Sofern vorhanden werden Besonderheiten bzw. für das Projekt grundlegende Abweichungen aus den Landesbauordnungen aufgeführt.

Allgemeingültige Begriffe und Anwendungsbereiche

Die Bauordnung gilt gemäß Anwendungsbereich (§ 1 MBO [65]) für bauliche Anlagen und Bauprodukte, sowie andere Anlagen und Einrichtungen, an die in diesem Gesetz oder in Vorschriften auf Grund dieses Gesetzes Anforderungen gestellt werden. [65]

Bauliche Anlagen sind nach § 2 Abs. 1 Satz 1 MBO [65] mit dem Erdboden verbundene, aus Bauprodukten hergestellte Anlagen. Bei Bauprodukten handelt es sich um Erzeugnisse, die hergestellt werden. Weiter besteht der Herstellungs- und Verwendungszweck der Bauprodukte im Einbau in bauliche Anlagen oder in der Verwendung als bauliche Anlage [66]. Bauprodukte sind somit nach § 2 Abs. 9 MBO [65] Produkte, Baustoffe, Bauteile, Anlagen und Bausätze, die hergestellt werden, um dauerhaft in bauliche Anlagen eingebaut zu werden, bzw. aus ihnen vorgefertigte Anlagen, die hergestellt werden, um mit dem Erdboden verbunden zu werden [65].

Andere Anlagen und Einrichtungen sind solche, die nicht unter den Begriff der baulichen Anlagen und Bauprodukte fallen. Diese in diesem Sinn sind z. B. Bäume oder auch die Begrünung baulicher Anlagen (§ 86 MBO [65]).

Bauordnungsrechtliche Einstufung von Photovoltaikmodulen

Solaranlagen sind entsprechend obenstehenden Definitionen als Bauprodukte einzustufen und Teil einer baulichen Anlage, an welche bauordnungsrechtliche Anforderungen gestellt werden. Unter dem übergeordneten Begriff „Solaranlagen“ werden Solarenergieanlagen (Solarstromanlagen/Photovoltaikanlagen) zur Stromgewinnung und solarthermische Anlagen (Sonnenkollektoren) zur Wärmeabgewinnung verstanden.

Je nach Lage der Module am Gebäude sind die entsprechenden Anforderungen zu beachten.

Bei Anordnung auf dem Dach (d.h. oberhalb der Dachhaut) geltend die Anforderungen des § 32 (5) MBO. Bei Integration in die Dachhaut gelten die Anforderungen an diese selbst (§ 32 (1), (2) MBO).

Für die vertikale Anordnung von Solaranlagen auf bzw. als Außenwandbekleidungen werden in § 28 MBO weitergehende Anforderungen gestellt, diese gelten nur für Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 (§ 28 (5) MBO).

Solaranlagen, welche mehr als zwei Geschosse überbrücken, müssen schwerentflammbar sein (§ 28 (3) Satz 2 MBO) und dürfen nicht brennend abfallen oder abtropfen (§ 28 (3) Satz 3 MBO). Für die schwerentflammbaren PV-Module sind die konstruktiven Maßnahmen nach Anhang 6 MVV TB anzuwenden, hier werden Anforderungen an die Tiefe des Hinterlüftungsspalt, das Baustoffverhalten sowie konstruktive Maßnahmen im Geschosstoß gestellt. Eine Differenzierung, ob ein Modul in die Außenwandbekleidung integriert oder vor dieser angeordnet ist, wird innerhalb der MBO bzw. entsprechender Baurechtskommentare nicht vorgenommen.

Für Photovoltaik-Module aus normalentflammbaren Baustoffen ergeben sich (außer bei Anwendung in den Gebäudeklassen 1 bis 3 oder über nicht mehr als zwei Geschosse) nach derzeitigem Stand des Bauordnungsrechts keine Rechtsgrundlagen bzw. technischen Regeln, die eine uneingeschränkte Anwendung als Außenwandbekleidung zulassen. Mangels technischer Regeln und zugelassenen Bauarten kommt für eine Anwendung bzw. den Nachweis nur eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) nach § 16a (2) Satz 1 Nr. 2 MBO in Betracht.

Baurechtliche Einstufung von begrünten Fassaden

Befestigungssysteme und Rankhilfen von Fassadenbegrünungen sind als Teil der baulichen Anlage sowie als künstlich erzeugte Produkte als Bauprodukte einzustufen. [67]

Die Vegetation der Fassadenbegrünung, als nicht künstlich erzeugtes Produkt, kann entsprechend § 86 (1) Nr. 7 MBO [65] als andere Anlage und Einrichtung gewertet werden. Eine klare bauordnungsrechtliche Anforderung an Fassadenbegrünungen lässt sich jedoch, bis auf die allgemeinen Anforderungen an Außenwandbekleidungen nach § 26 Abs. 3 MBO, innerhalb der Bauordnung dennoch nicht finden [65].

Grundlagen und bauordnungsrechtliche Anforderungen an Außenwandbekleidungen

Die Betrachtung der Brandausbreitung an Fassaden beruht auf drei Einwirkungsszenarien: Brand eines benachbarten Gebäudes, Brand außerhalb des Gebäudes oder Brand innerhalb eines Gebäudes. Die Brände innerhalb und außerhalb des Gebäudes stellen die häufigsten als auch die kritischsten Brandfälle für eine Brandeinwirkung auf die Fassade dar. [64]

Für Standardgebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 müssen nach geltendem Bauordnungsrecht Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein. Baustoffe, die schwerentflammbar sein müssen, dürfen nicht brennend abfallen

oder abtropfen. Weitere, konkrete Schutzziele wurden seitens der Bauaufsicht nicht formuliert. Der Begriff „schwerentflammbar“ lässt sich, mit Blick auf die Klassifizierungsnorm DIN 4102-1 [68], wie folgt definieren: Unter einer aus einer Wandöffnung schlagenden Flamme darf sich die Brandausbreitung nicht wesentlich außerhalb des Primärbrandbereichs erstrecken. Diese Definition ist mit Blick auf das ursprüngliche bauordnungsrechtliche Schutzziel als Grundlage heranzuziehen.

Entsprechend § 28 MBO [65] sind Außenwände und Außenwandteile wie Brüstungen und Schürzen so auszubilden, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist.

Abweichend hiervon sind zudem hinterlüftete Außenwandbekleidungen mit Ausnahme der Dämmstoffe, aus normalentflammaren Baustoffen zulässig. Diese müssen den Technischen Baubestimmungen nach § 85a MBO [65] entsprechen. Die Konkretisierung des § 85a MBO [65] in Bezug auf Holzfassaden erfolgt in MVV-TB Abschnitt A 2.2.1.4 durch Einführung der *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL)* [69].

Ziel der in Abschnitt 6 MHolzBauRL genannten Maßnahmen ist die Begrenzung der Brandausbreitung analog § 28 (1) MBO [70]. Die Maßnahmen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Anordnung einer durchgehenden, nichtbrennbaren Schicht zum Außenwandbauteil hin (Abschnitt 6.2.1 MHolzBauRL [69])
- Unterbrechung der Hinter- bzw. Belüftungsebene im Geschoss-Stoß durch formstabile und in der tragenden Konstruktion befestigten, horizontalen Brandsperren (Abschnitt 6.2.4. i.V.m. Abschnitt 10 MHolzBauRL [69])
- Zusätzliche Maßnahmen im Bereich von Innenecken und brandabschnittsbildenden Bauteilen (Abschnitt 6.2.4 MHolzBauRL [69])

Die bestimmende Eingangsgröße ist dabei die Art (flächig, formschlüssig, kraftschlüssig, offen), die Orientierung (horizontal, vertikal) und die geometrische Lage der Holzfassade (Innenecke, Brandwände) der Holzfassade.

Bauordnungsrechtliche Anforderungen an greenTES-Bauteile

Das Fassadenelement wird je nach Wahl des statischen Systems als tragendes oder nichttragendes Außenwandbauteil angeordnet. Aus § 2 (3) MBO [65] ergibt sich zunächst die Gebäudeklasse für das jeweilige Bauvorhaben. Zusätzlich kommen die in § 2 (4) MBO genannten Sonderbautatbestände sowie zusätzliche Anforderungen auf Grundlage des § 51 MBO in Betracht. Ob die Anwendung einer Sonderbauverordnung oder -richtlinie notwendig ist, ergibt sich – je nach Landesbauordnung – aus den jeweiligen Technischen Baubestimmungen bzw. den eingeführten Verordnungen und -richtlinien des Bundeslandes.

Je nach Rahmenbedingungen des Bauvorhabens (Statisches System, Gebäudeklasse, Sonderbautatbestand) und Umsetzung der konstruktiven Maßnahmen variieren die brandschutztechnischen Anforderungen an die greenTES-Bauteile:

- 1. greenTES als tragende Außenwand, z.B. durch zusätzliche Lasten aus der Sanierung des Daches oder darüberliegenden Geschossen: Die Anforderung an das greenTES-Element sind hier hochfeuerhemmend, abweichend zu hochfeuerhemmend bzw. abweichend zu feuerbeständig (§ 27 (1) Satz 1 Nr. 1 bzw. i.V.m § 26 (2) Satz 4 MBO), die Bekleidung nach Abschnitt 4.2 MHolzBauRL (mind. 2x18 mm GF/GKF-Bekleidung), Nachweis nach Abschnitt 3.2 MHolzBauRL sowie nichtbrennbare Dämmstoffe mit Schmelzpunkt ≥ 1.000 °C nach Abschnitt 3.4 MHolzBauRL.
- 2. greenTES als nichttragende Außenwand, z.B. Sanierung durch Erneuerung der gesamten Außenhülle bei Lastabtrag über Bestand (Stützen etc.) oder Aufstellen auf eigenes vorgesehtes Fundament. Die Anforderungen gleichen jenen unter 3. greenTES als nichttragender Teil einer tragenden Außenwand.

Die Anforderungen an das greenTES-Element sind als raumabschließendes Bauteil aus brennbaren Baustoffen feuerhemmend (§ 28 (2) MBO).

- 3. greenTES als nichttragender Teil einer tragenden Außenwand, z.B. durch geschossweise Verankerung der Elemente an der Bestandswand; Die Anforderungen an das greenTES-Element sind hier ebenfalls als raumabschließendes Bauteil aus brennbaren Baustoffen feuerhemmend (§ 28 (2) MBO).

Die Anforderung „feuerhemmend“ schließt die Verwendung brennbarer Dämmstoffe innerhalb der Gefache ein. Der Nachweis der erforderlichen Feuerwiderstandsfähigkeit erfolgt gemäß §§ 17 ff. MBO nach technischer Regel, also beispielsweise der DIN 4102-4 [71] oder durch eine allgemein bauaufsichtliche Zulassung (abZ), ein allgemein bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP) oder eine allgemeine Bauartgenehmigung (abG) (§§ 17ff. MBO). Für Bauprodukte oder Bauarten, die keinem der vorgenannten Ver- und Anwendbarkeitsnachweise entsprechend, kommen vorhabenbezogene Nachweise in Betracht. Das wären eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung nach § 16a (2) Satz 1 Nr. 2 MBO [65] oder für Bauprodukte eine Zustimmung im Einzelfall nach § 20 MBO.

Für den im Rahmen von greenTES betrachteten Bauteilaufbau liegt ein Anwendbarkeitsnachweis als allgemeine Bauartgenehmigung (aBg) vor. Diese dient als Nachweis als tragendes und raumabschließendes Bauteil der Feuerwiderstandsklasse F30-B.

Nach DIN 4102-2 muss eine Wand der Feuerwiderstandsklasse F30-B ohne wesentlichen Verlust der Funktionseigenschaften mindestens 30 Minuten einer Brandbeanspruchung nach ETK (Einheits-Temperatur-Zeitkurve) widerstehen. Neben der Tragfähigkeit muss ebenfalls die Wärmedämmung einen Anstieg der Temperatur an der feuerabgewandten Seite verhindern. Zusätzlich muss das Bauteil im Hinblick auf das Kriterium des Raumabschlusses das Durchdringen von Flammen und Heißgasen wirksam verhindern.

Stand der Forschung: Brandversuche mit Photovoltaik

Brandversuche nach DIN EN IEC 61730-2

Die DIN EN IEC 61730-1 (VDE 0126-30-1): 2018-10 sowie die DIN EN IEC 61730-2 (VDE 0126-30-2): 2018-10 geben als internationale Norm Anforderungen an die Sicherheitsqualifikation von PV-Modulen. Die Norm basiert auf amerikanischen Brandtests für Dacheindeckungen nach ANSI/UL 790. UL bedeutet Underwriters Laboratories und ist eine unabhängige Organisation, welche Produkte zertifiziert. Die von ihnen entwickelten Normen gelten teilweise als amerikanische Norm „American National Standards Institute“ (ANSI). [72, 73] In Teil 2 der DIN EN IEC 61730 sind unter anderem Anforderungen an den Module Safety Test (MST) 23 *Brandprüfungen* zur Bewertung der Brennbarkeit der Module und der MST 24 *Entzündbarkeitsprüfung* gegeben. Für die Brandprüfungen gelten nationale und lokale Bestimmungen. Verschiedene Prüfverfahren sind daher möglich. Die Entzündbarkeitsprüfung MST 24 basiert auf dem Einzelflammentest nach ISO 11925-2. Der erste Versuch (Flame Speed Rate, FSR) bewertet die Flammenausbreitung auf der Oberseite der PV-Module und zwischen der Dacheindeckung und den auf dem Dach montierten PV-Modulen. Beim Test wird eine Gasflamme über die Oberfläche der PV-Elemente gerichtet, während diese dem Wind ausgesetzt sind. Je nach Modulklasse variieren die Brennerleistung und die Beflammungsdauer. Beim zweiten Versuch (Burning Brand Test, BBT) wird untersucht, ob eine externe Brandlast die PV-Module entzünden oder zum Durchbrennen bringt. Hierzu werden zum Beispiel Holzkrippen auf den Modulen oder Gas unterhalb der Module entzündet.

Teil 1 konkretisiert den Aufbau und Teil 2 die Anforderungen an die Prüfung der Module. Hier wird in die Schutzklassen 0 bis III sowie die Anwendungsklassen A bis C unterschieden. In Anwendungsklasse C, welche bei den im Folgenden betrachteten Modulen vorliegt, ist der Schutz durch die Spannungsbegrenzung bis 240 W gegeben. Als BIPV sind durch die Anwendung am Gebäude weitere Anforderungen nach MBO zu beachten. Zur Bemessung der Konstruktion der PV-Fassade sind der Eurocode DIN EN 1993-1-1 und DIN EN 1999-1-1 für den Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis von Stahl- und Aluminiumkonstruktionen anzuwenden. Die Solaranlagenrichtlinien des DIBt betonen, dass die Standsicherheit von nicht rostendem Stahl nicht durch geltende Bestimmungen geregelt ist. [74] Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung muss vom DIBt eingeholt werden, falls die Tragfähigkeit der UK durch

Versuche ermittelt wird, relevante Teile aus Kunststoff bestehen oder Montageelemente des PV-Moduls geklebt sind. Landesbezogen kann eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) beantragt werden.

Experimental study of flame spread underneath PV (Belgien/UK)

Kirstensen et al. [40] führte kleinmaßstäbliche FSR-Brandversuche mit Polymethylmethacrylatplatten (Acrylglas/PMMA) und Stahlplatten sowie anschließend mit PV-Modulen durch. Ziel der Untersuchung war es, PV-Anlagen auf Flachdachinstallationen auf die Flammenausbreitungsrate, den Masseverlust, den Strahlungswärmefluss und die auftretenden Temperaturen zu untersuchen. Die Brandeigenschaften der anliegenden Baustoffe, z.B. in Dachbahnen (Bitumen-, TPO-, PVC- oder EPDM-basierte Materialien) aber auch die Bestandteile der PV, sind für die Einschätzung des Brandausbreitungsrisikos grundlegend. Abbildung 16 zeigt hierzu ergänzend die Ergebnisse des Folgeversuches mit einer PMMA-Platte und einem lichten Abstand von 15 cm. Hier zeigt sich ab der 21. bis zur 24. Minute des Versuches eine deutlich erhöhte Brandausbreitung.

Abbildung 16: Brandentwicklung auf der PMMA-Platte mit einer Spalthöhe von 15 cm und einer Probenbreite von 30 cm [75]

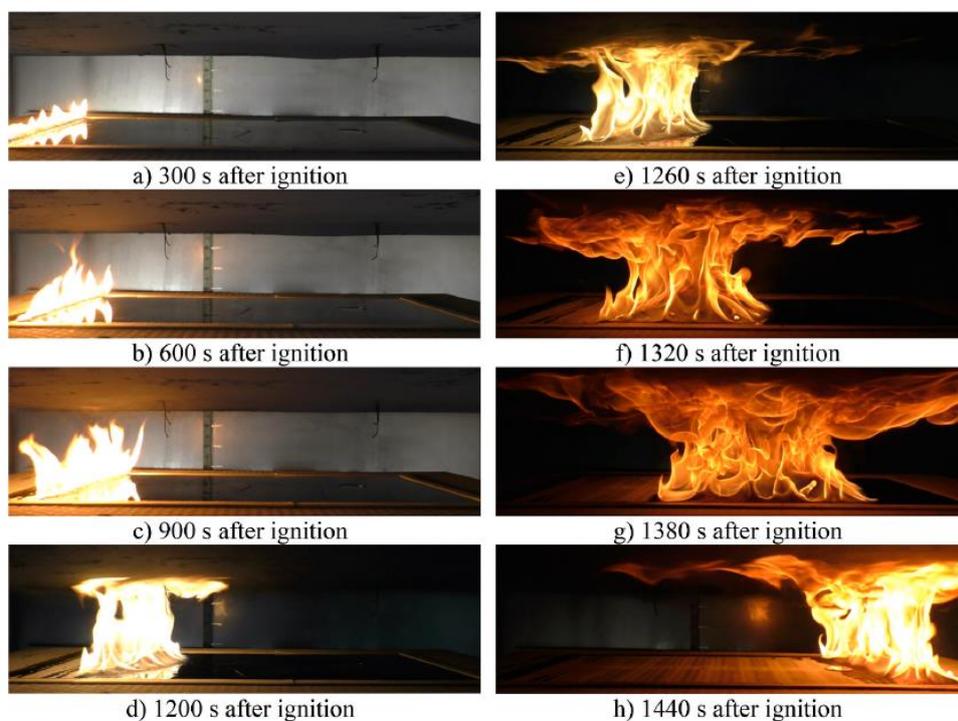
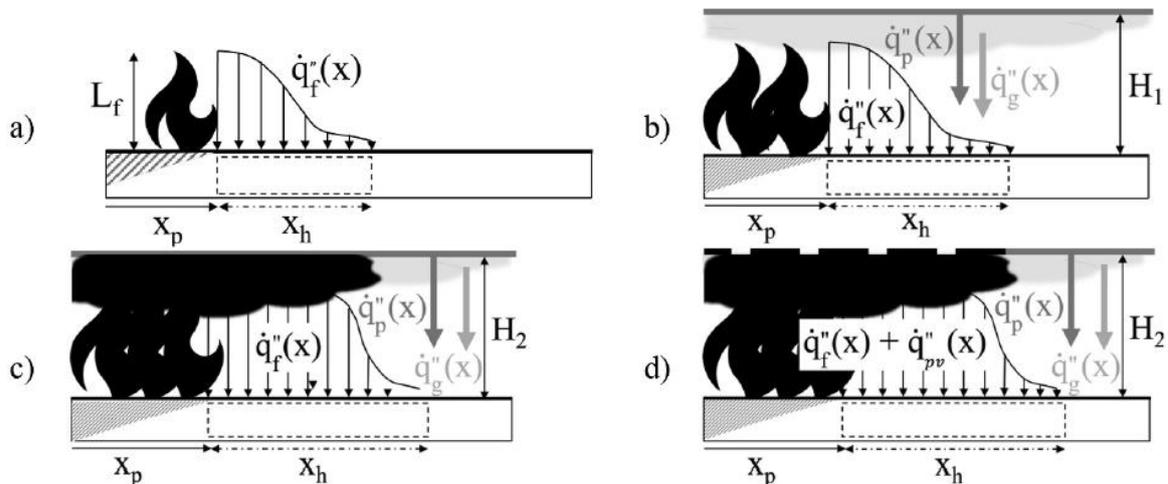


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Wärmestromanstiege; Vorwärmzone (x_h) vor der Pyrolyse Zone (x_p), als Funktion der Spalthöhe (H_n), Flammenhöhe (L_f) und brennbarer Inhalt von dem Panel. (a) Keine Platte – natürliche Flamme Ausbreitung, $\dot{q}''_f(x)$ -Wärmefluss von der Flamme. (b) Nicht brennbar Panel, $H_1 > L_f$, Wärmestrom von Panel, $\dot{q}''_p(x)$, und angesammelter Rauch, $\dot{q}''_g(x)$.

(c) Nicht brennbare Platte $H_2 < L_f$, Durchbiegung einer Flamme, die zu einem erhöhten Wärmefluss führt von der Flamme. (d) PV-Modul mit Brennstoff Rückseitenmembran, wodurch der Wärmefluss entsteht \dot{q}''_{PV} . [75]



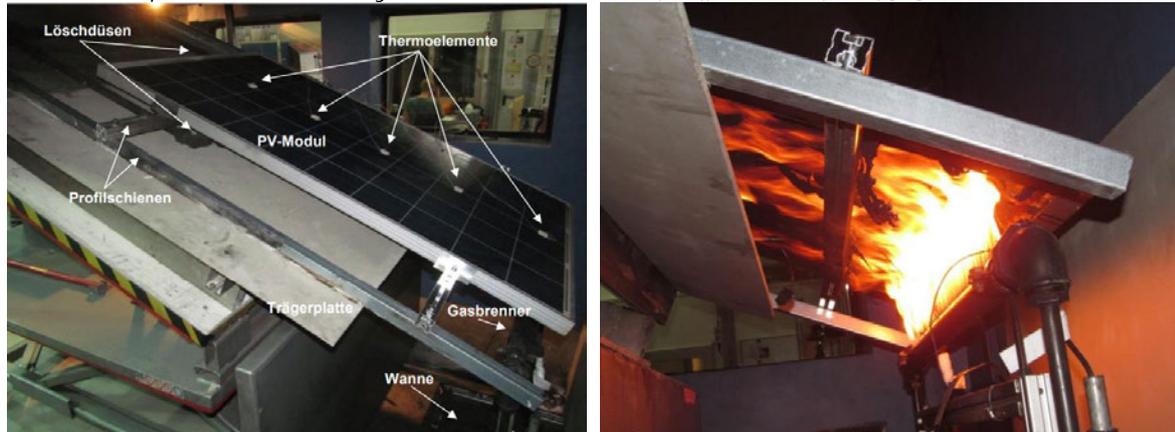
Die Varianten der weiteren Versuchsaufbauten mit PV-Modulen sind in Abbildung 17 dargestellt. Hier zeigt Versuch a) die Versuchsanordnung ohne darüberliegender Platte, b) und c) nicht brennbare Platten und d) den Aufbau mit PV-Modul. Nach Versuch b) wurde der Abstand von 20 auf 17 cm reduziert. Hier traten deutlich höhere Ergebnisse bei allen Parametern auf. Die Brandausbreitungsrate stieg von 0,37 mm/s auf 2,41 mm/s an. Daher kann geschlussfolgert werden, dass Anforderungen an die Ausbildung der Hinterlüftungsebene maßgeblich für die Einhaltung der Schutzziele an BIPV sind. [76]

Der Einfluss der vertikalen bzw. horizontalen Ausrichtung bei Positionierung der BIPV auf einem geneigten bzw. flachen Dach sowie an der Fassade ist nicht zu vernachlässigen.

Forschungsprojekt PV-Brandschutz – Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaikanlagen und Entwicklung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung

Brandereignisse mit BIPV können unterschieden werden in Brände ausgelöst durch PV-Anlagen oder als Mitbrand der PV-Module. Durch Verkettungen infolge von Lichtbogenereignissen, Brandausbreitung durch brennbare Teile der Bauteilaufbauten, Isolationsfehler etc. können sich PV-Anlagen selbstentzünden. Für das Forschungsprojekt *PV-Brandschutz – Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaikanlagen und Entwicklung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung* [77] wurden unter anderem vom ISE Fraunhofer-Institut und TÜV Rheinland hierzu Brandversuche durchgeführt. Kleinmaßstäbliche Versuche zur Untersuchung der Brennbarkeit der Steckerverbindungen, Blitzeinflüsse, Wärmeableitung in der Anschlussdose sowie Lichtbogenversuche dienten als Grundlage für die Erstellung einer Bewertungsmethode. Daraufhin wurde die Gefährdung der Einsatzkräfte durch Verletzung herabfallender Teile, thermische Spannungen, Explosionen und Atemgifte als kritisch bewertet. In weiteren Versuchen nach UL 790 wurden hier Polykristalline- und Dünnschichtmodule an einer Aluminiumunterkonstruktion geprüft. Abbildung 18 zeigt den aufgeständerten Versuch mit Profilschienen. Die Thermoelemente wurden in Reihe mittig am PV-Modul positioniert. Mittels eines Gasbrenners wurde die Brandbelastung aus einer externen Quelle simuliert. Neben einer Rauchgas- und Löschwasseranalyse wurde eine Bestandrückstandsbewertung vorgenommen. Hierbei wurde festgehalten, welche Teile des Moduls nach Versuchsende eine potentielle Absturzgefahr darstellen. Ergänzend wurden die Versuche mit weiteren typischen Baustoffen an der Gebäudehülle durchgeführt. Dazu gehören u.a. Bitumenbahnen. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes können wie folgt zusammengefasst werden: Zur Vermeidung der Selbstentzündung müssen bei PV-Anlagen Qualitätsprüfungen der einzelnen Module sowie eine fachgerechte Installation stattfinden. Weiterhin ist eine regelmäßige Wartung entscheidend für das Entzündungsverhalten der PV-Anlagen. Da in diesem Projekt der Fokus auf dachgebundener PV und der Selbstentzündbarkeit lag, sind die Ergebnisse nur teilweise auf greenTES übertragbar. [77]

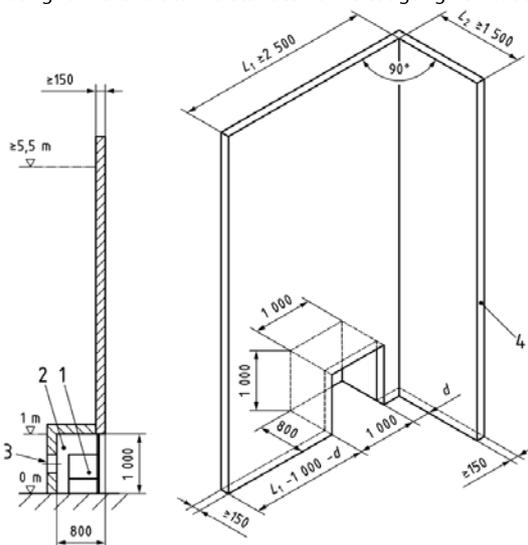
Abbildung 18: Versuchsaufbau im Projekt PV-Brandschutz – Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaikanlagen und Entwicklung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung; Aufbau mit Thermoelementen (links); Gasbrenner (rechts) [77]



Forschungsprojekt PV-HoWoSan

Für das Forschungsprojekt PV-HoWoSan wurde zur Sanierung eines Wohnhochhauses in Frankfurt ein DIN 4102-20 Fassadenbrandversuch (MFPA Leipzig) durchgeführt. In Abbildung 19 ist der grundsätzliche Versuchsstand nach DIN 4102-20 dargestellt. Die zu prüfende Fassadenbekleidung wird im Bereich der Innenecke montiert. Die Brandkammer ist in der Mitte der beiden Schenkel des Prüfkörpers positioniert. Hier wird eine 35 kg Holzkippe oder ein äquivalenter Gasbrenner als Brandlast angeordnet. Nach 20 Minuten wird die Holzkippe abgelöscht und die Beobachtungsphase tritt ein.

Abbildung 19: Aufbau des Prüfstandes vor Befestigung der Außenwandbekleidung/Prüfkörper nach DIN 4102-20 [78]



Da zu Beginn des Forschungsprojektes sich der Brand des Grenfell Towers in London ereignete wurden die Anforderungen an die brandschutztechnischen Maßnahmen für die Umsetzung der Fassadensanierung erhöht. Es wurden neben geschossweise horizontalen Mineralwolle-Brandsperrern geschossweise Schottungen der Elektroschächte gefordert. Vor Sanierungsbeginn musste zur Zulassung im Einzelfall der Fassadenelemente ein Fassadenbrandversuch stattfinden. Weitere Zusatzmaßnahmen war eine Unterkonstruktion der Hinterlüftungsebene aus Edelstahl statt Aluminium. Damit einhergehende Mehrkosten, ein erhöhter Verarbeitungs- und Einbauaufwand sowie das höhere Gewicht an der Fassade sind Faktoren, aufgrund derer häufig eine Aluminiumunterkonstruktion anstelle anderer brandresistenterer Konstruktionen

gewählt wird. Neben einem Schmelzpunkt von 500 °C hat Aluminium eine Wärmeleitfähigkeit von 200 W/(mK). Edelstahl hat nicht nur einen deutlich höheren Schmelzpunkt mit 1510 °C, sondern auch ein Drittel der Wärmeleitfähigkeit von Aluminium. [79, 80] Für den Brandversuch waren unter anderem die Untersuchungsziele wie folgt:

- Brandausbreitung der PV-Fassade
- Wirksamkeit der horizontalen Brandsperren
- Brandlast aus PV-Modulen
- Beobachtung des brennenden Abfallens oder Abtropfens
- Bewertung der Rauchentwicklung sowie der Gesamtkonstruktion unter Brandeinwirkung

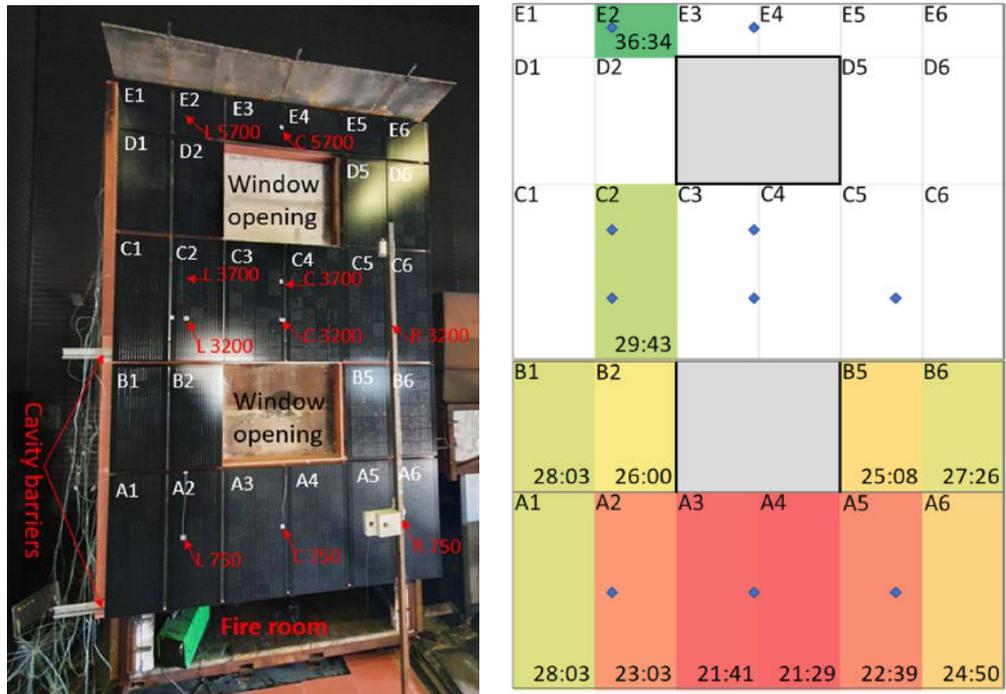
Nach Ablöschen der Primärflamme ergab sich, dass die PV-Module eine geringe Brandlast und damit einhergehende Rauchentwicklung aufweisen. Nach dem Ablöschen der Krippe trat ein Selbstverlösch der Module ein. Die Module, welche einer direkten Beflammung ausgesetzt sind, zeigen in der Schicht der Glasplatten ein Platzen und anschließendes Absplittern. Dadurch, dass die, als brennbar eingestuft Module als nicht selbstständig brennend bewertet wurden, wurden sie im weiteren Projektverlauf als nichtbrennbar angenommen.

Large- and small-scale fire test of a building integrated photovoltaic (BIPV) façade system [81]

In Norwegen wurden 2023 Fassadenbrandversuche als Raumbrand mit Brandüberschlag aus dem Fenster mit PV-Modulen durchgeführt. Die geschlossene Fassade, die in Abbildung 20 (links) zu erkennen ist, betrug 4000 mm × 6000 mm. Da vor den Versuchen mit herabfallenden Teilen und einer vertikalen Flammenausbreitung zu rechnen war, wurde die Unterkonstruktion durch vorangehende Kegelkalorimetertest nach ISO 5660-1 bestätigt. Hierdurch konnten die Materialeigenschaften vor den Fassadenbrandversuchen bestimmt werden. [81] Der Versuchsaufbau orientierte sich nach dem SP FIRE 105 large-scale façade test [82, 83]. Verbaut wurden Glas-PV-Module der Baustoffklasse B,s1-d0 nach nach DIN EN 13501-1. [81]

Die Ergebnisse aus dem Brandversuch lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die Module zeigten nach 30 min Beflammung eine eigenständige Brandausbreitung. In der Konstruktion wurden über 800 °C gemessen und deutlich zu sehen ist, dass hier bereits die Konstruktion aus Aluminium geschmolzen ist. Die Module, die der direkten Beflammung ausgesetzt sind, fielen als erstes ab. Bei zwölf von 20 Modulen sind die Scheiben großteilig mit bis zu zehn Kilogramm gesplittert abgefallen (Abbildung 20, rechts), da sich die Scheiben vom Aluminium durch thermische und mechanische Einflüsse gelöst haben. Die kleinmaßstäblichen Versuche waren hier nicht aussagekräftig, um Schlussfolgerungen für die Großversuche zu erlangen, da sich die Materialeigenschaften von dem groß- zum kleinmaßstäblichen Versuch nicht übertragen ließen. [81]

Abbildung 20: Versuchsstand mit Bezeichnung der PV-Module (links), Darstellung der abgefallenen Module mit Zeitangabe (rechts) [81]



Systemauswahl

Zunächst werden alle marktüblichen Systeme zur Fassadenbegrünung sowie Photovoltaikmodule untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung zur Integration in die TES Energy Facade bewertet. Basierend auf der Bewertung wird eine Auswahl der zu integrierenden Systeme getroffen.

Fassadenbegrünung

Bei der Systemauswahl zur Fassadenbegrünung werden zunächst auf dem Markt verfügbare Fassadenbegrünungssysteme und ihre Bewässerungstechnik zusammengestellt und ihre Eignung hinsichtlich der Integration in vorgefertigte Holzbausysteme bewertet. Wesentliche Bewertungsparameter sind dabei die gestalterischen und konstruktiven Parameter, ökologische Analysen, Kosten und die benötigte Bewässerungstechnik.

Im Rahmen eines interdisziplinären Workshops mit PV-Herstellern, Unternehmen und Wissenschaftlern aus dem Holzbaubereich und der Begrünungsbereich wurden die folgenden drei Systeme ausgewählt, die in vorgefertigte Holzbausysteme integriert werden:

- Bodengebundene Bepflanzung durch Selbstklimmer. Für das Mock-Up wird Efeu (*Hedera Helix*) als Kletterpflanze gewählt, um zu prüfen, ob das System auch mit einer stark rankenden, lichtfliehenden Pflanze funktionsfähig ist.
- Fassadengebundene Begrünung in Pflanztrögen mit Ranksystem durch Gerüstkletterpflanzen. Für das Mock-Up wird die Pfeifenwinde (*Aristolochia macrophylla*) als häufig an Fassaden eingesetzte Rankpflanze verwendet.
- Fassadengebundene Begrünung durch Pflanzrinnen mittels des Hydro Profi Line Systems der Firma GKR. Hierbei hängen die Pflanzen in Spezialkulturtöpfen von Luft umgeben an einer Systemscheibe über einer freien Wasserebene in einzelnen Pflanzwannen. Durch das sich in den Wannern bildende Feuchtklima wird ein vorteilhaftes Wurzelwachstum ausgelöst, wodurch Wurzelverdichtungen auch langfristig ausgeschlossen sind. Die Wasserversorgung erfolgt über eine kaskadenartige Überlaufbewässerung mittels Schwerkraft. Dadurch kann eine Überversorgung der Pflanzen systembedingt ausgeschlossen werden und im Vergleich zu anderen fassadengebundenen Begrünungssystemen wird ein verringerter Wasserverbrauch erreicht.

Durch die Wahl dieser drei Systeme können unterschiedliche gestalterische und konstruktive Ansprüche abgedeckt werden. Jedes der Systeme zeichnet sich als eine für Fassadenbegrünung kostengünstige Lösung aus. Die beiden fassadengebundenen Systeme weisen zudem durch ihren Wasserspeicher in den Pflanztrögen und -rinnen eine erhöhte Resilienz gegenüber Ausfällen des Bewässerungssystems sowie einen geringen Wartungsaufwand auf.

Die fassadengebundene Begrünung durch Pflanzrinnen wird mit verschiedenen Pflanzen bepflanzt, um ein abwechslungsreiches Erscheinungsbild sowie eine hohe Biodiversität zu erzeugen. Dazu werden die folgenden Auswahlkriterien aufgestellt:

- Winterharte und mehrjährige Pflanzen, um einen jährlichen Pflanzentausch zu vermeiden
- Wintergrüne Pflanzen, um auch in den Wintermonaten ein grünes Fassadenbild zu erzeugen
- Mischung verschiedener Pflanzen mit unterschiedlichen Laubfarben, um ein abwechslungsreiches Fassadenbild zu erzielen
- Pflanzen mit variierenden Blütezeiträumen, sodass sich über die Sommermonate ein wechselndes Erscheinungsbild der Fassade ergibt und über einen möglichst langen Zeitraum blühende Pflanzen an der Fassade zu sehen sind

- Pflanzen mit einer Wuchshöhe von bis zu 50 cm, damit der Abstand zwischen den Pflanzrinnen möglichst üppig ausgefüllt wird

Die genannten Kriterien führen zu der Auswahl der folgenden Pflanzenarten (siehe Abbildung 21):

- *Bergenia cordifolia* (1)
- *Heuchera micrantha* ‚Palace Purple‘ (2)
- *Heuchera villosa* var. *Macrorrhiza* (3)
- *Carex oshimensis* ‚Icedance‘ (Weißrandige Segge / Japan-Segge ‚Icedance‘) (4)
- *Sesleria autumnalis* (Herbst Blaugras) (5)
- *Heuchera micrantha* ‚Obsidian‘ (Silberglöckchen Obsidian) (6)

Abbildung 21 Pflanzenauswahl Rinnensystem (Fotos: Baumschule Horstmann)



Bergenia cordifolia (1)



Heuchera micrantha ‚Palace Purple‘ (2)



Heuchera villosa var. *Macrorrhiza* (3)



Carex oshimensis ‚Icedance‘ (4)



Sesleria autumnalis (5)



Heuchera micrantha ‚Obsidian‘ (6)

Gebäudeintegrierte Photovoltaik

Auch die marktüblichen Photovoltaiksysteme werden herstellernerneutral analysiert. Dabei wird zwischen Dünnschicht-Modulen, kristallinen Solarmodulen und organischen Modulen unterschieden. Die Dünnschicht-Module untergliedern sich weiter in amorphes Silizium, Cadmium-Tellurid und CIGS. Bei den kristallinen Modulen werden sowohl mono- als auch polykristalline untersucht. Diese PV-Module werden in einer qualitativen Bewertungsmatrix (siehe Tabelle 8) miteinander verglichen, um ihre Potenziale und Risiken für das Forschungsprojekt frühzeitig abschätzen zu können. Mit dem Ziel, die Bereitschaft bei Planerinnen und Planern für die Integration von PV in der Fassade zu erhöhen, kristallisieren sich folgende Hauptkriterien heraus: Gestaltung (Maße und Farben), Ökologie (Amortisation CO₂ und Toxizität), Energie und Klimaschutz (Wirkungsgrad (WG)), und Ökonomie (Amortisation €).

Tabelle 8 Vereinfachte Matrix zur Bewertung der Photovoltaik-Systeme

	WG max	WG diffus	WG Temp.	WG in 20 a	Amortisation €	Amortisation CO ₂	Toxi- zität	Maße	Farben
aSi	o	+	+	+	+	+	+	+	+

CdTe	o	+	+	+	o	+	o	+	+
CIGS	+	+	+	+	-	+	o	+	+
Mono	+	o	o	+	-	+	+	o	+
Poly	+	o	o	+	+	+	+	o	+
Organ.	-	-	-	-	+	+	+	+	+

Basierend auf dieser Analyse der PV-Module werden interdisziplinär mit den projektbeteiligten PV-Herstellern und Holzbauern zwei Photovoltaikmodule zur Integration in die TES Energy Facade ausgewählt:

- Dünnschicht-Module mit homogenem, flächigem Gestaltungsbild und gutem Schwachlichtverhalten
- Kristalline Module mit Wirkungsgraden von bis zu 23 % und hohem Marktanteil

Beide ausgewählten PV-Module werden aufgrund der höheren Wertigkeit als Glas-Glas-Variante in den vorgefertigten Holzbau integriert. Die Befestigung der Dünnschichtmodule erfolgt über rückseitige geklebte Backrails, während die kristallinen Module mechanisch in die Holzkonstruktion integriert werden (vgl. Kapitel **Konstruktive Entwicklung**). Da organische Module ihre Stärken Transparenz und Flexibilität beim greenTES-Projekt nicht ausspielen können, werden diese im weiteren Projektverlauf nicht berücksichtigt, sondern der Fokus auf handelsübliche und häufig verwendete Module gelegt.

Konstruktive Entwicklung

Zu Beginn des Projekts wurden primäre Anforderungen und Zielsetzungen für das greenTES-Projekt formuliert. Die Projektziele im Bereich Konstruktive Entwicklung lauten wie folgt:

- Integration von Fassadenbegrünung in die vorgefertigte TES-Fassade
- Entwicklung vorgefertigter Systeme, die auch Photovoltaikmodule einschließen können
- Untersuchung verschiedener Begrünungssysteme in Kombination mit Photovoltaik
- Entwicklung von Fassadensystemen, die nicht nur für Gebäudesanierung, sondern auch für Neubauprojekte geeignet sind

Die konstruktive Entwicklung der greenTES-Fassadensysteme führt durch die Integration von Begrünungs- und Photovoltaiksystemen zu speziellen Anforderungen, die im herkömmlichen und standardisierten Holztafelbau bisher wenig Beachtung fanden. Das Hauptziel der Konstruktion besteht darin, Begrünung und Photovoltaik bereits während der Vorfertigung weitgehend zu integrieren. Dies soll geschehen, um die bereits bei der Entwicklung des TES-Systems festgelegten Montageabläufe beizubehalten und Montagedauer sowie -abläufe nicht zu verlängern oder einzuschränken. Das greenTES-System wird so konzipiert, dass sowohl die Bewässerung für die Bepflanzung als auch Kabel für die Integration von Photovoltaikmodulen bereits im System berücksichtigt werden. Die Verlegung von wasserführenden Leitungssystemen stellt im Holzbau eine besondere Herausforderung dar, um Feuchteinträge in die Holzkonstruktion zu vermeiden.

Um eine Vielfalt an Varianten für die Untersuchung im Forschungsprojekt zu gewährleisten, werden drei verschiedene Varianten von Begrünungssystemen festgelegt. Diese werden in Kombination mit zwei verschiedenen Photovoltaikmodulen untersucht. Das Ziel ist, eine Variantenvielfalt zu erforschen, die sowohl bei der Sanierung von Bestandsgebäuden als auch bei Neubauten berücksichtigt werden kann. Es fiel die Auswahl auf die Glas-Glas-Module der Modellreihe SKALA von der AVANCIS GmbH. Diese Module sind bereits mit einem verklebten Backrailsystem ausgestattet und müssen nur noch am vormontierten Gegenstück an der Fassade eingehängt werden. Die Systeme von GES – Gebäude-Energiesysteme GmbH decken die herkömmliche Methode zur Montage von PV-Systemen ab. Sie werden mittels Montageschienen und Montageklammern befestigt. Der Vorteil der GES-Module liegt darin, dass sie spezifisch nach Kundenwunsch bis zu einer Größe von 3,70 m x 2,30 m gefertigt werden können.

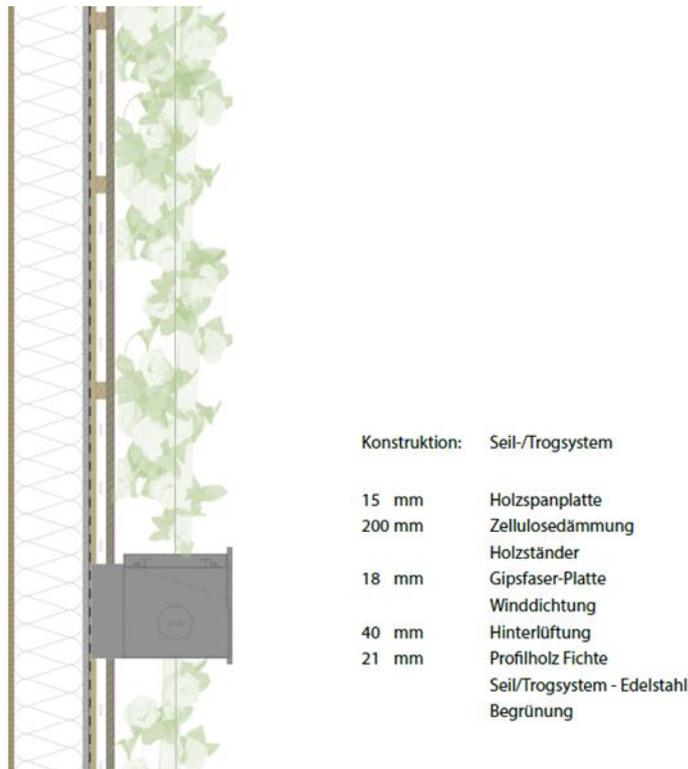
greenTES Konstruktionsvarianten

Im weiteren Projektverlauf wurden fünf unterschiedliche Wandaufbauten festgelegt. Diese unterscheiden sich durch die systembedingte Nutzung und die damit einhergehenden Befestigungsvarianten der einzelnen Systeme.

System 1: Troggebundene Fassadenbegrünung

Als erstes System wird ein troggebundenes Begrünungssystem aus Edelstahl untersucht, dargestellt in Abbildung 22. Die Aufhängungen bzw. Stahlkonsolen zur Montage des Systems werden bereits im Zuge der Vorfertigung an die TES-Fassade montiert. Hierdurch besteht die Möglichkeit, das System bereits ab Werk voll vormontiert auf die Baustelle zu liefern, indem die hierfür vorgesehenen Tröge in den Konsolen eingehängt und fixiert werden. Weiterhin besteht die Option, lediglich die Stahlkonsolen, die für die Montage der Tröge benötigt werden, vorzumontieren. Bei dieser Option können die Tröge dann bauseits eingehängt und fixiert werden. Der Vorteil einer bauseitigen Montage vor Ort liegt darin, dass weniger Platz für den Transport benötigt wird und somit mehrere vorgefertigte Fassaden auf einem Lastkraftwagen transportiert werden können. Sofern die Tröge bereits ab Werk an den Fassaden vormontiert werden, steigt der Platzbedarf der Fassadenelemente, wodurch eine geringere Anzahl an Elementen in einem Transport transportiert werden können.

Abbildung 22 Visualisierung Trogsystem



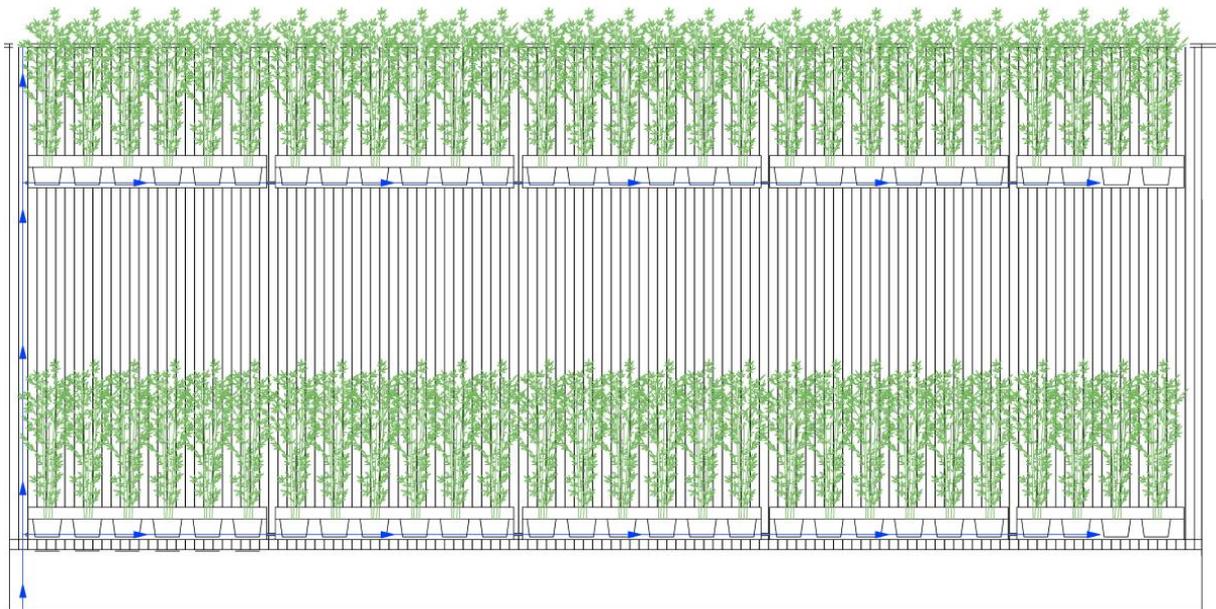
Im greenTES-Projekt werden im Zuge der Entwicklung des Mock-Ups die troggebundenen Systeme mit Pfeifenwinden bestückt. Diese Pflanzengattung benötigt für einen optimalen Wuchs zusätzliche Rankhilfen. Hierfür werden Stahlseile vorgesehen, welche es der Pfeifenwinde ermöglichen, geschossweise zu wachsen. Durch den schnellen Wuchs der Schlingpflanze ist es notwendig, die Stahlseile nachgiebig auszubilden und eine Überlänge, welche nachgezogen werden kann, einzuplanen. Aufgrund des raschen Wuchsverhaltens der Pflanze, etwa 100 bis 150 cm pro Jahr, ist es weiterhin in den ersten beiden Jahren erforderlich, die Pflanzen intensiver zu pflegen. Um Schäden an der Konstruktion zu vermeiden, ist es notwendig, die Pflanzen einmal jährlich abzuwickeln und neu zu fixieren. Dies gilt jedoch nur für die ersten beiden Jahre, in denen die Pflanze noch Zeit benötigt, um anzuwachsen.

Für den konstruktiven Aufbau des troggebundenen Fassadensystems werden die Stahlkonsolen in die Fassadengestaltung integriert. Es wurde festgelegt, dass die Stahlkonsolen in die Hinterlüftungsebene integriert werden sollen. Die Befestigung erfolgt an Ständern der Holztafelbauwand, die bereits bei der Vorplanung an den entsprechenden Punkten Berücksichtigung finden und entsprechend vorgesehen werden. Die vorgehängte hinterlüftete Fassade umschließt die Stahlkonsolen, wodurch auch weiterhin eine Hinterlüftung und ein damit einhergehender Feuchtetransport gewährleistet wird. Hierdurch kann das System in die Fassadengestaltung einbezogen werden und der individuelle Gestaltungsstil der Fassade kann beibehalten werden.

Die Bewässerungsmethode in Abbildung 25 demonstriert ein effizientes und ressourcenschonendes Prinzip. Mittels vertikaler Wasserzufuhr über den speziell konzipierten Schacht wird sichergestellt, dass jede individuelle Pflanze in den Trögen präzise und bedarfsgerecht mit Wasser versorgt wird. Dies ist von signifikanter Bedeutung, da eine inhomogene Bewässerung potenziell zu variierendem Pflanzenwachstum führen könnte, was wiederum ökologische und ästhetische Auswirkungen auf das System hätte. Die horizontale Verbindung der Tröge ermöglicht eine kontinuierliche Versorgung der Pflanzen entlang der Fassade und minimiert zugleich jeglichen Wasserverlust, da das Wasser von einem Trog zum nächsten überläuft. Diese Vorgehensweise steigert die Gesamteffizienz des Systems und trägt zu einem nachhaltigen Umgang mit Wasserressourcen bei. Der eigens entwickelte Schacht fungiert dabei nicht nur als

Wasserzufuhrquelle, sondern ermöglicht auch die Integration von Photovoltaikmodulen zur Energiegewinnung. Dieser multifunktionale Ansatz zeichnet sich durch seine Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit aus, da er nicht nur zur Fassadenbegrünung beiträgt, sondern gleichzeitig saubere Energieerzeugung ermöglicht. Die Option, überschüssiges Wasser gezielt in ein vorgesehenes Fallrohr abzuleiten, dient als zusätzlicher Sicherheitsmechanismus zur Vermeidung von Staunässe in den Trögen und zum Schutz des Pflanzenwachstums. Dieses durchdachte Bewässerungssystem stellt somit ein Schlüsselement für die erfolgreiche Implementierung von troggebundenen Pflanzsystemen an Gebäudefassaden dar. Es trägt nicht nur zur Verbesserung der ästhetischen Gestaltung bei, sondern leistet auch einen bedeutsamen Beitrag zur Nachhaltigkeit und Energieeffizienz im Baubereich.

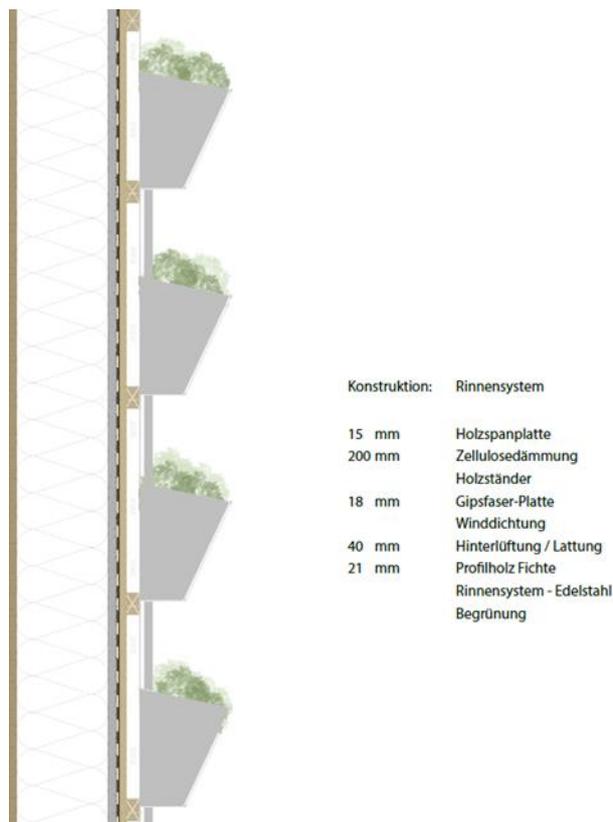
Abbildung 23 Bewässerungsprinzip Trogsystem



System 2: Fassadenbegrünung mittels Rinnensystem

Das zweite im Rahmen des greenTES-Projekts untersuchte System zur Fassadenbegrünung ist ein Rinnensystem, dargestellt in Abbildung 24. Die Funktionsweise dieses Systems ähnelt der Struktur von Reisterrassen. Durch das Einleiten von Wasser in die oberste Rinne wird dieses horizontal zu benachbarten Rinnen weitergeleitet. Die einzelnen Rinnen sind durch ein Rohrsystem miteinander verbunden, was den horizontalen Wasserfluss ermöglicht. Die Anordnung der Rohröffnungen erfolgt in einem vorbestimmten Abstand zur Unterkante der Konstruktion, um einen Wasserrückhalt in jeder Rinne zu gewährleisten und ein Austrocknen der darin platzierten Pflanzen zu verhindern.

Abbildung 24 Visualisierung des Rinnensystems



Die Rinnensysteme werden an der Fassade auf eine dafür vormontierte Unterkonstruktion montiert. Die für das Mock-Up im greenTES-Projekt definierten Maße des Rinnensystems lauteten: $l = 1000 \text{ mm}$, $h = 450 \text{ mm}$, $b = 200,22 \text{ mm} / 99,3 \text{ mm}$. Der Abstand der Unterkonstruktion ergibt sich durch die systembedingten Lochungen, die vom Hersteller bereits vorgebohrt waren, und belief sich auf 450 mm zwischen den horizontalen Lattungen. Durch die Reihung der einzelnen Rinnen kann das Wasser horizontal von Rinne zu Rinne geleitet werden. Das Wasser wird am Ende einer Reihe mittels Überlaufstutzen, der im Boden der letzten Rinne vorgesehen ist, in die darunterliegende Rinnenreihe geleitet. Somit erfolgt die gesamte Bewässerung einer Fassadenseite bzw. eines greenTES-Moduls über die horizontale Reihe von oben nach unten.

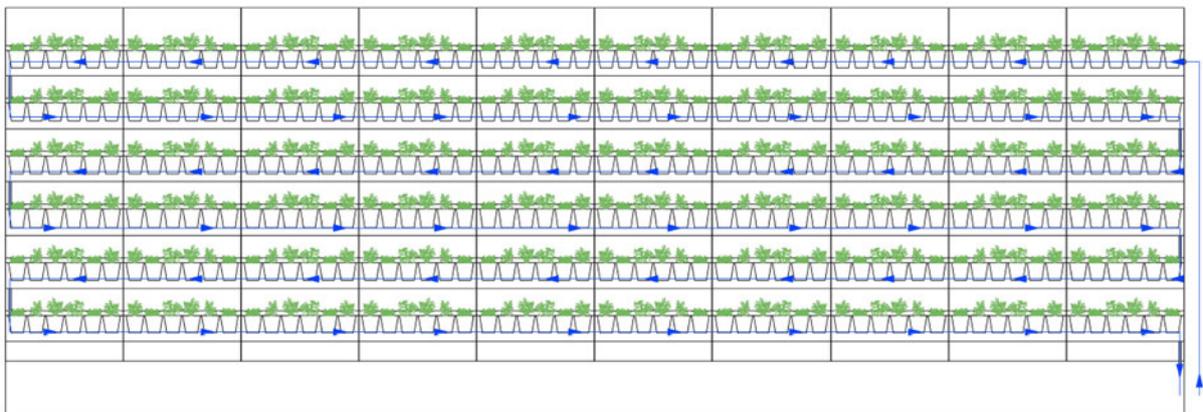
Wenn ein ganzes Modul mit dem Rinnensystem ausgestattet ist, wird dieses durch die Edelstahlkonstruktion weiter vor Brandentwicklung geschützt. Es kann sogar dazu beitragen, einen Brandüberschlag in die darüber liegenden Geschosse zu verhindern. Zusätzlich kann durch die vollflächige Montage der Rinnensysteme die Hinterlüftungsebene beibehalten werden. Aufgrund der überlappenden Anordnung der einzelnen Rinnen ist die Unterkonstruktion auch vor dem Eindringen von Feuchtigkeit durch Schlagregen an die Fassade geschützt. Bei der Wasserversorgung gelten die folgenden Prinzipien:

- Das Rinnensystem zur Bewässerung ähnelt in seiner Funktionsweise dem troggebundenen Bewässerungssystem. Beide Systeme verwenden Schächte zur Wasserversorgung, ermöglichen die Bewässerung von Pflanzenreihen.
- Im Gegensatz zum troggebundenen System, bei dem die Bewässerung geschossweise erfolgt, erfolgt die Bewässerung im Rinnensystem nur an der höchsten Stelle der Rinnen. Dies bedeutet, dass nur diese Spitzenrinne bewässert wird, und das Wasser dann über horizontale Verbindungsstücke in eine gesamte Reihe fließt.
- Bei einem Überschuss an Wasser wird dieses über vertikale Verbindungsstücke in die darunterliegende Rinne abgeleitet. Dadurch erfolgt eine stufenweise Ableitung des Wassers in die verschiedenen Rinnen, wobei dieses Prinzip dem von Reisterrassen ähnlich ist.

- Wie bei anderen Bewässerungssystemen erfordert die Bewässerung des Rinnensystems die Zugabe von Düngemitteln, um die Pflanzennährstoffe sicherzustellen. Dies kann manuell oder idealerweise mithilfe eines automatischen Dosiersystems erfolgen, um eine gleichmäßige und präzise Düngung zu gewährleisten.
- Für den Fall, dass überschüssiges Wasser in ein Fallrohr geleitet werden muss, empfiehlt es sich, die örtliche Kommune hinsichtlich der Düngemittelbelastung im Wasser zu konsultieren. In der Regel ist für das Einleiten von Bewässerungswasser mit geringer Düngemittelkonzentration kein separater Abscheider erforderlich.

Das Rinnensystem ermöglicht somit eine effiziente und präzise Bewässerung von Pflanzenreihen und kann dazu beitragen, optimale Wachstumsbedingungen für die Pflanzen zu schaffen. Die Funktionsweise des Systems kann in einer entsprechenden Abbildung dargestellt werden, um die Abläufe visuell zu verdeutlichen. Das Funktionsprinzip des Rinnensystems kann der Abbildung 25 entnommen werden.

Abbildung 25 Bewässerungsprinzip Rinnensystem



Das Rinnensystem eröffnet die Möglichkeit, auf sichtbare Brandriegel in den Geschosstößen zu verzichten, da diese lediglich in der Hinterlüftungsebene vorgesehen werden müssen. Diese Möglichkeit resultiert aus der vollflächigen Beplankung mit Edelstahlrinnen, die an den Stoßstellen der Fassadenelemente überlappen. Die nicht brennbare Edelstahlfassade in Verbindung mit den mit Wasser gefüllten Rinnen eliminiert somit die Notwendigkeit, geschossweise sichtbare Brandriegel vorzusehen. Es ist jedoch zu beachten, dass die baurechtlichen Vorschriften in den verschiedenen Bundesländern weiterhin geprüft werden müssen, da die Anforderungen für das Einbringen von Brandriegeln je nach Bundesland variieren können.

Des Weiteren ist es von Bedeutung die Gebäudeklasse zu berücksichtigen, in die die greenTES-Fassade eingestuft ist. Gemäß der Musterbaurichtlinie (Ausgabe 2, Stand Mai 2019) ist ab Gebäudeklasse 4 in der Hinterlüftungsebene ein Brandriegel aus mineralischer Steinwolle vorgeschrieben, der alle zwei Geschosse eingebaut werden muss. Es existieren verschiedene Systeme von verschiedenen Herstellern, die für diese Anforderung geeignet sind und verwendet werden können. Daher ist es ratsam, sich bei der Planung und Umsetzung der greenTES-Fassade über die spezifischen Vorschriften und Anforderungen im jeweiligen Bundesland zu informieren.

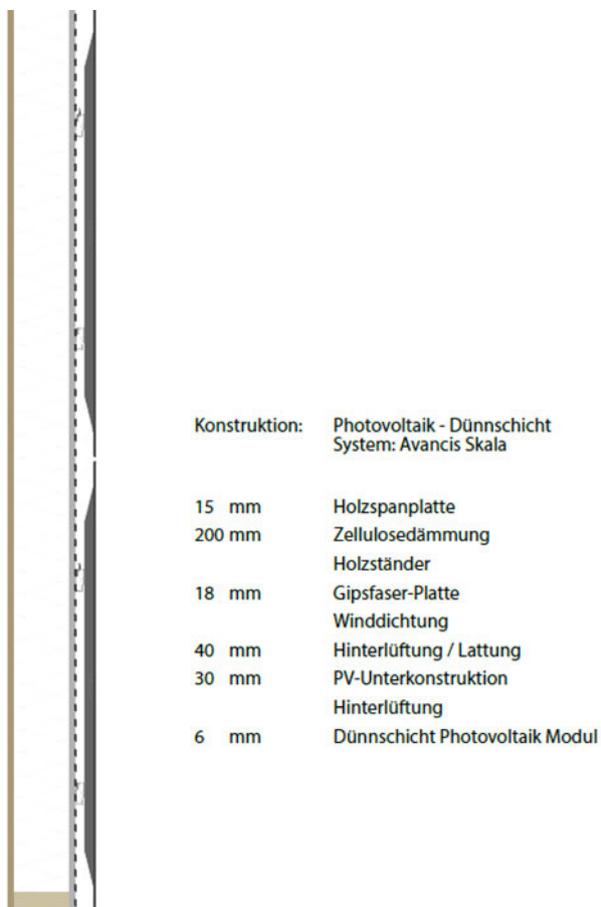
Die individualisierbaren Größen der Rinnensysteme, die in enger Abstimmung mit dem Hersteller gefertigt werden können, eröffnen Architekten und Planern vielfältige Möglichkeiten zur kundenspezifischen Gestaltung von Fassaden. Durch gezieltes Auslassen einzelner Rinnen, sowohl horizontal als auch vertikal, kann ein einzigartiges Fassadenbild kreiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass das grundlegende Überflussprinzip der Rinnensysteme beibehalten wird, oder es müssen maßgeschneiderte Lösungen gefunden werden, um eine ordnungsgemäße Entwässerung zu gewährleisten. Die Verbindung zwischen den einzelnen Elementen sollte idealerweise beibehalten werden, um die Stabilität und Funktionalität des Systems sicherzustellen. Zusätzlich ermöglicht die Auswahl verschiedener Bepflanzungsmöglichkeiten mit

unterschiedlichen Wuchshöhen und Blühphasen die Schaffung eines individuellen und saisonal wechselnden Fassadenbildes. Verschiedene Größen von Rinnen und Pflanzgefäßen können je nach gestalterischen Vorlieben eingesetzt werden. Dies ermöglicht es, verschiedene Rinnensysteme abwechselnd zu nutzen, um durch die variierenden Wuchshöhen der Bepflanzung ein abwechslungsreiches Erscheinungsbild der Fassade zu erzielen.

Es ist jedoch von Bedeutung, die unterschiedlichen Lasten zu berücksichtigen, die mit einem Wechsel der Rinnensysteme einhergehen können, um die strukturelle Integrität des Gebäudes zu erhalten. Des Weiteren ist bei der Planung und Auswahl der Pflanzen auf die erforderliche Wartung und Pflege der Begrünung zu achten um sicherzustellen, dass die Fassade dauerhaft ansprechend und funktional bleibt.

System 3: Photovoltaik-Fassade - AVANCIS Skala

Abbildung 26 Visualisierung Photovoltaik AVANCIS-Skala-System



Im weiteren Verlauf des Projektes und bei der Planung des Mock-Ups wird eine Integration der Photovoltaiksysteme der AVANCIS GmbH untersucht, dargestellt in Abbildung 26. Die Dünnschichtmodule werden durch ein eigens entwickeltes Backrail-System montiert. Diese Module verfügen bereits über eine vormontierte Vorrichtung, die es ermöglicht, die Module am vorinstallierten Gegenstück an der Fassade einzuhängen und abschließend zu sichern.

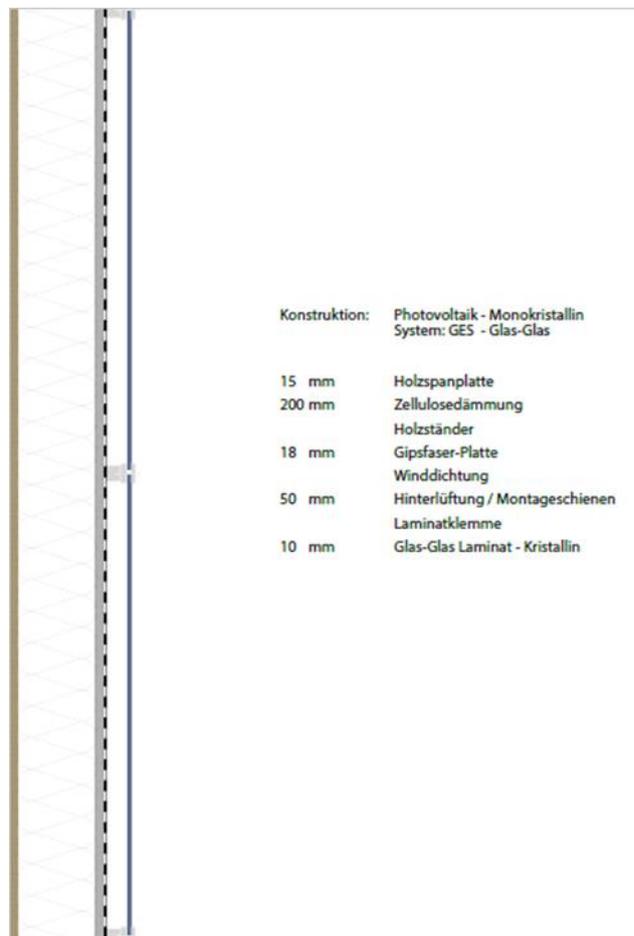
Die Montage des Systems erfolgt im Grundsatz ähnlich wie bei den meisten handelsüblichen Systemen, bei denen üblicherweise Montageschienen und Laminatklammern verwendet werden. Bei der Montage des von AVANCIS bereitgestellten Systems erfolgt zuerst die Montage eines Horizontalprofils zur Befestigung der Module. Der wesentliche Unterschied zu anderen handelsüblichen Systemen besteht darin, dass die Profile,

die an die Fassade montiert werden, bereits so vorgefertigt sind, dass lediglich ein Einhängen mittels Backrail erforderlich ist. Diese Variante eines Photovoltaiksystems ermöglicht somit eine sehr schnelle Anbringung der Systeme an der Fassade, ohne einen signifikant erhöhten Aufwand in der Vorfertigung zu generieren.

System 4: Photovoltaik-Fassade – GES – Glas-Glas-Module

Ergänzend zu den Modulen von AVANCIS werden kristalline PV-Module als Glas-Glas-Variante untersucht, dargestellt in Abbildung 27. Ein Vorteil der bereitgestellten Module liegt in ihrer Größenflexibilität, insbesondere in Bezug auf die Glas-Glas-Module. Der Hersteller fertigt diese nach den individuellen Vorgaben der Kunden in entsprechenden Abmessungen. Dies erweist sich als vorteilhaft im Kontext verschiedener Gebäudeabmessungen, die eine entscheidende Rolle in den Zielsetzungen des greenTES-Forschungsprojektes spielen. Die Vielfalt der Formate der Glas-Glas-Module ermöglicht eine flexible Anpassung an die variierenden Abmessungen der Gebäudehülle. Zudem eröffnen die unterschiedlichen Formate der Module ein breites Spektrum an gestalterischen Variationen, die sich auf das Gesamtbild der Fassade auswirken können. Somit können Fassaden sowohl mit kleinformatigen als auch großformatigen Modulen versehen werden.

Abbildung 27 Visualisierung mit GES-Photovoltaik



Die Montage der Glas-Glas-Module erfolgt mithilfe handelsüblicher Montageschienen und Montageklammern und ist daher herstellerneutral einsetzbar und montierbar. Zu beachten ist dabei, dass die bereitgestellten Lamine eine Stärke von 10 mm aufweisen. Dies führt dazu, dass die Auswahl an Laminatklammern auf diese Stärke beschränkt ist. Während des Forschungsprojektes ergaben sich einige Hindernisse, da handelsübliche Laminatklammern für Dünnschichtmodule in der Regel nur für Laminatstärken bis 8 mm zugelassen sind. Die

Module können daher nicht mit allen Herstellern von Laminatklemmen montiert werden. Zudem sind viele im Handel erhältlichen Klemmen erst wieder ab einer Stärke von 12 mm verfügbar. Daher ergibt sich, dass die Glas-Glas-Lamine eine Sonderstärke aufweisen, die bereits bei der Vorplanung und den daraus resultierenden Bestellungen berücksichtigt werden muss.

System 5: Fassade mit Selbstklimmern

Um das Verhalten von selbstklimmenden Pflanzen an einer hinterlüfteten sowie einer nicht hinterlüfteten Fassade zu untersuchen, wurde als zusätzliches fünftes System eine Fassade mit Selbstklimmern in das Mock-Up integriert. Das Ziel besteht darin, die Wuchseigenschaften von selbstklimmenden Pflanzen im Fugen- und Stoßbereich zu analysieren. Für die Untersuchung wurde Efeu als Pflanzenart ausgewählt, aufgrund seiner schnellen Wuchseigenschaften, guten Rankeigenschaften und anspruchslosen Pflegebedingungen. Darüber hinaus eignet sich Efeu aufgrund seiner Haftwurzeleigenschaften besonders gut für den Einsatz an Fassaden und wird bereits an vielen Gebäuden verwendet.

Die Haftwurzeln des Efeus ermöglichen es, in kleinste Ritzen an Fassaden einzudringen. Dies ist insbesondere im Stoßbereich des greenTES-Systems interessant, um das Verhalten des selbstklimmenden Efeus zu erforschen. Zudem wurde in die zu untersuchende Fassadenseite ein Fenster mit einer Rankbegrenzung aus Edelstahl eingebaut. Dies dient dazu zu untersuchen, ob sich der Efeu an Rankbegrenzungen orientiert oder diese überwindet. Es soll geklärt werden, ob der Efeu trotz einer installierten Begrenzung über diese hinauswächst und in Stoß- und Anschlussbereiche eindringt. Die gewonnenen Erkenntnisse über die Wuchseigenschaften sind Grundlage um Lösungen zu entwickeln, die das Eindringen in Spalten verhindern.

Darüber hinaus bietet die Fassade mit selbstklimmenden Pflanzen die Möglichkeit, troggebundene Systeme sowie Rinnensysteme im urbanen Raum zu ersetzen. In städtischen Gebieten ist der Platz, insbesondere im Erdgeschoss, oft begrenzt, und diese Bereiche werden oft vom Fußgänger- und Radverkehr frequentiert. In solchen Gebieten ist es häufig nicht möglich, troggebundene Systeme oder Rinnensysteme aufgrund des begrenzten Platzbedarfs umzusetzen. Die Verwendung von selbstklimmenden Systemen zur Fassadenbegrünung bietet hier eine praktikable Alternative.

Detaillösungen

Kabelführung

Zur Versorgung der in den Wandaufbau integrierten Systeme ist ein Anschluss an die Hausinstallationen notwendig. Da das gesamte TES-System als vorgefertigtes Modul montiert wird, ist eine Lösung erforderlich, die alle notwendigen Versorgungsleitungen im Rahmen der Vorfertigung bereits am Anwendungsort vorinstalliert. Die Anforderungen umfassen die Zugänglichkeit aller Leitungen für nachträgliche Installationen, die Behebung von Defekten innerhalb der Leitungssysteme sowie die Möglichkeit, Installationsleitungen im Zuge der Erreichung ihrer Lebensdauer ohne vollständigen Rückbau der Fassade austauschen zu können. Daher wird ein eigener Schacht für die Versorgung der verschiedenen Systeme vorgesehen. Diese Option bietet die Möglichkeit, Leerrohre für den Anschluss von Photovoltaiksystemen im Zuge der Vorfertigung einzuplanen und zu verlegen. Auf diese Weise können ab Werk eine Vielzahl von Varianten für die spätere Nutzung oder eine sich ergebende Umnutzung berücksichtigt werden, ohne das gesamte greenTES-Fassadensystem demontieren zu müssen. Darüber hinaus können bereits die Wasser- und Abwasserleitungen für die einzelnen Begrünungssysteme vorverlegt werden. Insbesondere bei der Verlegung der Wasser- und Abwasserleitungen bietet die Vorfertigung einen erheblichen Vorteil. Durch diese vorherige Installation ab Werk kann ein hoher qualitativer Standard erreicht und aufrechterhalten werden, um das Eindringen von Feuchtigkeit in die Bauteile zu verhindern. Im Falle von Schäden durch Leckagen im Schacht besteht die Möglichkeit, lediglich das vorgefertigte Schachtmodul auszutauschen, ohne gesamte Fassadenflächen demontieren zu müssen.

Anschlussdetails

In der weiteren Entwicklung werden spezifische Details für die Anschlussmöglichkeiten der Systeme an die vorgefertigten Holztafelelemente ausgearbeitet. Hierbei werden separate Bauteilfügungen für die Sockelbereiche, die Anschlussstellen zwischen den Elementen sowie für die Integration von Photovoltaikmodulen und Begrünungssystemen entwickelt. Zusätzlich sind detaillierte Ausführungen für die Attikabereiche erforderlich, um die verschiedenen Systeme harmonisch in die Fassade zu integrieren. Da das Ziel darin besteht, ein multifunktionales Fassadensystem zu entwickeln, das mit verschiedenen Systemen kompatibel ist, resultieren unterschiedliche Details. Bei der Ausarbeitung der Bauteilfügungen war es notwendig, Herstellervorgaben, Zulassungen und gesetzliche Vorgaben zu berücksichtigen. Alle Konstruktionsdetails sind in Anhang A.1 Detailzeichnungen der greenTES-Konstruktionsvarianten zu finden.

Elementstöße

Die Ausbildung der Elementstöße unterscheidet sich in vertikale Elementstöße und horizontale Elementstöße.

Vertikale Elementstöße

Im Kontext des Holztafelbaus werden vertikale Elementstöße in der Regel durch stumpfes Aneinandersetzen der betreffenden Holzelemente realisiert, gefolgt von einer mechanischen Fixierung mittels Verschraubung. Diese etablierte Verbindungsmethode, bekannt als stumpfer Stoß, zeichnet sich durch ihre Einfachheit und Effizienz aus. Sie impliziert, dass die Enden benachbarter Holzelemente flach aneinandergelegt werden, ohne die Notwendigkeit komplexer Aussparungen oder Schnitte. Die Sicherung dieser Verbindung erfolgt durch den Einsatz von mechanischen Befestigungsmitteln wie Schrauben oder Nägeln.

Die Tragfähigkeit und Stabilität dieser Verbindung beruht auf einer soliden mechanischen Fixierung, wodurch die Holzelemente zuverlässig miteinander verbunden werden. Obwohl keine speziellen Aussparungen erforderlich sind, kann das Vorbohren der Holzelemente vor der Verschraubung in Erwägung gezogen werden, um potenzielle Schäden an nicht sichtbaren Bereichen der Konstruktion zu verhindern und eine gleichmäßige Verschraubung zu gewährleisten. Die präzise Vorbereitung der Holzelemente für einen stumpfen Stoß ist von essentieller Bedeutung. Es ist unabdingbar sicherzustellen, dass die benachbarten Elemente auf derselben Höhe liegen, um einen exakten Stoßpunkt zu gewährleisten. Des Weiteren sollte darauf geachtet werden, dass die Stoßflächen beider Elemente gerade und eben sind, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern und potenzielle Schäden an der Konstruktion zu minimieren.

Der stumpfe Stoß stellt somit eine bewährte und effiziente Methode dar, um im Holztafelbau stabile Verbindungen zwischen vertikalen Elementen herzustellen. Bei seiner Anwendung ist jedoch stets auf präzise Vorbereitung und eine sorgfältige Ausführung zu achten, um eine dauerhafte und zuverlässige Verbindung sicherzustellen.

Horizontale Elementstöße

Die horizontalen Elementstöße im Rahmen des vorliegenden Konstruktionsprozesses werden durch die Verbindung einer geteilten Schwelle realisiert. Die Herstellung dieser Verbindung erfordert im Vorfeld die Anbringung einer Bauchbinde an der Gebäudeseite, um die vorgefertigten Holztafelelemente während der Montage mit der bestehenden Fassade zu verschrauben. Als Bauchbinde versteht man einen umlaufenden Richtbalken auf Höhe der Deckenstirnkante im Elementstoß, welcher dazu dient, die vorgefertigten Elemente an der Bestandswand zu verschrauben. Zudem wird die bestehende Außenwand des Gebäudes mit einer Ausgleichsschicht aus Mineralwolle versehen, um die Bildung von Hohlräumen und damit einhergehenden Wärmebrücken zwischen der bestehenden Außenwand und den vorgehängten Fassadenelementen zu verhindern.

Während des Montageprozesses wird zunächst das bauseitig bereitgestellte Element auf dem vorbereiteten Sockel oder einem vorbereiteten Stahlprofil verankert. Es ist zu beachten, dass die unterste Schwelle nicht wie die übrigen horizontalen Elementstöße mit einer geteilten Schwelle ausgestattet ist. Stattdessen wird sie auf die untere Elementschwelle aufgesetzt und mittels Verschraubung befestigt. Am oberen Elementstoß erfolgt

die Montage des Elements durch Verschraubung an der zuvor verankerten Bauchbinde an der vorbereiteten Fassadenseite.

Das nachfolgende Element, welches auf das bereits verankerte Element gesetzt wird, wird präzise an die halbierte Schwelle des darunterliegenden Elements positioniert. Durch das Halbieren der Schwelle im Stoßbereich rutscht das Element nahezu automatisch an die Schwelle des darunterliegenden Elements. Bei passgenauer Ausrichtung werden die beiden Elemente dann mittels mechanischer Verbindungsmittel, üblicherweise Vollgewindeschrauben, miteinander verschraubt. Diese Schrauben sind aufgrund ihrer Fähigkeit, hohe Querdruck- und Querkraftkräfte aufzunehmen, besonders geeignet. Darüber hinaus zeichnen sie sich durch einen hohen Gewindeauszugwiderstand aus, was eine effiziente Kraftübertragung gewährleistet.

Um eine angemessene Dimensionierung der greenTES-Elemente bereits während der Planungsphase zu gewährleisten, ist es von entscheidender Bedeutung, die eingesetzten Systeme entsprechend aufeinander abzustimmen. Sowohl die Begrünungssysteme als auch die Photovoltaikmodule sind in unterschiedlichen Größen vom Hersteller erhältlich. Daher ist es erforderlich, die Hersteller bereits in den frühen Planungsphasen in die Abläufe und Planungsprozesse einzubeziehen, um eine geeignete Strukturierung der greenTES-Fassadenelemente sicherzustellen.

Wandöffnungen

Die Umsetzung des greenTES-Projektes erfordert eine präzise Integration von Wandöffnungen in die einzelnen Elemente des Fassadensystems. Da das Gesamtsystem speziell für die Renovierung bestehender Gebäude entwickelt wurde, spielt die Integration bereits vorhandener Öffnungen wie Fenster oder Türen eine entscheidende Rolle. Die Planung der einzelnen Elemente erfordert Präzision, um diese Öffnungen nahtlos in die Konstruktion zu integrieren. Wie im Kapitel TES Energy Facade beschrieben, ist es unabdingbar, sämtliche Öffnungen, die in die Elemente integriert werden sollen, bereits während der Vermessung des zu sanierenden Gebäudes zu erfassen und in die zukünftige Planung einzubeziehen.

Es existiert keine universelle Lösung für die Integration von Fenstern, Türen oder anderen Öffnungen in die Elemente. Die Suche nach einer geeigneten Lösung erfordert die Berücksichtigung zusätzlicher Faktoren wie Statik, Tragfähigkeit, Energieeffizienz, Brandschutz, Barrierefreiheit sowie design- und ästhetische Aspekte. Die individuellen Gestaltungsmöglichkeiten, behördliche Vorschriften und die Vielfalt an auf dem Markt verfügbaren Systemen erschweren eine standardisierte Lösung.

Wenn Öffnungen in die Elemente integriert werden sollen, können diese bereits während der Vorfertigung präzise in die greenTES-Elemente eingebaut werden. Der Abbau der alten Fenster, die in der Bestandswand eingebaut sind, kann vor der Installation der greenTES-Elemente erfolgen. Es ist möglich, die Demontage nach der Montage der vorgehängten greenTES-Fassade durchzuführen. Dabei ist zu beachten, dass Fensterlaibungen und Fensterbretter nach der Montage der vorgehängten Fassade noch angebracht, angepasst und repariert werden müssen. Dies stellt sicher, dass keine sichtbaren Übergänge zwischen der Bestandswand und den greenTES-Fassadenelementen erkennbar sind. Darüber hinaus verhindert die nachträgliche Integration von innenliegenden Fensterbrettern und Laibungen das Eindringen von Feuchtigkeit in die entstandenen Spalte, die zwangsläufig bei der Montage entstehen. Die Arbeiten an den Fensterbrettern und Laibungen stellen sicher, dass nach der Durchführung einer energetischen Sanierung mit den greenTES-Fassadenelementen keine sichtbaren Spuren im Wohnraum zurückbleiben.

Mock-Up

Die Konzeption und Umsetzung des Mock-Ups dienen nicht allein der experimentellen Durchführung, sondern ermöglichen eine Analyse verschiedener Aspekte im Kontext der geplanten Fassadenkonstruktion.

Abbildung 28 Mock-Up greenTES in Binswangen



Die quaderförmige Konstruktion ermöglicht es, verschiedene greenTES-Konstruktionsvarianten an allen vier Fassadenseiten zu testen. Die Gesamtkonstruktion ist dabei so gestaltet, dass durch die Quaderform mit Bodenplatte und Dach ein Innenraumklima geschaffen wird. Dies erlaubt hygrothermische Messungen.

Die Variationen in der äußeren Verkleidung ermöglichen die Prüfung verschiedener Baustoffe und die Anpassbarkeit an unterschiedliche Fassadensysteme. Dieser Ansatz ist von großer Bedeutung, da moderne Bauprojekte nachhaltige und flexible Lösungen erfordern, die den sich ändernden Anforderungen und Umweltauflagen gerecht werden.

Die Untersuchung der Ausrichtung der verschiedenen Systeme am Mock-Up trägt zur Optimierung der Effizienz und Effektivität der Fassadenkomponenten bei. Dies ist besonders relevant für Grünanlagen an Gebäudefassaden, da die richtige Ausrichtung und Pflege entscheidend für das Wachstum und die Lebensdauer der Begrünungssysteme sind.

Die Erkenntnisse aus der Montagereihenfolge und dem bauseitigen Ablauf der Montage sind die Grundlage für eine reibungslose und kosteneffiziente Umsetzung des Fassadenprojekts. Grundriss sowie Schnittzeichnungen des Mock-Ups sind in Abbildung 29 bis Abbildung 31 dargestellt.

Die Entwicklung und Errichtung des Mock-Ups liefert wertvolle Erkenntnisse im Hinblick auf die Vorfertigung, die Montage von Fassadensystemen und die Anpassung an verschiedene Baustoffe und Systeme. Diese Erkenntnisse sind von Relevanz für die Planung und Umsetzung zukünftiger Fassadenkonstruktionen.

Abbildung 29 Grundriss Mock-Up (maßstabslos)

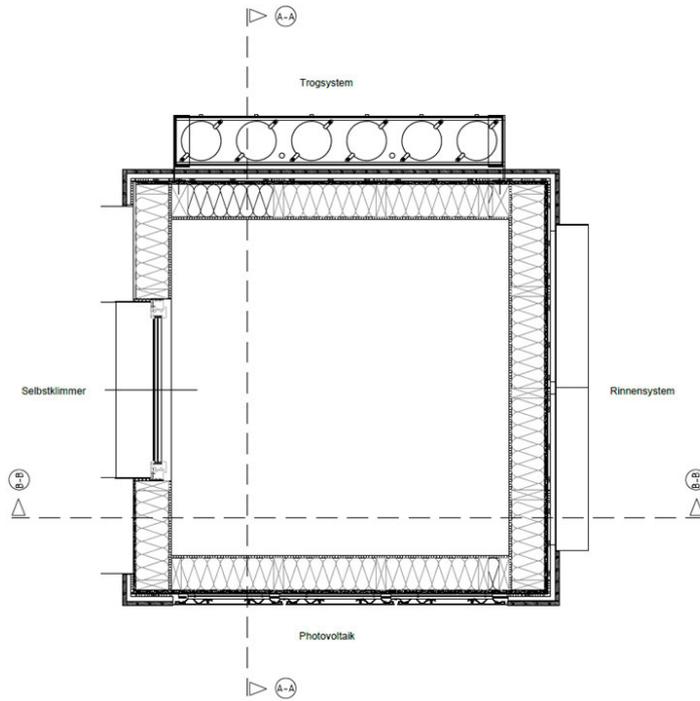


Abbildung 30 Schnitt A-A Mock-Up (maßstabslos)

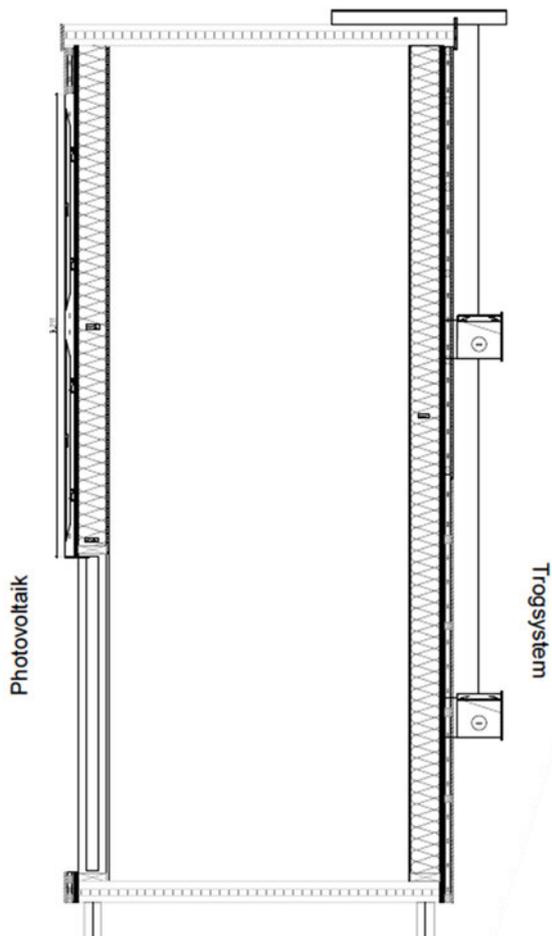
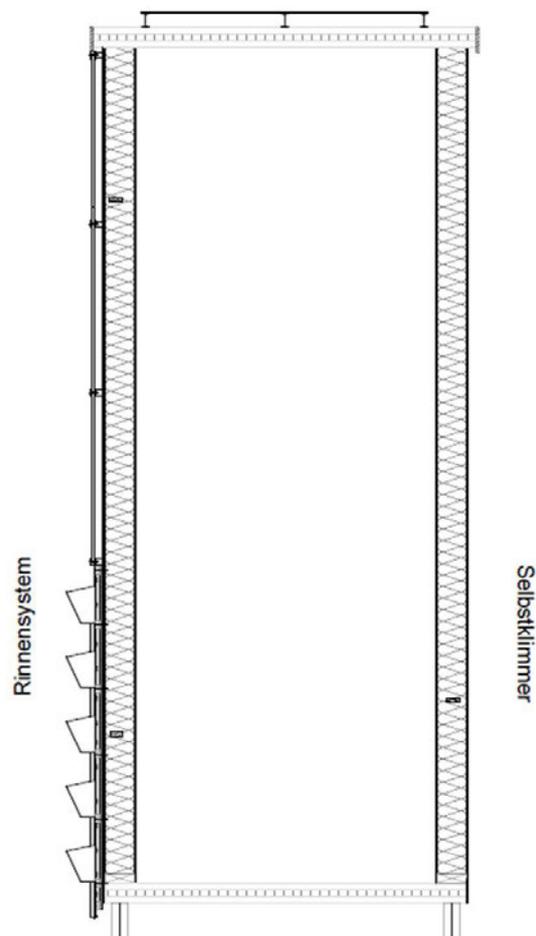


Abbildung 31 Schnitt B-B Mock-Up (maßstabslos)



Bauphysik

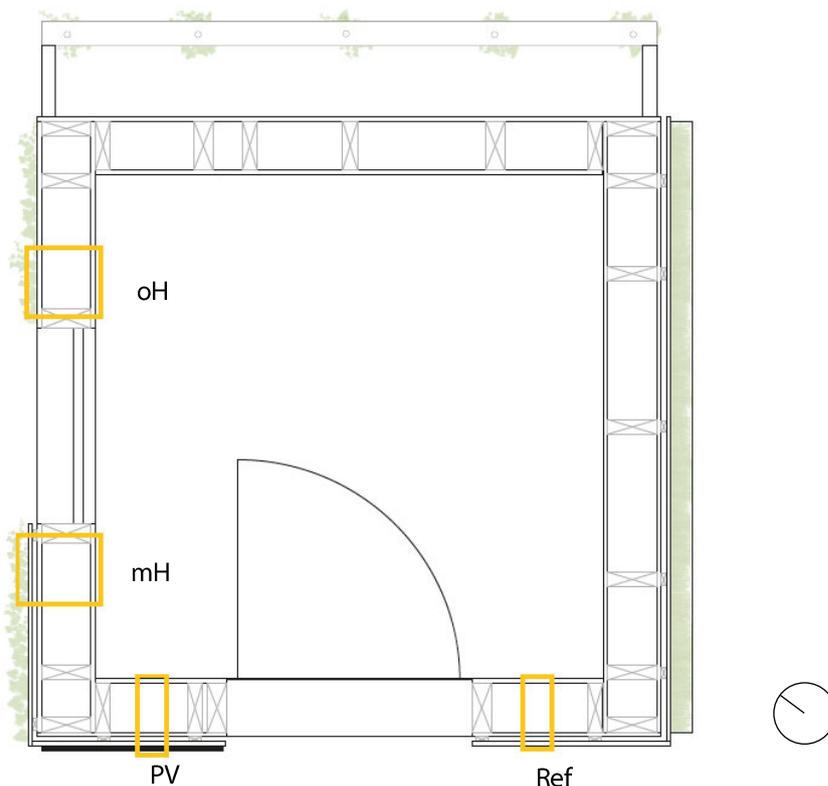
Das Kapitel Bauphysik teilt sich in die zwei Bereiche der messtechnischen und simulationsbasierten Untersuchung. Ziel ist es, die bauphysikalischen Wärme- und Feuchteeinwirkungen auf die energetisch und klimatisch aktivierte Holzkonstruktion zu analysieren und bewerten zu können.

Messtechnische Untersuchung

Beschreibung und Begründung des Messkonzepts

Für das Forschungsprojekt greenTES wurden sechs Wandaufbauten mit Fassadenbegrünung und Photovoltaik, welche in Abbildung 32 am Grundriss des Mock-Ups zu erkennen sind, erstellt. Die Beschreibung der Konstruktion ist im Kapitel greenTES Konstruktionsvarianten erläutert. Für das Messkonzept wurden die, am kritischsten zu erwartende Bauteile mit Messtechnik ausgestattet. Untersucht wird die Referenzfassade (Ref), welche als Fassadenbekleidung eine Nut-Feder-Schalung besitzt, eine Photovoltaikfassade (PV) mit Dünnschichtmodulen und die Selbstklimmerfassade mit (mH) und ohne (oH) Hinterlüftung.

Abbildung 32: Grundrissdarstellung der Positionierung der Messtechnik im Mock-Up



Die ausgewählten Konstruktionsvarianten wurden aufgrund ihrer Vergleichsmöglichkeit und der Aussicht auf praxisrelevante Erkenntnisse ausgewählt. Die Referenzfassade ist gemäß dem TES-Standard aufgebaut und befindet sich im unteren Bereich bis zu einer Höhe von 2,1 m. Die Sensoren sind innerhalb der Konstruktion und an der Fassade in einer Höhe von ca. 1,0 m bis 1,5 m über der Geländeoberkante positioniert. Direkt über der Referenzfassade befindet sich die PV-Fassade, hier wurden die Sensoren in einer Höhe von 3,0 m über der Geländeoberkante installiert. Hierbei wird der Effekt der PV-Anlage auf die Hygrothermik der Fassade geprüft und verglichen. Aufgrund vorangegangener Simulationsergebnisse, die auf eine potenziell kritische Feuchtelast des Bauteils hinweisen, liegt der Fokus auf der unbelüfteten begrünten Fassade. Zum Vergleich

wird die Fassade mit Hinterlüftung herangezogen. Anhand dieser beiden Varianten soll die hygrothermische Auswirkung der Begrünung auf die Holztafelkonstruktion analysiert werden. Dafür wurde die Nordwestfassade vertikal in drei Bereiche unterteilt. Im mittleren Bereich, entlang der Fensterbreite, wurde die Selbstklammer-Konstruktionsvariante mit Hinterlüftung implementiert. In den beiden angrenzenden Bereichen ist jeweils die Konstruktion ohne Hinterlüftung ausgeführt. Die Sensoren für die unbelüftete Fassadenkonstruktion sind auf der linken Seite in gleicher Höhe wie bei der Referenzfassade positioniert.

Auswahl und Ausführung der Messtechnik

Elektrische Widerstandsmessung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens des greenTES Projektes ist eine Langzeitmessung der Hygrothermik vorgesehen, wobei die Auswahl der Feuchtemessmethode eine hohe Robustheit über einen längeren Zeitraum gewährleisten muss. Das elektrische Widerstandsverfahren wurde gemäß [84] als geeignet für Langzeitmessungen und Monitoring-Konzepte identifiziert. Diese Methode zur Bestimmung der Holzfeuchte wurde bereits in früheren Forschungsprojekten erfolgreich angewendet [85], siehe [47, 86–88]. Neben seiner Eignung für Langzeitmessungen zeichnet sich das elektrische Widerstandsverfahren durch seine kosteneffiziente Implementierung aus. Mittels einfacher Werkzeuge können die Elektroden unkompliziert und mit hoher Genauigkeit eingebaut werden.

Das gewählte Verfahren weist einen Anwendungsbereich von 6 % bis 90 % Feuchtegehalt des Holzes auf [89] und bietet eine Genauigkeit von $\pm 1 \cdot 10^{\text{Log}(R)}$ [90] (siehe Tabelle 3). Diese Methode erweist sich als besonders geeignet für die zuverlässige Erfassung von Messdaten in Holztafelkonstruktionen. Um die Feuchtwerte aus den Widerstandsmessungen abzuleiten, ist die Verwendung einer spezifischen Kalibrierkurve für die Holzart – in diesem Fall Fichtenholz – erforderlich, welche in der Software des Unternehmens integriert ist. Wichtig ist anzumerken, dass das System empfindlich gegenüber elektrischen Störquellen ist. Dieser Unsicherheitsfaktor wurde während der Planungs- und Ausführungsphase durch wiederholte Rücksprache mit Herrn Mugrauer, dem Geschäftsführer von Scantronik Mugrauer GmbH, minimiert. [90]

Das elektrische Widerstandsverfahren wird verwendet, um die Feuchte im Holzständer zu messen. Als Elektroden kommen hierbei zwei Edelstahlschrauben zum Einsatz, welche eingebaut nach dem Vorbohren einen Sensor konstituieren. Auf glattschaftige Elektroden wird verzichtet, um das Risiko von Messausfällen durch Quell- und Schwindvorgängen zu reduzieren. Eine Isolierung am Schaft der Schraube dient dazu, eine präzise Erfassung der Holzfeuchte in der gewünschten Tiefe zu gewährleisten. Diese Schrauben werden in einem Abstand von 30 mm orthogonal zur Faserrichtung des Holzes positioniert. Der Durchmesser der Bohrung ist so abgestimmt, dass ein zuverlässiger Kontakt zwischen Elektrode und Holz gewährleistet wird. Die Schraubelektroden sind mittels abgeschirmter Koaxialkabel mit dem Feuchtemessgerät verbunden, und sämtliche Kabel der Holzfeuchtesensoren sind gebündelt und führen zum Messgerät.

Die eigentliche Messung erfolgt durch die Aussendung elektrischer Wellen zwischen dem Schraubenpaar, um den elektrischen Widerstand im Holz zu erfassen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Methode findet sich im Kapitel Hygrothermische Mess. Die erfassten Daten werden im Anschluss in die Holzfeuchte umgerechnet. Eine ausführliche Erläuterung dessen wird im Abschnitt Sensorbenennung und Datenumwandlung gegeben.

Hygroskopisches Verfahren

Zusätzlich zum elektrischen Widerstandsverfahren wird das sorptive Verfahren angewendet, um den Feuchtegehalt in der Dämmebene zerstörungsfrei messen zu können. Dabei wird die Feuchte des Materials indirekt über die Luftfeuchte innerhalb einer geschlossenen Kammer gemessen, die den Sensor umgibt. Es ist kein dauerhafter Kontakt zum Holz erforderlich. [85] Der Sensor wird innenseitig an der Beplankung positioniert. Gemessen werden die Holzfeuchte, die relative Luftfeuchte und die Oberflächentemperatur, sodass auf die absolute Feuchte und Ausgleichsfeuchte umgerechnet werden kann. Diese Messgrößen dienen für die Analyse der hygrothermischen Auswirkungen auf die Fassade. Die Anwendung dieses Verfahrens, ermöglicht analog zum elektrischen Widerstandsverfahren die Erfassung eines Gradienten über das Bauteil. Es

ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund seiner Sensibilität sowohl beim Einbau der Sensoren als auch aufgrund der Feuchteempfindlichkeit der Sensoren bestimmte Risiken bestehen. Diese potenziellen Gefahren wurden durch die Ummantelung der Sensoren mit Nylontextil und der Lagerung in einem Kunststoffgehäuse während des Einbaus sowie während des gesamten Messzeitraums minimiert.

Die Oberflächentemperaturmessung erfolgt durch das Anbringen von Temperatursensoren mittels klebendem Gewebepband an den jeweiligen Stellen. Zur Sicherstellung eines Wärmeübergangs zwischen dem Sensor und der Oberfläche und konstanter Messergebnisse wurde Wärmeleitpaste verwendet.

Anemometer-Messung

Ziel einer Hinterlüftungsebene ist, dass die auftretende Feuchtigkeit dort über die vorbeiströmende Luft abtransportiert wird. Der Luftwechsel in der Hinterlüftungsebene wird vornehmlich durch die Einwirkung des Winds auf die Fassade und den durch solare Einstrahlung bedingten thermischen Auftrieb beeinflusst, wobei diese Einflüsse nicht konstant sind. Die Messungen des Luftwechsels erfolgt mit dem Hitzedraht-Thermo-Anemometer KIMO VT 115 der Firma Sauer mann GmbH [91]. Dieses wird hinter der Fassadenbekleidung positioniert. Das Gerät misst den Volumenstrom und die Luftgeschwindigkeit. Zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit werden mit dem Handanemometer ein bis drei Datensätze gemessen. Anhand derer werden die durchschnittliche sowie minimale und maximale Geschwindigkeit eines Tages berechnet.

Ausführung der Messtechnik

Für die zuvor genannten hygrothermischen Messungen wurden spezifische Sensoren, Messinstrumente und Datenlogger [89, 92–95] eingesetzt. Eine Auflistung und die Konfiguration dieser Geräte sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Des Weiteren werden die Verkabelung des Messsystems sowie ergänzende Technik zur Erfassung der Luftströme in der Hinterlüftungsebene im weiteren Verlauf erörtert.

Die sieben Thermofox Universal-Geräte haben primär die Aufgabe, eine Vielzahl von Messdaten der angeschlossenen Instrumente zu erfassen und zu speichern. Innerhalb des speziell für das Forschungsprojekt konzipierten Messkonzepts kommen insbesondere das Materialfeuchte Gigamodul, der Universal HUB und der Multisensor zum Einsatz. Durch individuell positionierbare Elektrodenpaare und unterschiedliche Kabellängen ist eine flexible Anordnung der Feuchtemesspunkte möglich.

Die beiden Multisensor-Geräte erweitern die Funktionalität des Thermofox Universal und sind über ein Kabel mit diesem verbunden. Sie ermöglichen zusätzliche Messungen von bis zu acht weiteren Oberflächensensoren [93]. Diese Oberflächentemperatursensoren, klassifiziert als Standard-NTC-Temperatursensoren, variieren in ihrer Länge und sind in das greenTES-Messkonzept an verschiedenen Positionen wie Außen- und Innenwänden sowie innerhalb der Dämmung und der Hinterlüftungsebene integriert.

Die jeweiligen Messtoleranzen und Messgenauigkeiten wurden den Angaben auf der Webseite der Scantronik Mugrauer GmbH entnommen [89, 92, 94] und nach Rücksprache mit Herrn Mugrauer um die Toleranz des Gigamoduls erweitert [90].

Tabelle 9: Messtechnik im Projekt greenTES

Benennung Messgerät	Indikator	
Thermofox Universal	Speicherung von Messdaten und Temperaturmessung	 [89, 94]
Materialfeuchte Gigamodul	Ermittlung des elektrischen Widerstands	
Elektroden	Sensoren zur elektrischen Widerstandsmessung	 [89]
Thermo-Hygro-Sensor	Relative Feuchte und Temperaturmessung	 [95]  [93]
Universal HUB	Vierfach Erweiterung des Thermo-Hygro-Sensors	
Multisensor	Achtfach Erweiterung Temperatursensoren	
Oberflächentemperatursensor	Sensor zur Temperaturmessung	

Tabelle 10: Messgenauigkeiten der Messgeräte [89, 90, 94]

Messgerät	Einheit/Auflösung	Messbereich	Toleranzbereich
Thermofox Universal [94]	0,1 °C	-10 °C bis +50 °C	±1 °C
Materialfeuchte Gigamodul [89, 90]	0,1 10*Log(R)	<10 kOhm bis >100 GOhm	±1 10*Log(R)
Thermo-Hygro-Sensor [92]	T: 0,1 °C r. F.: 0,3 %	T: 25 °C r. F.: 30 % bis 80 %	T ± 1 °C r. F.: ± 4 %

Positionierung der Sensoren und Messgeräte

Der konzeptuelle Aufbau der Sensoranordnung ist in allen vier Bauteilaufbauten gleich, um eine konsistente Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Zusätzliche individuelle Messpunkte ergeben sich aufgrund der spezifischen Unterschiede zwischen den Varianten. Die Messstellen in den vier Wandaufbauten sind in Abbildung 33 dargestellt. Die Temperatursensoren sind zwischen den einzelnen Bauteilschichten positioniert. Zur Vergleichbarkeit sind die Sensoren an allen Seiten der Bauteile angebracht. Die Sensoren zur Messung in den Dämmschichten (Hygrosensoren) befinden sich an den angrenzenden Bauteilschichten in der Zellulosedämmung, da bei den Bauteilaufbauten oH und mH vor allem die Wechselwirkung hinsichtlich Feuchte in der Begrünung und im Bauteil betrachtet werden soll. Zur Vergleichbarkeit wurden die Sensoren in den Wandaufbauten PV und RF gleichermaßen eingebracht.

Bei allen Fassadenkonstruktionen mit Hinterlüftung wurde in ebenjener Ebene ein zusätzlicher Oberflächentemperatursensor montiert. In Abbildung 33 sind die Sensorpositionen für die beiden Begrünungsfassaden dargestellt. Dabei sind insgesamt vier bzw. fünf Oberflächentemperatursensoren an den hygrothermisch kritischen Stellen zwischen den einzelnen Schichten des Bauteilaufbaus angeordnet. Diese Sensoren ermöglichen die Erfassung eines Temperaturgradienten, der für die spätere Auswertung der Daten von Bedeutung ist. In der Abbildung sind des Weiteren die beiden Feuchte- und Temperaturfühler gekennzeichnet. Diese messen die relative Feuchte innerhalb der Dämmung. Außerdem sind die Elektrodenpaare des elektrischen Widerstandverfahrens zur Messung der Holzfeuchte dargestellt. Durch einen Höhenversatz der Paare zueinander kann ausgeschlossen werden, dass Messungenauigkeiten durch lineare Wärmebrücken auftreten. Da bei den greenTES-Elementen der anzunehmende Holzständerquerschnitt rund 200 mm auf 60 mm beträgt, wird davon ausgegangen, dass es nicht zu einer ungleichen Feuchteverteilung kommt. Daher wurden alle Elektrodenpaare mit einer Tiefe von 20 mm in die Holzständer eingebracht.

Abbildung 33: Positionierung der Sensoren in den Bauteilschichten; Bild 1: oH; Schnitt 2: mH; Schnitt 3: PV; Schnitt 4: Ref

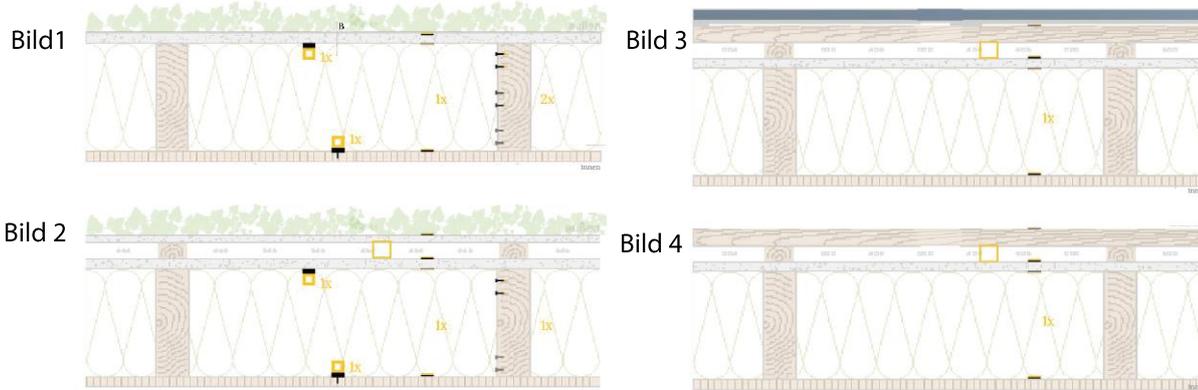


Abbildung 34: Sensorpositionen in den Bauteilaufbauten mit begrünter Fassade

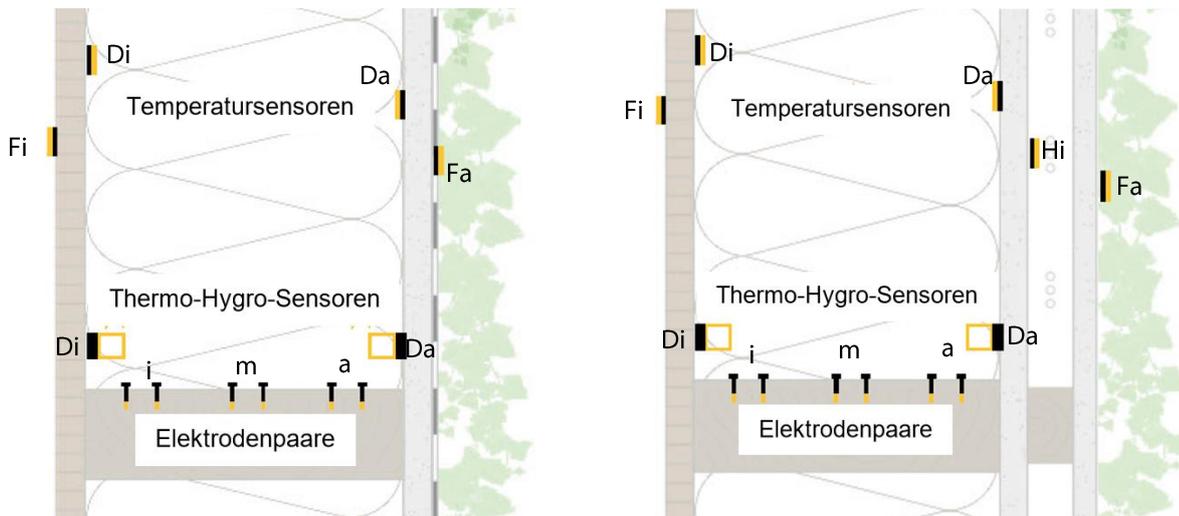
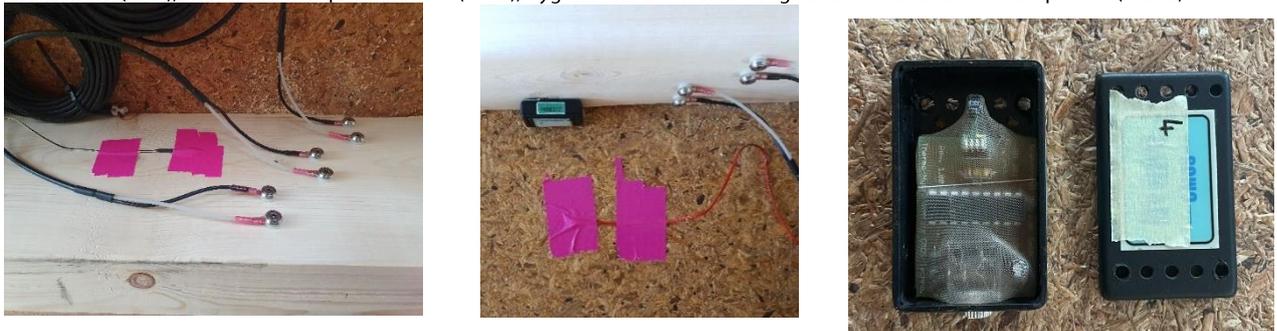


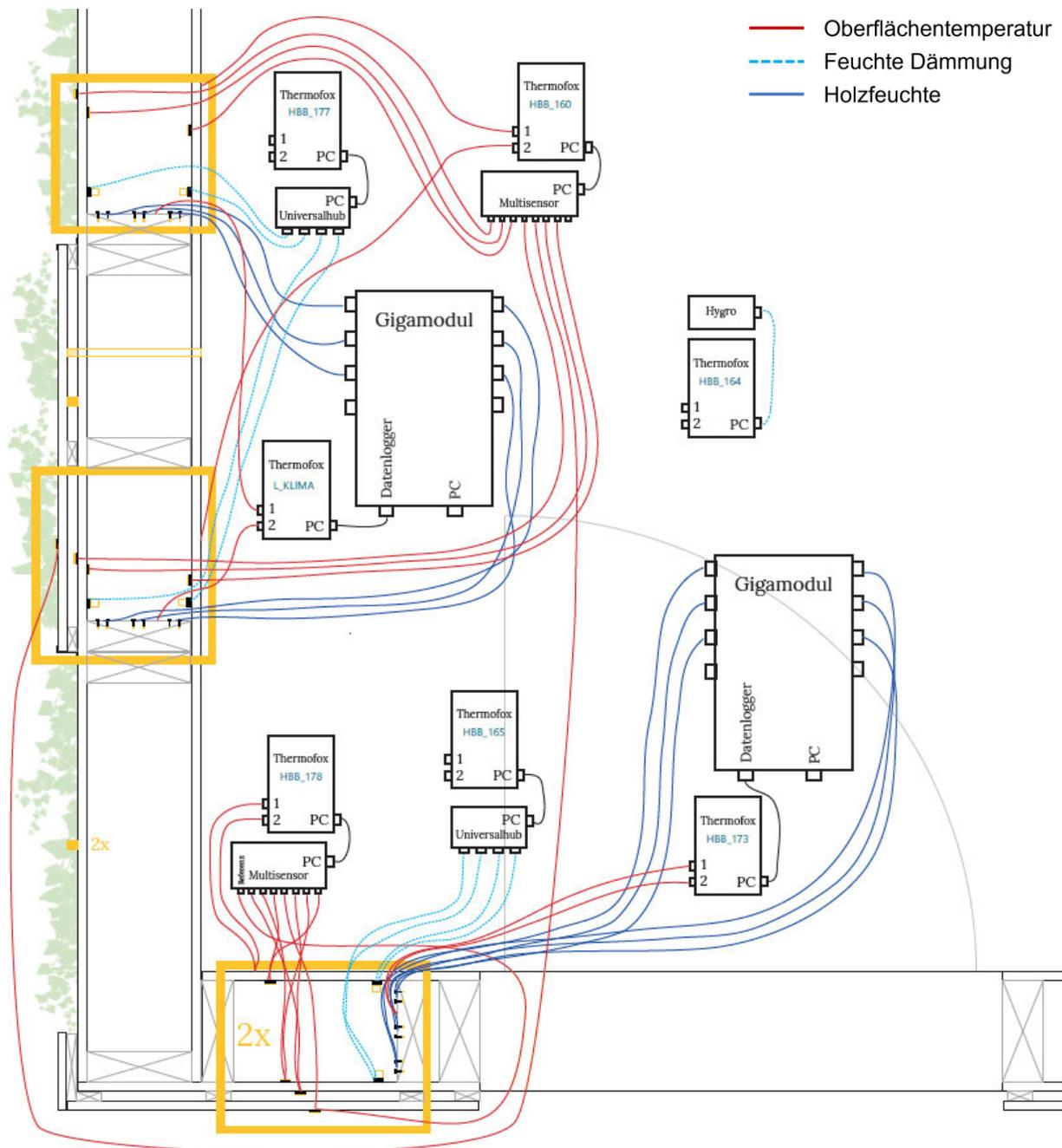
Abbildung 35: Eingebaute Messtechnik vor Befüllung mit Zellulosedämmung; Elektrisches Widerstandsverfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte (links), Oberflächentemperatursensor (Mitte), Hygrosensor zur Bestimmung der Dämmfeuchte und -temperatur (rechts)



Die Messtechnik innerhalb des Mock-Ups, einschließlich Datenlogger und anderer Geräte wurden in zwei separaten Behältnissen untergebracht. Diese sind vor Umwelteinflüssen geschützt sowie mit Silikat zur Absorption von Feuchtigkeit ausgestattet, um sicherzustellen, dass die Messtechnik vor Feuchte geschützt ist. Die Kabel zu den Geräten werden durch spezielle Durchführungen geführt.

Alle Geräte und Sensoren sind in Abbildung 36 in ein ganzheitliches Messkonzept integriert. Kabel zur Messung der Oberflächentemperatur sind in Rot dargestellt. Gleichmaßen sind die blau dargestellten Kabel für die Feuchtemessung vorgesehen. An der Südwestfassade ist die gleiche Messtechnik in unterschiedlichen Höhen eingebaut, da hier die Referenzfassade sowie die Photovoltaikfassade erfasst werden (vgl. Abbildung 36, Beschriftung „2x“). Der Thermofox HBB_164 misst zur Validierung der Ergebnisse die relative Luftfeuchte und Innenraumtemperatur.

Abbildung 36: Ausschnitt der im Grundriss dargestellten Verkabelung der Messtechnik inklusive Beschriftung der Datenlogger (Thermofox Universal)



Messzeitraum und Messintervall

Am 13.01.2023 wurde in den ungedämmten Holztafelwänden die Messtechnik installiert. Am selben Tag erfolgte die Implementierung der Verkabelung. Seit diesem Zeitpunkt erfolgt die Erfassung sämtlicher Messdaten in einem stündlichen Intervall. Dieser Prozess basiert auf den werkseitigen Konfigurationen der sieben Datenlogger, die eine Kapazität von insgesamt bis zu 64.000 Messwerten aufzeichnen und intern speichern können [94]. Aus der Literaturrecherche kann kein pauschales Messintervall festgelegt werden. Je nach Untersuchungsziel sind die Intervalle variabel (vgl. [47, 85, 96–98]).

Innerhalb des greenTES-Projektes wurde ein stündliches Intervall als optimal erachtet. Diese Wahl ermöglicht nicht nur die präzise Erfassung der täglichen Schwankungen von Feuchtigkeit und Temperatur, sondern erleichtert auch die Erzeugung einer übersichtlichen Datenmenge für nachfolgende Analysen. Aufgrund der vergleichsweise langsamen Veränderungen von Temperatur und Feuchtigkeit wurde von einem deutlich kürzeren Messintervall abgesehen. Die Daten werden in regelmäßigen Abständen von drei Wochen manuell ausgelesen, da keine Fernüberwachung des Messsystems implementiert wurde. Dieser Ansatz zielt darauf ab, das Risiko größerer Datenlücken aufgrund potenzieller Schäden oder Ausfälle der Geräte zu minimieren.

Zusätzlich zu den vorgesehenen Messungen erfolgt durch das manuelle Durchführen von punktuellen Anemometer-Messungen eine zusätzliche Datenerhebung zur Bewertung der Feuchteabfuhr in der Hinterlüftungsebene. Der Volumenstrom in der Hinterlüftungsebene wird durch Messungen alle zehn Sekunden über einen einminütigen Zeitraum mit dem Handanemometer erfasst und der Mittelwert berechnet.

Wetterdaten und zugrundeliegende Messtechnik

Die meteorologischen Daten, darunter Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung, schaffen eine realistische Darstellung der Umgebungsbedingungen am Messstand und sind Grundlage für die hygrothermische Analyse. Sie ermöglichen die Identifikation äußerer Belastungen, die auf das System einwirken, und charakterisieren Parameter, die Wärmeübertragung und Feuchtigkeitstransporte beeinflussen. Um präzise standortspezifische Wetterdaten zu gewinnen, wurde eine Wetterstation am Standort des Mock-Ups installiert. Obwohl der Rückgriff auf bestehende Messstationen den Vorteil einer potenziell zuverlässigen Quelle durch langjährige Erfahrung hat, war dies aufgrund der spezifischen lokalen Klimabedingungen in Binswangen nicht zielführend. Die bewusste Entscheidung, eine dedizierte Wetterstation zu nutzen, ermöglichte zwar die Integration eines Radiometers, führte jedoch zu technischen Problemen und einem Ausfall der Station während des Messzeitraums, wodurch keine Wetterdaten vor dem 08. Februar und im Zeitraum vom 19. März bis 12. Mai verfügbar sind. Der Datenlogger CR1000X von Campbell Scientific Ltd bildet das Grundgerüst des Datenerfassungssystems, das Wetterdaten über angeschlossene Sensoren aufzeichnet. Die Übertragung und Auslese der Wetterdaten erfolgt mithilfe der firmeneigenen Software PC400. An den Datenlogger sind verschiedene Messgeräte angeschlossen, darunter Thermometer, Hygrometer, Anemometer und Radiometer, die zusammen eine vollständige Wetterstation bilden. Tabelle 11 gibt einen Überblick über die gemessenen Parameter, ihre Einheiten und die Art der Wertermittlung. [99–101]

Tabelle 11: Messdaten der Wetterstation CR1000X von Campbell Scientific Ltd [99–101]

Parameter	Einheit	Intervall
Temperatur	°C	Stündlicher Mittelwert
Relative Feuchte	%	Stündlicher Mittelwert
Windrichtung	°	Einzelwert
Windgeschwindigkeit	m/s	Stündlicher Mittelwert
Kurzwellige Globalstrahlung	W/m ²	Stündlicher Mittelwert
Langwellige Strahlung	W/m ²	Stündlicher Mittelwert

Sensorbenennung und Datenumwandlung

Nach Bereinigung der Daten und Anpassung auf einen einheitlichen betrachteten Zeitraum wurden die Sensoren nach der Nomenklatur in Tabelle 12 benannt.

Abbildung 37: Abbildung der Sensorpositionen mit Benennung

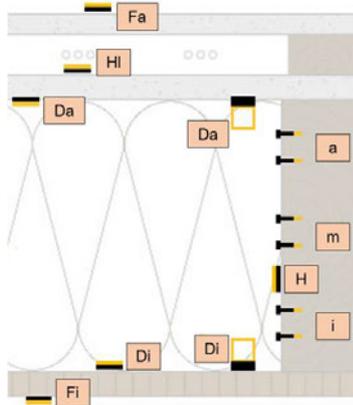


Tabelle 12: Nomenklatur der Sensorbeschriftung

Parameter		Konstruktionsvariante		Sensorposition	
T	Temperatur	oH	begrünte Fassade, ohne Hinterlüftung	H	Holzständer
HF	Holzfeuchte	mH	begrünte Fassade, mit Hinterlüftung	F	Fassade
FD	Feuchte Dämmung	Ref	Referenzfassade	D	Dämmung
TD	Temperatur Dämmung	PV	Photovoltaikfassade	HI	Hinterlüftungsebene
				a	außen
				m	mitte
				i	innen

Die Rohdaten der elektrischen Widerstandsmessungen zur Holzfeuchtemessung wurden umgewandelt in Masseprozent und eine Temperaturkompensation durchgeführt. Weiterhin wurde die Materialfeuchte der Zelluloseeinblasdämmung durch Sorptionsisothermen vom Unternehmen *ISOCELL* umgerechnet. (vgl. **Feuchteschutz im Holzbau**) Die Umrechnungen sind in den folgenden Abschnitten zu finden. Die Temperaturkompensation erfolgt in der Software der Messtechnik *SoftFOX*.

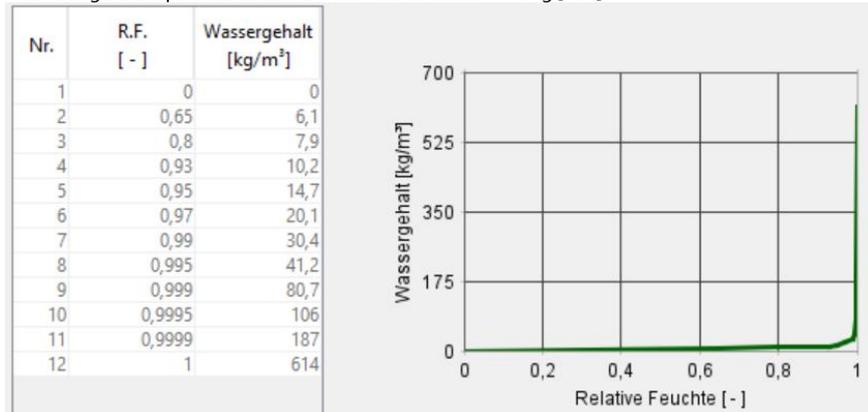
Die Holzfeuchte wird über das elektrische Widerstandsverfahren durch die elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und Dichte der jeweiligen Holzart bestimmt.

Der Stromfluss durch das Holz, welchen das Gigamodul zwischen den beiden Elektroden misst, kann durch das *Ohm'sche Gesetz* in den Widerstand (R) umgerechnet werden. [102] Die Einheit ist dabei $10 \cdot \log(R)$. Durch die mathematische Kurvenberechnung, die in der Software hinterlegt ist, kann aus den Werten die Holzfeuchte abgeleitet werden. Als Grundlage für die Umwandlung sind empirisch ermittelte Daten hinterlegt, mithilfe derer *SoftFOX* den gemessenen Widerstand interpoliert. Der beschriebene Prozess basiert auf einer konstanten Temperatur von 25 °C. Die tatsächliche Holzfeuchte wird über die Temperaturkompensation und den tatsächlich gemessenen Umgebungstemperaturen in der Software korrigiert. Zur Validierung der Messwerte werden die mit dem *Thermofox Universal* gemessenen Temperaturwerte am Holzständer herangezogen. Als Einschränkung muss hier die Sensorposition hervorgehoben werden: Für eine exakte Bestimmung der Temperatur am Messpunkt der Schraubelektroden in einer Tiefe von 20 mm müsste der Temperatursensor an der gleichen Stelle liegen. Zur Realisierbarkeit des Messkonzepts im Rahmen des

Forschungsprojektes wurde die Abweichung vernachlässigt. Die Temperatursensoren befinden sich an der Oberfläche des Holzständers. Ungenauigkeiten bei der ermittelten Holzfeuchte werden bei der Auswertung der Messdaten berücksichtigt. [89, 103]

Die Zellulosedämmung wird, nach Abgaben der einbauenden Firma Gump & Meier GmbH, mit einer Dichte von bis zu 60 kg/m^3 - siehe Tabelle 1 - in die Holztafelwand eingeblasen. Zur Berechnung des Feuchtegehalts der Dämmung wird die herstellereigenspezifische Sorptionsisotherme verwendet. Durch die Sorptionsisotherme in Abbildung 38 entsteht der Bezug zwischen relativer Feuchte und dem Wassergehalt der Zellulosedämmung. [104]

Abbildung 38: Sorptionsisotherme Isocell Zellulosedämmung [104]



Datenbereinigung und Datenlücken

Durch einen Verbindungsfehler des Datenloggers der Wetterstation nach der Inbetriebnahme sind Messdatenausfälle zwischen dem 19.03. und dem 12.05.2023 zu verzeichnen. Dies bedingt eine genaue Analyse der gemessenen Daten für die entsprechenden Zeitperioden. Die Wetterstation enthält unter anderem ein Radiometer, welches die kurzweilige Globalstrahlung gemessen hat. Da hier nachts negative Werte auftraten, wurden diese als Messfehler bereinigt.

Tabelle 13: Zeitliche Darstellung der Aufzeichnung der Wetterstation

Start	Ende	Anmerkung
25.01.2023 17:00	31.01.2023 10:00	bereinigte Radiometerdaten
31.01.2023 11:00	08.02.2023 12:00	Ausfall der Wetterstation
08.02.2023 13:00	19.03.2023 13:00	Lückenlose Aufzeichnung der Daten
19.03.2023 14:00	12.05.2023 08:00	Ausfall der Wetterstation
12.05.2023 09:00	20.07.2023 12:00	Lückenlose Daten bis zum Ende des hygrothermischen Messzeitraumes am 20.07.

Aufgrund der lückenhaften Datengrundlage und des nichtbeheizten Innenraums werden die Zeiträume ohne verfügbare Wetterdaten nicht in die Bewertung einbezogen.

Fehlende Datensätze aufgrund von Störungen oder Ausfällen werden als Lücken in den Ergebnissen visualisiert. Vereinzelt Ausreißer, die auf Störungen der Messgeräte zurückzuführen sind, werden durch Interpolation behandelt. Lücken, die über einen Zeitraum von zwei Stunden hinausgehen, bleiben unbehandelt.

Bei den Messdaten der Datenlogger, welche die Holzfeuchte über das Gigamodul und die zugehörige Oberflächentemperatur am Holzständer messen, wurden vereinzelt Ausreißer durch Interpolation korrigiert. Ein Anstieg von mindestens 0,3 M.-% im Zeitraum wird aufgrund der geringen Kapillarwirkung gegen die Holzfaserrichtung als signifikante Abweichung betrachtet. Des Weiteren konnten aufgrund der Inbetriebnahme des Wechselrichters für den Zeitraum vom 11.05. bis 15.06. tagsüber keine plausiblen Messwerte ermittelt werden. Alle Messwerte, die durch die elektrische Störung des Gigamoduls beeinträchtigt wurden, wurden datenbereinigt.

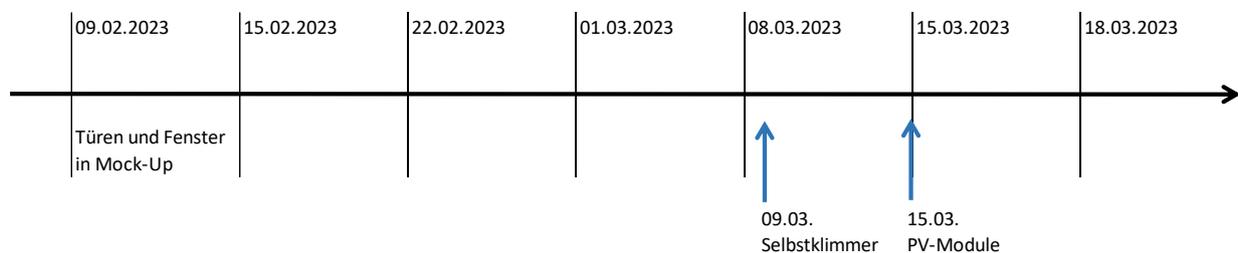
Die Inbetriebnahme der Photovoltaikanlage am 11.05.23 führte durch den integrierten Wechselrichter im System zu einer Störquelle. Dies beeinflusste die Daten des elektrischen Widerstandsverfahrens zur Holzfeuchtemessung der Referenz- und PV-Fassade. Der Einfluss der Störquelle erstreckte sich über die Länge der Sensorkabel, weshalb eine Umpositionierung des Wechselrichters keine Verbesserung, sondern lediglich eine Verlagerung der gestörten Messungen bewirkte. Nach Feststellung der Störquelle wurden alle Sensoren an der Photovoltaikfassade abgeschaltet. Ab Zeitraum 2 sind keine Messwerte der Holzfeuchte für die Photovoltaikfassade vorhanden.

Durch das Auslesen entstandene Lücken konnten entfernt bzw. interpoliert werden, ohne dass weitere Messungenauigkeiten festgehalten wurden.

Messergebnisse

Aufgrund der oben beschriebenen Datenausfälle werden die Messungen in zwei Zeiträumen ausgewertet.

Abbildung 39: Betrachtungszeitraum 1



Im ersten Zeitraum wurden die Messdaten von 09.02.2023 bis 18.03.2023 berücksichtigt. Hier wurden am 09.03.2023 die Selbstklimmer und am 11.03.2023 die Dünnschicht-Photovoltaikmodule installiert (vgl. Abbildung 39). Der erste Betrachtungszeitraum hat aufgrund der Länge eine eingeschränkte Aussagekraft. Weiterhin fungierte die Photovoltaikfassade bis zur Inbetriebnahme am 11.03. nur als wasserabführende Schicht und zur Verschattung der dahinterliegenden Konstruktion.

Die Legende in Abbildung 40 zeigt die Farbkodierung für die, im Folgenden dargestellten Messergebnisse der hygrothermischen Auswertung. Die Bezeichnung der Sensorposition erfolgt nach Tabelle 12.

Abbildung 40: Legende der Farbkodierung für die Auswertung der hygrothermischen Messergebnisse

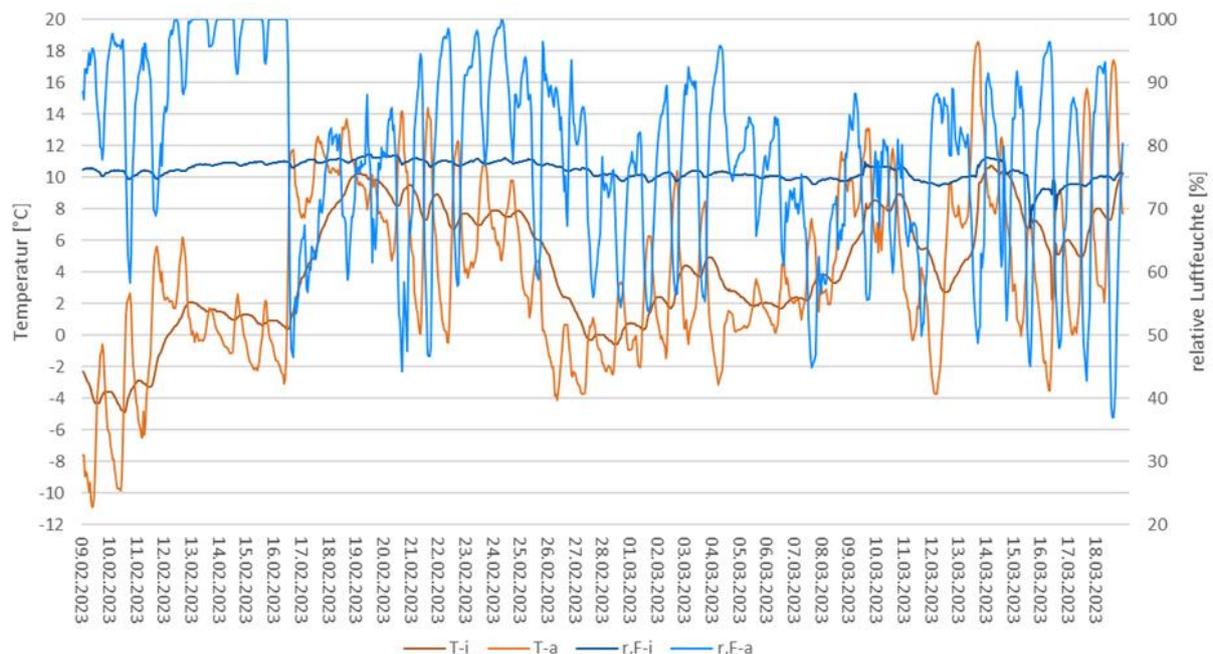
Ref	Orange	Blau	Grün
PV	Rot	Blau	Grün
mH	Rot	Blau	Grün
oH	Braun	Blau	Grün

Wetterdaten und Innenraumklima im ersten Betrachtungszeitraum

Im Weiteren sind die Verläufe der Innenraumtemperatur und -feuchte sowie der Wetterdaten einschließlich der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und der solarstrahlungsbezogenen Kurven aus den Messungen der Wetterstation dargestellt. Der Einfluss der Umgebungsbedingungen ist im Weiteren für die Auswertung der Ergebnisse relevant.

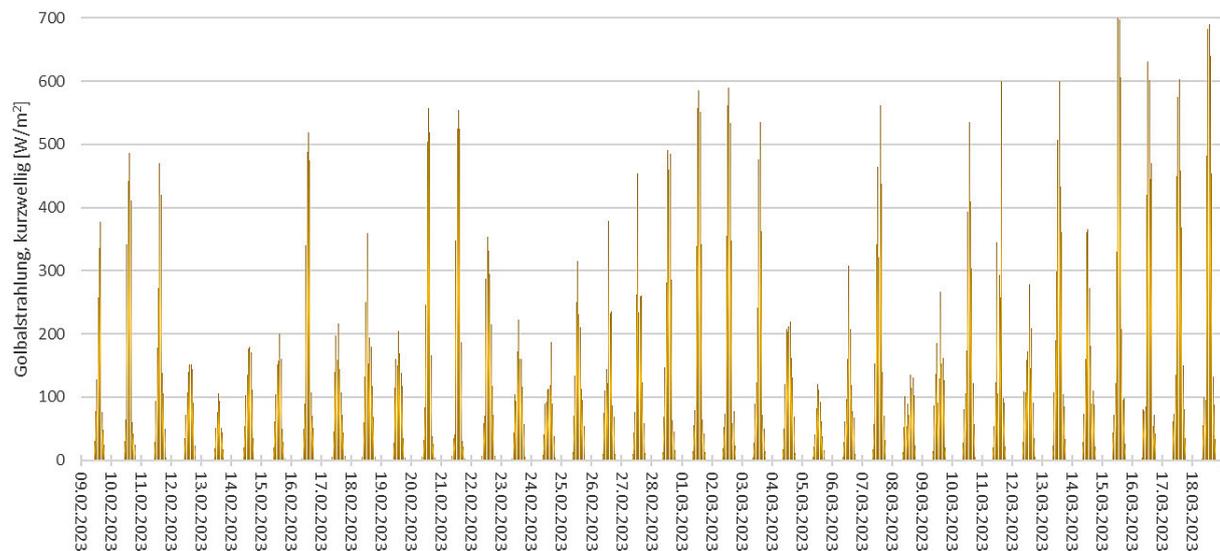
In den Temperatur- und relativen Feuchtedaten der Wetterstation in Abbildung 41 wird der physikalische Zusammenhang zwischen beiden deutlich. Ein Anstieg der Temperatur führt zu einem Rückgang der relativen Feuchte und umgekehrt. Beide Temperaturverläufe zeigen einen steigenden Trend und weisen eine durchschnittliche Differenz zwischen dem ersten und letzten Tag von 15,4 °C für die Außentemperatur und 11,9 °C für die Innenraumtemperatur auf. Die Außentemperatur reflektiert den saisonalen Trend. Die Innenraumtemperatur des Mock-Ups folgt der Außentemperatur mit einer Verzögerung von etwa zwei Tagen, was am Temperatursprung vom 17.02.2023 erkennbar ist. Die relative Feuchte im Innenraum bleibt konstant und weist einen Mittelwert von 76,0 % auf. Die konstante Innenraumfeuchte steht im Widerspruch zur Temperaturänderung. Daraus lässt sich schließen, dass die Messung der Innenraumfeuchte keine zuverlässigen Werte liefert. Die relative Luftfeuchte der Wetterdaten zeigt einen abnehmenden Trend mit einer Differenz von 18,2 % über den gesamten Zeitraum, was dem saisonal zu erwartenden Trend entspricht. Ab dem 09.03. weisen die Mittelwerte der Temperatur mit einem vernachlässigbaren Unterschied von 0,5 °C bei etwa 6,6 °C und die der relativen Feuchte durchschnittlich über 75,0 % auf.

Abbildung 41: Verlauf relative Luftfeuchte & Temperatur außen und innen im ersten Betrachtungszeitraum



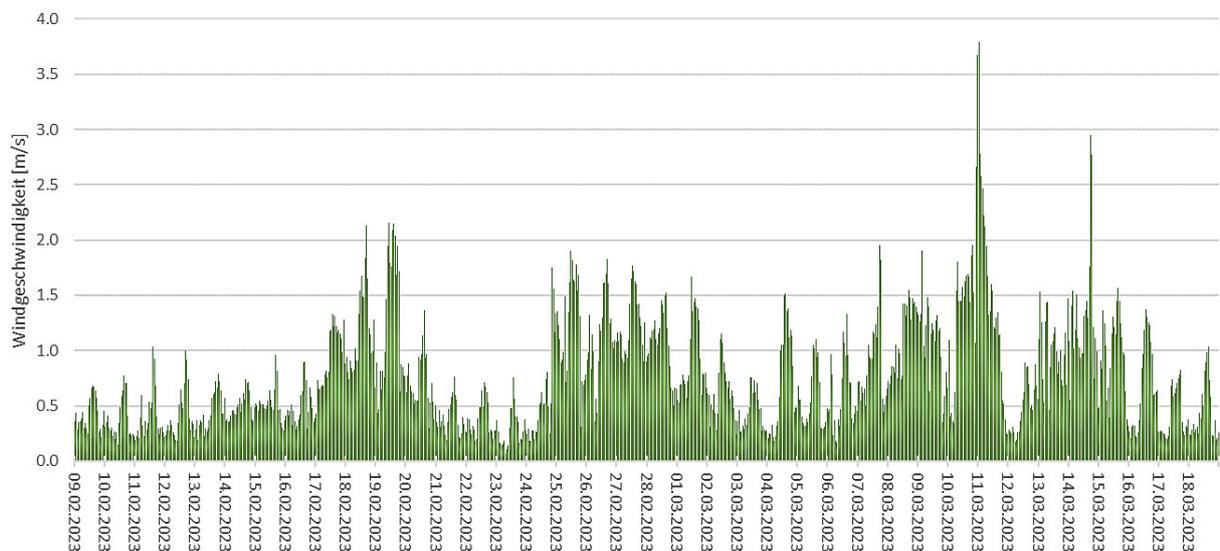
Die Darstellung der kurzweiligen Globalstrahlung ist in Abbildung 42 ersichtlich. Der Trend zeigt eine Zunahme der Strahlungsdaten mit einem maximalen Mittelwert von 144,5 W/m². Der durchschnittliche Mittelwert ab dem 09.03. beläuft sich auf 100,1 W/m².

Abbildung 42: Strahlungsdaten, kurzwellige Globalstrahlung ZR 1



Die Darstellung der Windgeschwindigkeit erfolgt in Abbildung 43 mittels eines Säulendiagramms. Über den gesamten Beobachtungszeitraum weist der Wind eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 0,78 m/s auf und kommt vorwiegend aus südlicher Richtung. Zwei Tage mit erhöhten Durchschnittswindgeschwindigkeiten waren der 11.03. mit 1,49 m/s und der 15.03. mit 0,89 m/s.

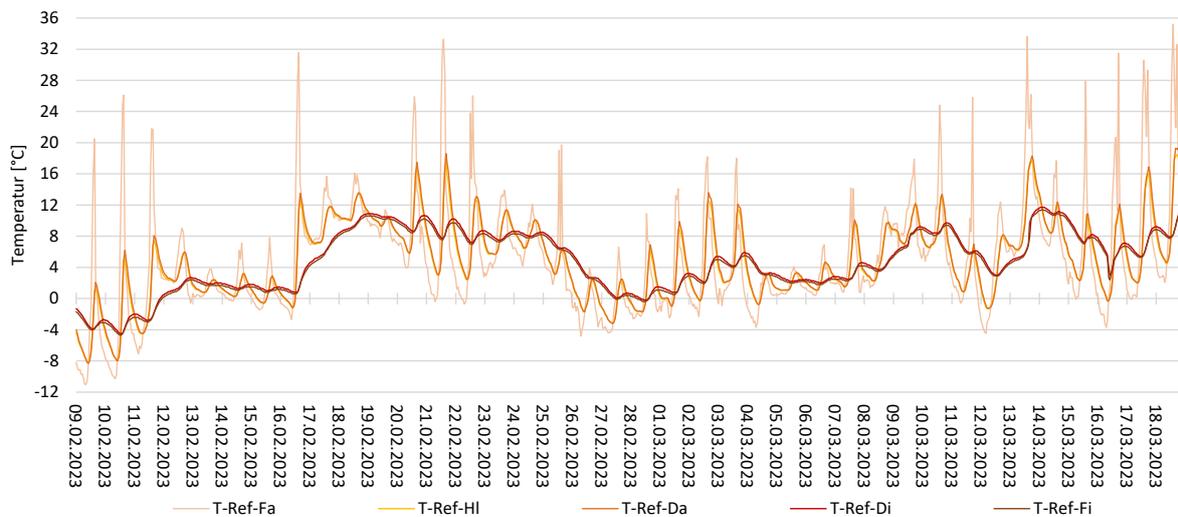
Abbildung 43: Windgeschwindigkeit in [m/s] ZR 1



Referenzfassade Zeitraum 1

Die hygrothermischen Messungen an der Referenzfassade ergeben in der ersten Beobachtungsperiode stimmige Daten. Dies ist insbesondere vor dem Kontext der südwestlichen Ausrichtung der Fassade und der resultierenden Verschattung durch das benachbarte Gebäude sowie durch die nahegelegenen Bäume, zu betrachten. Die Temperaturmessdaten illustrieren eine aufsteigende Tendenz von rund $14\text{ }^\circ\text{C}$ über den ersten Betrachtungszeitraum (siehe Abbildung 44).

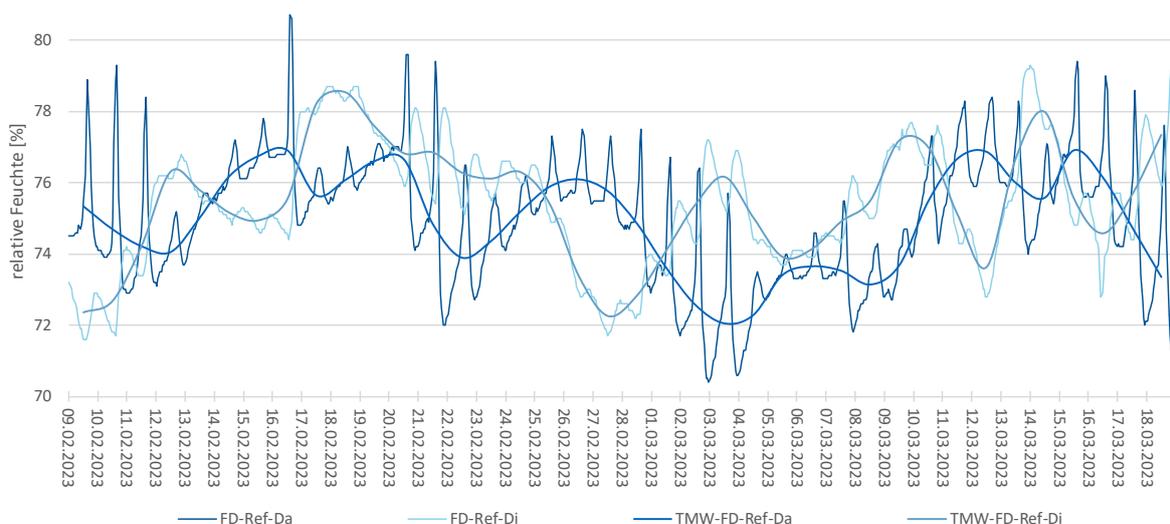
Abbildung 44: Messungen der Temperatur an der Referenzfassade



Hierbei weisen die Temperaturdifferenzen an der Position T-Ref-Fa mit 38,1 °C den maximalen Wert auf, während sie an der Position Fi mit 6,8 °C den geringsten erreichen. Eine Phasenverschiebung von etwa sechs Stunden über die gesamte Bauteiltiefe wird in den Messdaten ersichtlich. Die Berechnung des Mittelwerts ab dem 09.03. zeigt eine durchschnittliche Temperatur an den Bauteiloberflächen von 8,2 °C an der Position T-Ref-Fa und 7,5 °C an der Position T-Ref-Fi.

Die in der Dämmebene platzierten Thermo-Hygro-Sensoren zeichnen die Verläufe in Abbildung 45 der relativen Luftfeuchtigkeit (r. F.) innerhalb der Dämmebene auf. Deutlich wird eine gegenläufige Dynamik an den beiden Positionen (Da = außenseitig, Di = innenseitig), wobei die maximalen täglichen Spannweiten an der Position Da mit 7,5 % r. F. höher ausfallen im Vergleich zu den 4,4 % r. F. an der Position Di. Die Position Da reagiert dabei aufgrund der Nähe zum Außenklima sensibler auf wetterbedingte Einflüsse. Bei der Gegenüberstellung der Mittelwerte zeigt sich eine geringe Abweichung von $\pm 0,5$ % zwischen den beiden Messreihen. Diese pendeln sich bei etwa 75 % r. F. ein.

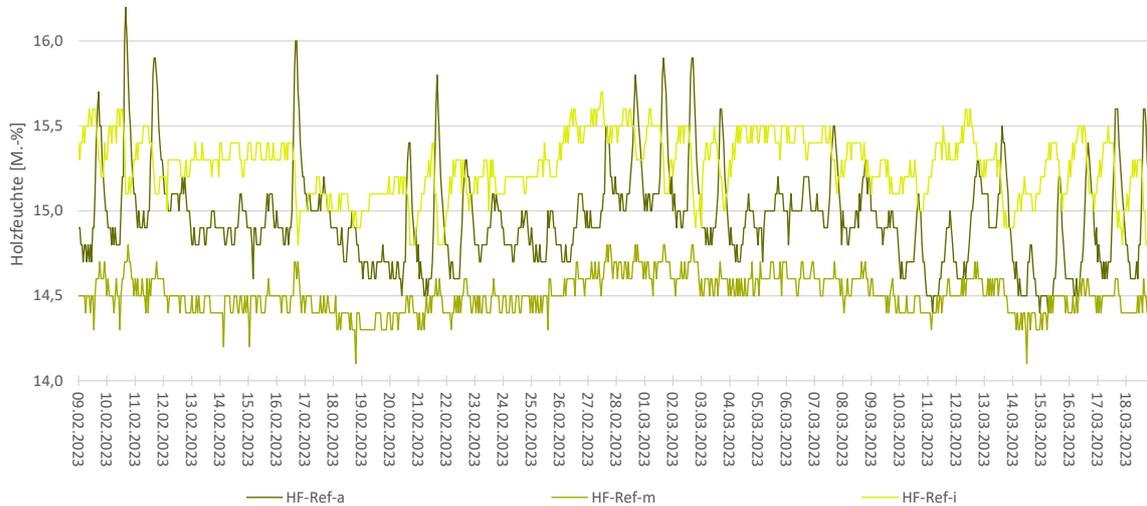
Abbildung 45: Messungen der relativen Feuchte in der Dämmung der Referenzfassade



Die Untersuchung der Holzfeuchte in Abbildung 46 ergibt durchschnittliche Mittelwerte von $14,9 \pm 0,4$ M.-% über den gesamten Beobachtungszeitraum an allen drei Positionen. Dabei fällt auf, dass Position HF-Ref-m mit

14,5 M.-% den niedrigsten Wert aufweist. Dies ist auf vergleichbare und durchschnittlich etwa 4,0 °C kalte klimatische Einflüsse von innen und außen zurückzuführen.

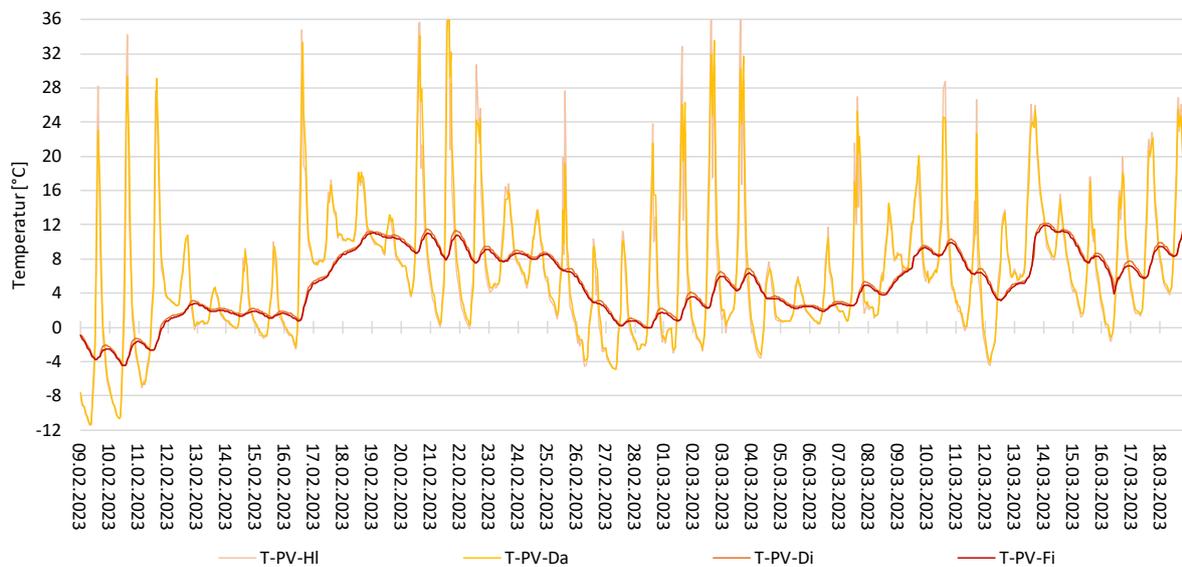
Abbildung 46: Holzfeuchtemessungen der Referenzfassade



Photovoltaikfassade, Zeitraum 1

Die Datenaufzeichnungen der Oberflächentempersensoren entlang der PV-Fassade in Abbildung 47 zeigen einen beständigen Anstieg über den gesamten ersten Erfassungszeitraum. Bei einem Vergleich mit den Temperatur- und kurzwelligen Strahlungsdaten der Wetterstation lassen sich plausible Messergebnisse ablesen. Insbesondere an sonnigen Tagen wird der Einfluss der solaren Strahlung durch Temperaturdifferenzen von bis zu 44,9 °C an Position T-PV-HI deutlich. Der Sensor an dieser Position, der bis zur Installation der Module am 15.03. am äußersten Punkt der Fassade angebracht ist, zeigt vor Installation am 21.02. absolutes Maximum von 40,2 °C. Die durchschnittlichen täglichen Mittelwerte (TMW) ab dem 15.03. belaufen sich auf 8,4 °C an Position HI und 7,9 °C an Position Fi. Die durchschnittlichen täglichen Spannweiten betragen 20,7 °C (HI) bzw. 3,6 °C (Fi).

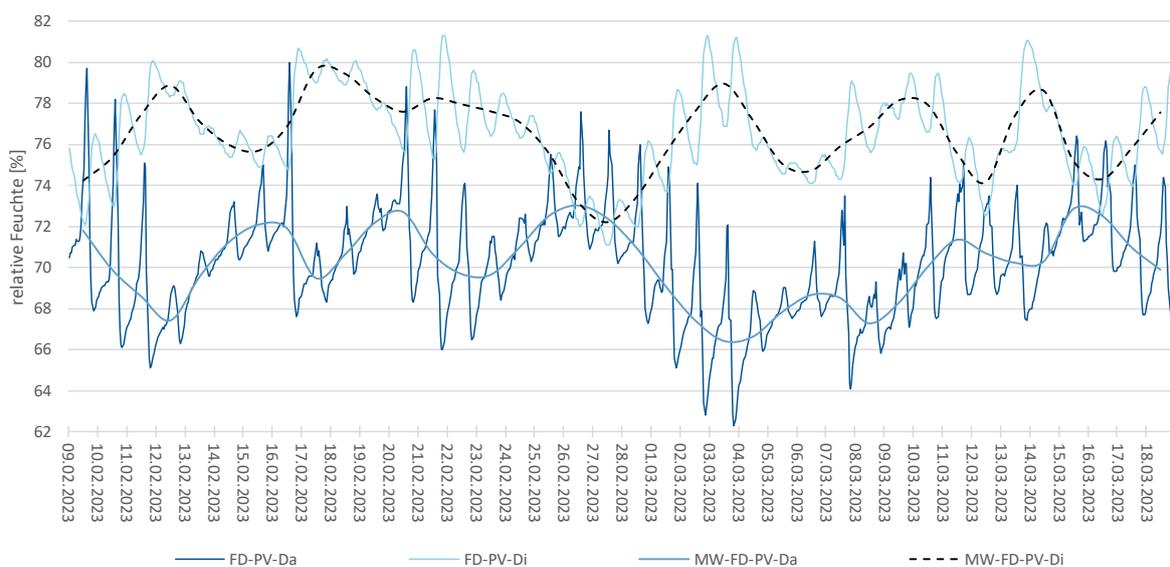
Abbildung 47: Messungen der Temperatur an der Fassade mit PV



Die Erfassung der relativen Feuchtedaten in der Dämmebene verdeutlicht in Abbildung 48 über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg eine Differenz von 6,4 % zwischen den Mittelwerten der äußeren (Da) und inneren (Di) Messpositionen. Insbesondere fällt auf, dass die Position Di mit einem durchschnittlichen Wert von 76,5 % r. F. einen höheren Feuchtigkeitsgehalt aufweist. Ab dem 15.03. zeigen diese beiden Positionen durchschnittliche tägliche Mittelwerte (TMW) von 71,6 % (Da) und 75,7 % (Di). Bei der Analyse der täglichen Spannweiten nach dem Einbau der PV-Module wird deutlich, dass die relative Feuchte an Position Di mit 4,1 % geringere Schwankungen aufweist im Vergleich zur Position Da mit 6,5 %.

Es ist zu beachten, dass vor dem Einbau der Module aufgrund des Fehlens einer ersten wasserabführenden Schicht der Niederschlag direkt über die dampfdiffusionsoffene Bahn abgeführt wurde. Solche Niederschlagsereignisse führen auch an Position Da zu hohen Tagesmaxima von knapp 80 % relativer Luftfeuchte.

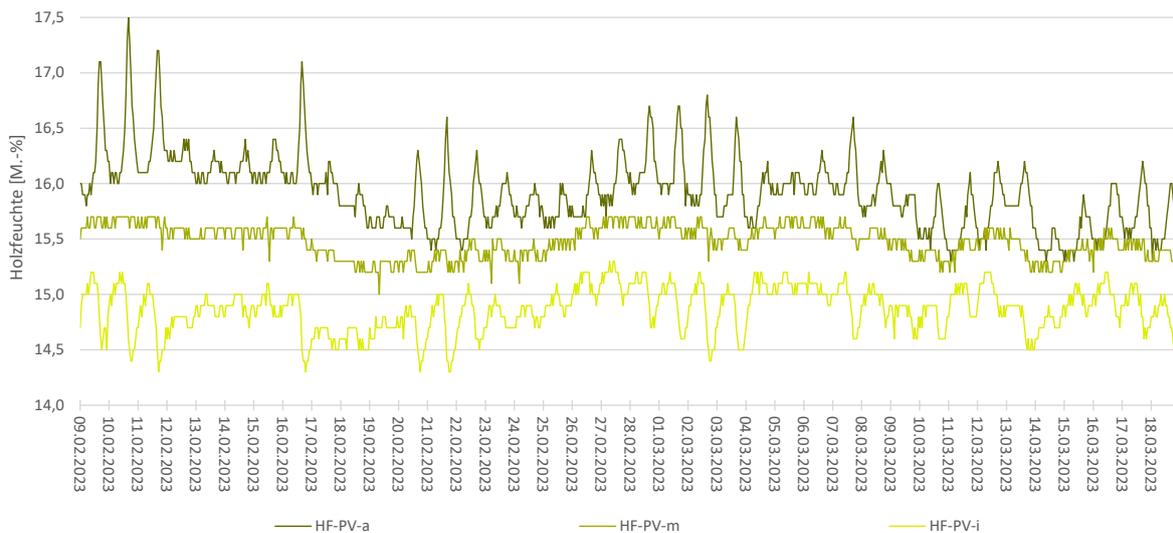
Abbildung 48: Messungen der relativen Feuchte in der Dämmung an der Fassade mit PV



Über den gesamten Verlauf der ersten Untersuchungsperiode zeigt die Holzfeuchtemessung in Abbildung 49 einen abnehmenden Trend entlang der Holzständertiefe. An Position HF-PV-a liegt die Holzfeuchte bei 15,9 M.-%, was im Vergleich zu Position HF-PV-i mit 14,9 M.-% einen Anstieg um 1,0 M.-% darstellt. Bei Betrachtung der Feuchtedaten zeigt sich eine tendenziell steigende Holzfeuchte, während die relative Feuchte abnimmt. Diese Entwicklung resultiert aus dem sorptiven Feuchteausaustausch, bei dem der Holzständer Feuchtigkeit aus der Dämmung aufnimmt. Die diffundierende Feuchtigkeit verteilt sich in der Dämmebene und wird zudem vom Holzständer absorbiert.

Bei der Analyse ab dem 15.03., dem Zeitpunkt des Einbaus der PV-Module, zeigt sich zwar ein identischer Durchschnittswert an Position HF-PV-i, jedoch eine geringere Holzfeuchte an Position HF-PV-a mit 15,6 M.-%.

Abbildung 49: Holzfeuchtemessungen der Fassade mit PV

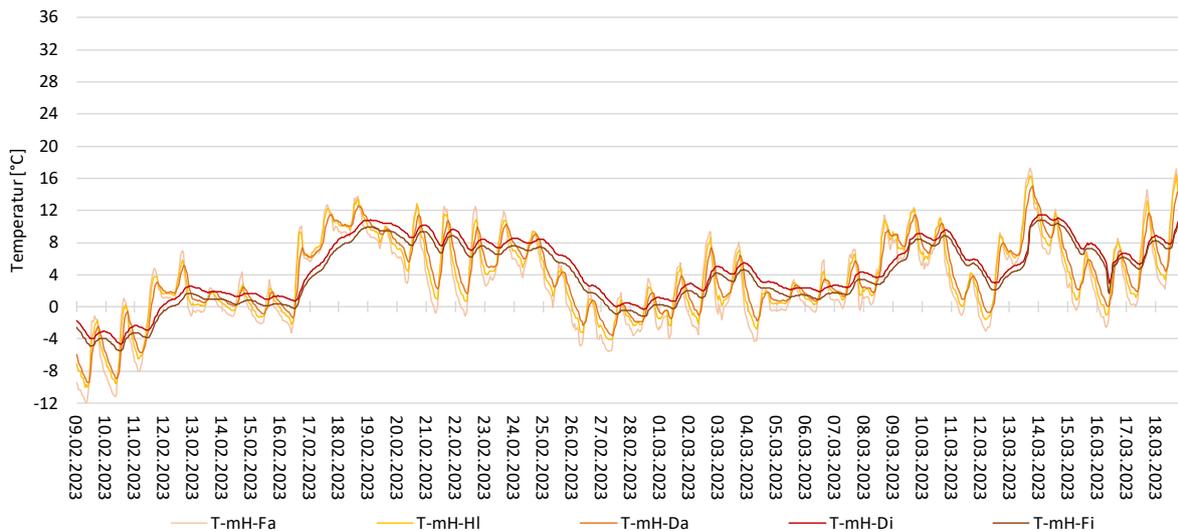


Selbstklimmer-Fassade, hinterlüftet, Zeitraum 1

Über den Messzeitraum ist ein stetiger Anstieg der Oberflächentemperatur an allen Positionen der hinterlüfteten begrünten Fassade zu erkennen (vgl. Abbildung 50). Dies resultiert in einem Temperaturunterschied von 15,6 °C an Position Fa und 12,5 °C an Position Fi über die gesamte Dauer der Untersuchung. Im Vergleich zur Außen- und Innenraumtemperatur beträgt dieser Unterschied im Durchschnitt lediglich 0,4 °C, was auf die höhere Wärmeleitfähigkeit der Beplankungsoberflächen im Vergleich zur Luft zurückzuführen ist.

Ab dem 09.03., nach der Bepflanzung der Northwest-Fassade mit selbstklimmendem Efeu, ergeben sich durchschnittliche tägliche Mittelwerte (TMW) von 5,7 °C an Position T-mH-Fa und 6,8 °C an Position T-mH-Fi. Die niedrigere Temperatur an der Außenfassade ist auf die orientierungsbedingte, reduzierte direkte solare Einstrahlung zurückzuführen. Diese zeigt sich ebenso in den berechneten täglichen Temperaturspannweiten an Position T-mH-Fa mit durchschnittlich 10,2 °C für den ersten Zeitraum.

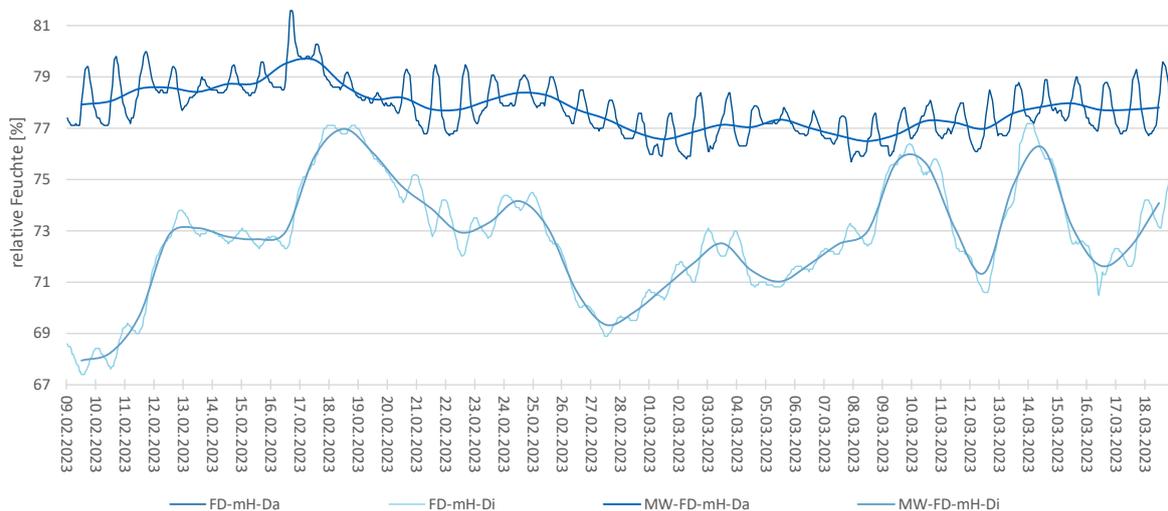
Abbildung 50: Messungen der Temperatur an der Fassade mit Begrünung mit Hinterlüftung



Die in Abbildung 51 gemessene relative Feuchte in der Dämmebene weist einen durchschnittlichen Unterschied von 5,0 % zwischen den beiden Positionen über den gesamten Zeitraum auf. Dabei zeigt die Position FD-mH-Da mit einem höheren Mittelwert von 77,8 % r. F. eine Abweichung.

Für den Zeitraum ab dem 09.03. zeigen die durchschnittlichen täglichen Mittelwerte Werte von 77,5 % (Da) und 73,8 % r.F. (Di). Der maximale Wert von 81,6 % r.F. tritt an Position FD mH Da auf. Es sei darauf hingewiesen, dass zu diesem Zeitpunkt keine Begrünung an der Fassade existiert, wodurch der Niederschlag ohne die wasserabführende Schicht der Efeu-Blätter auf das Aquapanel trifft.

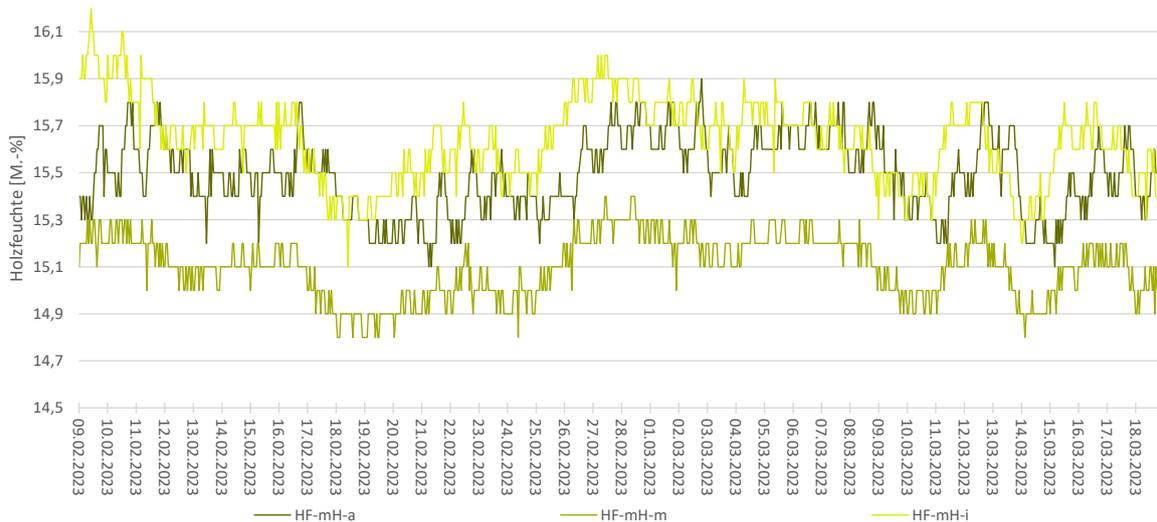
Abbildung 51: Messungen der relativen Feuchte in der Dämmung an der Fassade mit Begrünung mit Hinterlüftung



Die höchsten Mittelwerte für die Holzfeuchte ergeben sich an Position HF-mH-i mit 15,6 M.-%, während die niedrigsten Werte an Position HF-mH-m mit 15,1 M.-% zu verzeichnen sind (vgl. Abbildung 52). Das bedeutet, dass der Holzständer in der Mitte am trockensten ist. Ein kontinuierlich abnehmender Trend über den gesamten Zeitraum hinweg ist erkennbar, wobei die Differenz zwischen dem ersten und letzten Messtag lediglich 0,3 M.-% beträgt.

Die Untersuchung des Zeitraums ab dem 09.03. zeigt geringfügige Unterschiede in den täglichen Mittelwerten der Positionen, mit 15,1 M.-% an Position HF-mH-m und 15,5 M.-% an Position HF-mH-i. Der in DIN 68800-1 [25] festgelegte Grenzwert von 20 M.-% wird nicht überschritten. Somit besteht für den betrachteten Zeitraum kein Risiko für Schimmelpilzbildung im Holzständer dieser Konstruktionsvariante.

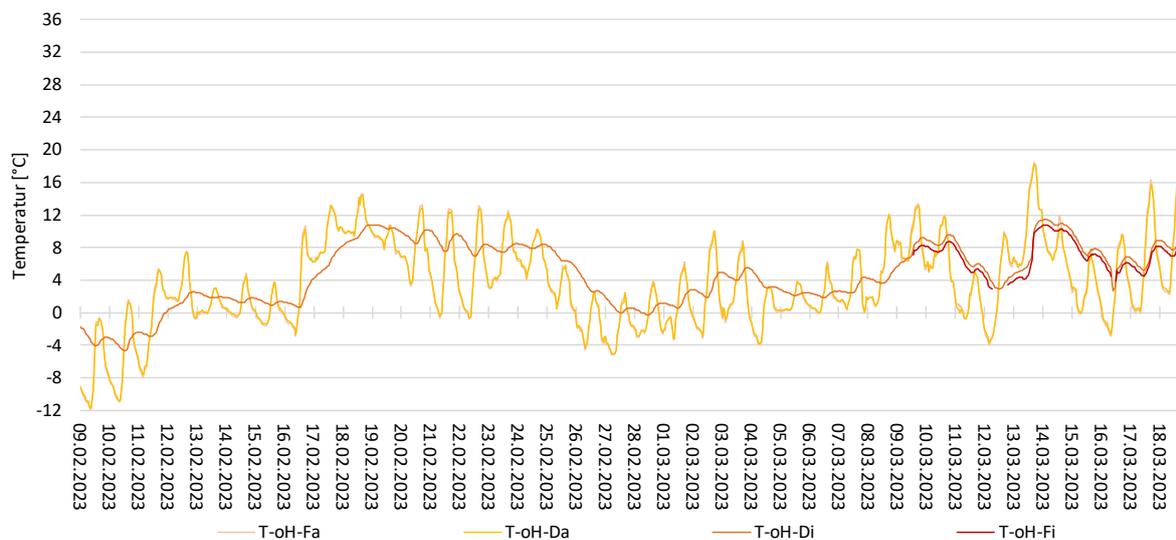
Abbildung 52: Holzfeuchtemessungen der Fassade mit Begrünung mit Hinterlüftung



Selbstklimmer-Fassade, nicht hinterlüftet, Zeitraum 1

Die Temperaturmessungen in Abbildung 53 an der begrünten Fassade ohne Hinterlüftungsebene zeigen einen kontinuierlichen Anstieg über den gesamten Betrachtungszeitraum. Die Temperaturdifferenz zwischen dem Tagesmittel des ersten und letzten Messtags dieser Periode beläuft sich auf 15,6 °C (T-oH-Fa), wobei an jener Position auch die größten Extremwerte mit einer maximalen Tagesdifferenz von 16,3 °C gemessen werden. Aufgrund von Datenlücken der Messungen des Oberflächentempersensors der Innenwand (T-oH-Fi) bis einschließlich 08.03. und dem Einbau des Efeus am 09.03. liegt der Fokus der weiteren Auswertung auf dem zweiten Zeitraum. Der Vergleich der Temperaturmittelwerte (TMW) zeigt eine höhere durchschnittliche Temperatur an der Position T-oH-Fi von 6,9 °C im Vergleich zur Position T-oH-Fa mit 6,0 °C. Darüber hinaus weist die Position T-oH-Da mit 7,5 °C den höchsten Temperaturmittelwert auf. Dieser Unterschied resultiert aus der geringeren Wärmeleitfähigkeit der Zellulosedämmung im Vergleich zur Holzspanplatte und der Wärmeübertragung durch Konvektion an der Bauteilinnenoberfläche.

Abbildung 53: Messungen der Temperatur an der Fassade mit Begrünung ohne Hinterlüftung

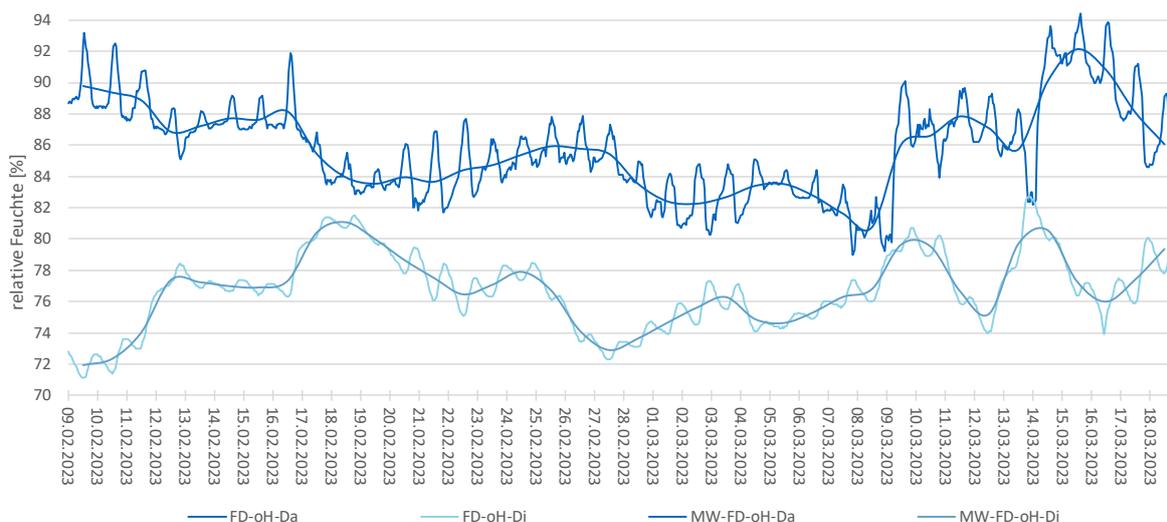


Die Messdaten in Abbildung 54 der relativen Feuchte in der Dämmebene der begrünten Fassade ohne Hinterlüftung zeigen die höchsten gemessenen Werte aller Konstruktionen. An der außenseitigen Position FD-oH-Da beträgt die durchschnittliche relative Feuchte 85,8 %, wobei ein maximaler Wert von bis zu 94,4 % erreicht werden. Der Grenzwert an dieser Stelle wird im betrachteten Zeitraum lediglich an zwei Tagen unterschritten.

Der Durchschnitt von der innenseitig liegenden Position FD-oH-Di beläuft sich auf 76,8 %. Die 100 % r. F., und somit das Ausfallen von Tauwasserausfall, tritt nicht ein.

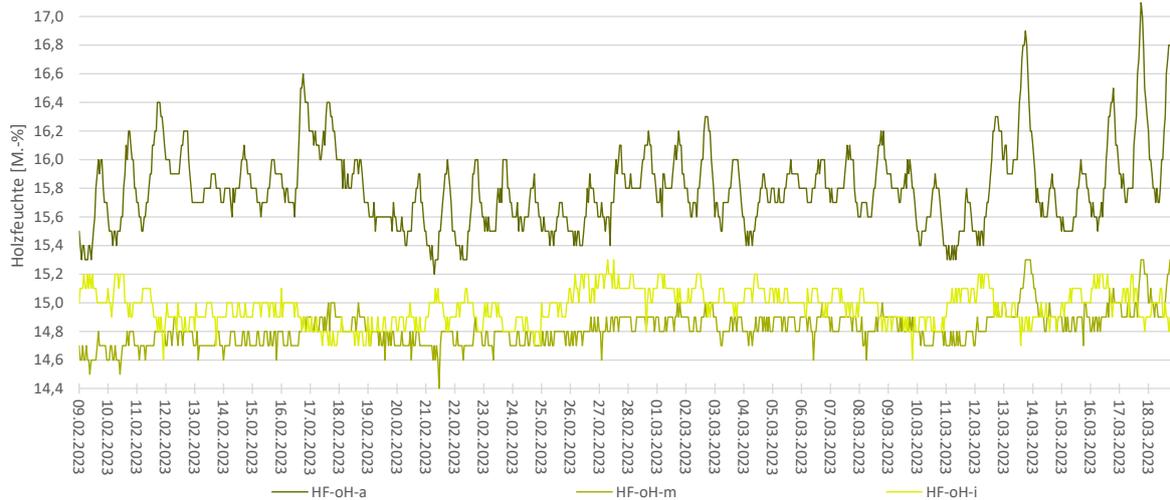
Ab dem 09.03. – dem Einpflanzen der Begrünung – stellt sich ein Anstieg der durchschnittlichen Temperaturmittelwerte (TMW) beider Positionen um etwa 2 % ein. Dies ist nicht ausschließlich auf die Begrünung zurückzuführen, sondern resultiert auch aus den klimatischen Außenbedingungen. Die hohen relativen Feuchtigkeiten in der Dämmung dieser Konstruktionsvariante sind durch das Fehlen von Bauteilschichten und der entsprechend direkten Bewitterung des Aquapanelis bedingt.

Abbildung 54: Messungen der relativen Feuchte in der Dämmung an der Fassade mit Begrünung ohne Hinterlüftung



Die erhobenen Daten zu den Holzfeuchtwerten in Abbildung 55 ergeben einen Mittelwert von 15,8 M.-% Holz an der Position HF-oH-a. Die Differenz zu den Positionen HF-oH-m (14,8 M.-%) und HF-oH-i (15,0 M.-%) beträgt dabei etwa 1 M.-%. Die Abweichung ist verglichen mit anderen Messdaten nahezu doppelt so hoch. Auffällig sind die Tagesspannweiten, die sich mit einem Maximum von 1,4 M.-% innerhalb eines 24-Stunden-Zeitraums zeigen. Der in DIN 68800-1:2019 [25] festgelegte Grenzwert von maximal 20 M.-% wird nicht erreicht.

Abbildung 55: Holzfeuchtemessungen der Fassade mit Begrünung ohne Hinterlüftung

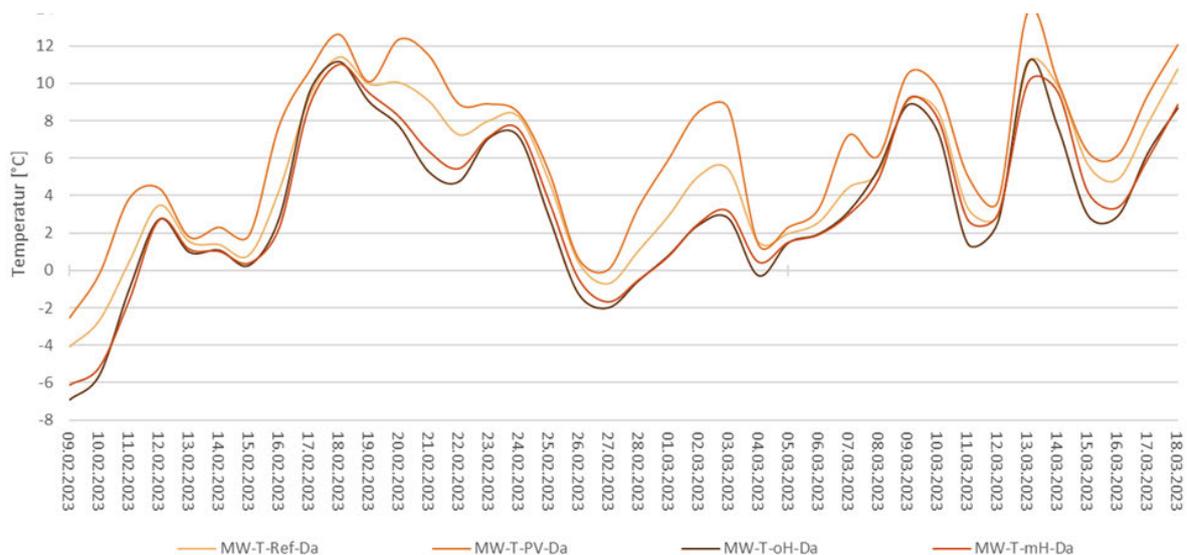


Vergleich der Fassadenkonstruktionen, Zeitraum 1

Abbildung 56 stellt die Temperaturverläufe der Fassaden Ref, PV, mH und oH dar. Es ist ersichtlich, dass die beiden begrünten Fassaden im Durchschnitt eine geringere Temperatur von 3,8 °C (mH) bzw. 3,5 °C (oH) aufweisen. Im Vergleich hierzu zeigt die Referenzfassade mit 4,9 °C und die PV-Fassade mit 6,4 °C deutlich höhere Durchschnittswerte. Diese Unterschiede resultieren hauptsächlich aus der nordwestlichen Ausrichtung der begrünten Fassade und nicht aus der Begrünung selbst, da diese während eines Großteils des betrachteten Zeitraums noch nicht vollständig installiert war. Es zeigt sich allerdings, dass sich mit der vorhandenen Begrünung ab dem 09.03. eine Reduktion der Temperaturmaxima und -minima in der hinterlüfteten Selbstklammer-Fassade einstellt. Dies verdeutlicht, dass der Luftaustausch in der Hinterlüftungsebene bei höheren Außentemperaturen die Konvektion verstärkt, was wiederum zu einer Verringerung des Wärmetransports in der Konstruktion führt. Bei niedrigen Außentemperaturen dient der Hinterlüftungsspalt als Puffer, wodurch eine langsamere Abkühlung des Bauteils erreicht wird.

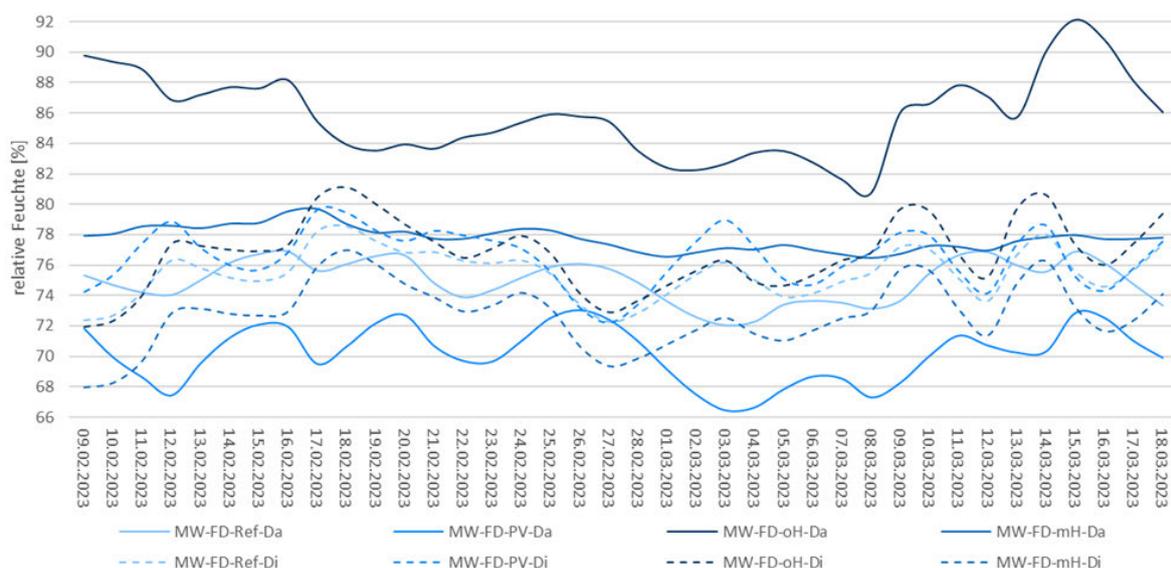
Die mittlere Differenz von 1,5 °C zwischen der Referenzfassade und der PV-Fassade ergibt sich aufgrund der Sonnenposition und der Verschattung der Referenzfassade.

Abbildung 56: Temperaturverläufe aller Fassaden an Position Da ZR 1



In Abbildung 57 ist der graphische Vergleich der relativen Feuchten aller Konstruktionsvarianten dargestellt, wobei Da stets den außenliegenden und Di den innenseitigen Messpunkt beschreibt. Die gemessenen Feuchtigkeiten in der nicht hinterlüftete Selbstklimmerfassade übersteigen dabei die aller anderen Varianten.

Abbildung 57: Verläufe der relativen Feuchte aller Fassaden in der Dämmebene ZR 1



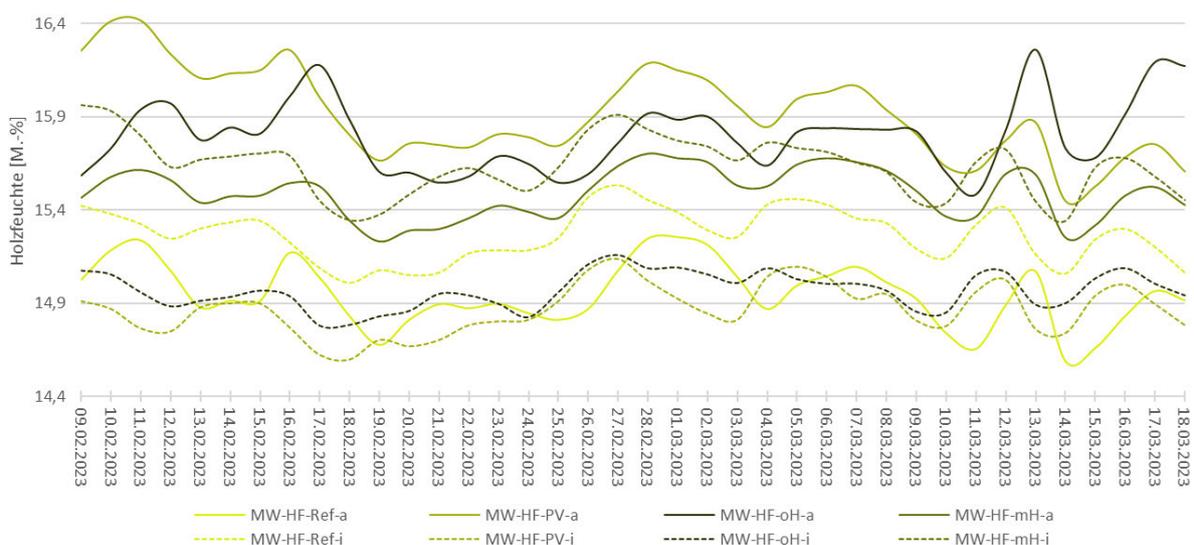
Die Feuchtigkeitsverhältnisse in der Fassade oH deuten darauf hin, dass eine Austrocknung aufgrund der fehlenden Hinterlüftung nicht stattfindet. Der Feuchtetransportweg ist zudem aufgrund des geringeren Wandaufbaus verkürzt, wobei die Feuchte unmittelbar nach dem Durchdringen der äußeren Beplankung in die Dämmung diffundiert.

Die Auswertung der Messwerte an der Position Di für alle Varianten zeigt stabilisierte Verläufe mit einer maximalen Differenz von 4,0 % relativer Feuchte. Die gegenläufigen Verläufe zwischen den Messwerten der Positionen Da und Di sind, mit Ausnahme der auffallend konstanten Datenreihe FD-mH-Da, bei allen Konstruktionen erkennbar. Speziell die PV-Fassade zeigt eine intensive Austrocknung auf der Außenseite, was sich durch den Wert von 70,2 % r. F. an Position FD-PV-Da darstellt.

Abbildung 58 zeigt die gemittelten Holzfeuchtwerte der untersuchten Bauteilaufbauten innen (i) und außen (a) am Holzständer dargestellt (siehe Nomenklatur Tabelle 12).

Der Verlauf der Konstruktionsvarianten PV, Ref und mH zeigt an allen drei untersuchten Positionen eine geringfügig abnehmende Tendenz. Die höchste Differenz in der Holzfeuchtigkeit mit 0,65 M.-% zeigt sich dabei an Position HF-PV-a, was darauf hindeutet, dass eine Austrocknung der PV-Fassade nach außen stattfindet. Geringfügigere Unterschiede, etwa 0,04 M.-%, zeigen sich an Position HF-mH-a. Es ist ein Anstieg der Holzfeuchte an der Fassade oH mit Tagesmittelwerten von 0,59 M.-% festzustellen. Während die hinterlüfteten Fassaden einen zur Trocknung tendieren, zeigt die Konstruktion der begrünten Fassade ohne Hinterlüftung eine Zunahme der Feuchtigkeit. Die Holzfeuchte aller Varianten bewegt sich im Bereich von 14,5 M.-% (HF-Ref-m) bis 15,9 M.-% (HF-PV a) und liegt somit unterhalb des in der Norm DIN 68800-1:2019 [25] festgelegten Grenzwerts von 20 M.-%.

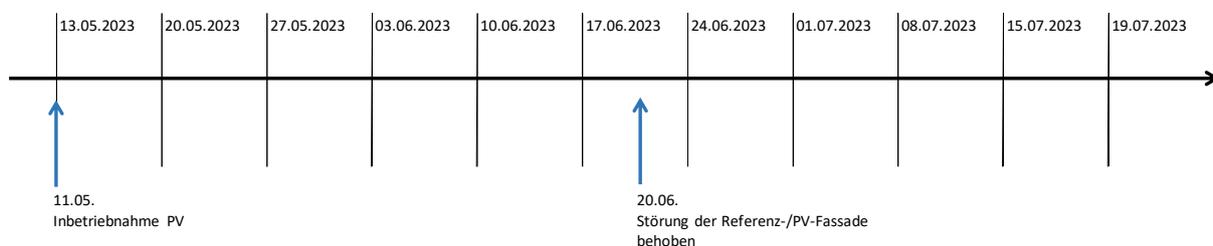
Abbildung 58: Holzfeuchteverlauf aller Fassaden Positionen a & i ZR 1



Betrachtungszeitraum 2

Der zweite Betrachtungszeitraum beginnt mit dem 13.05.2023 und endet am 19.07.2023. Abbildung 59 zeigt den zeitlichen Ablauf mit maßgebenden Punkten der Inbetriebnahme der Photovoltaikanlage sowie die Behebung der Störquelle.

Abbildung 59: Betrachtungszeitraum 2

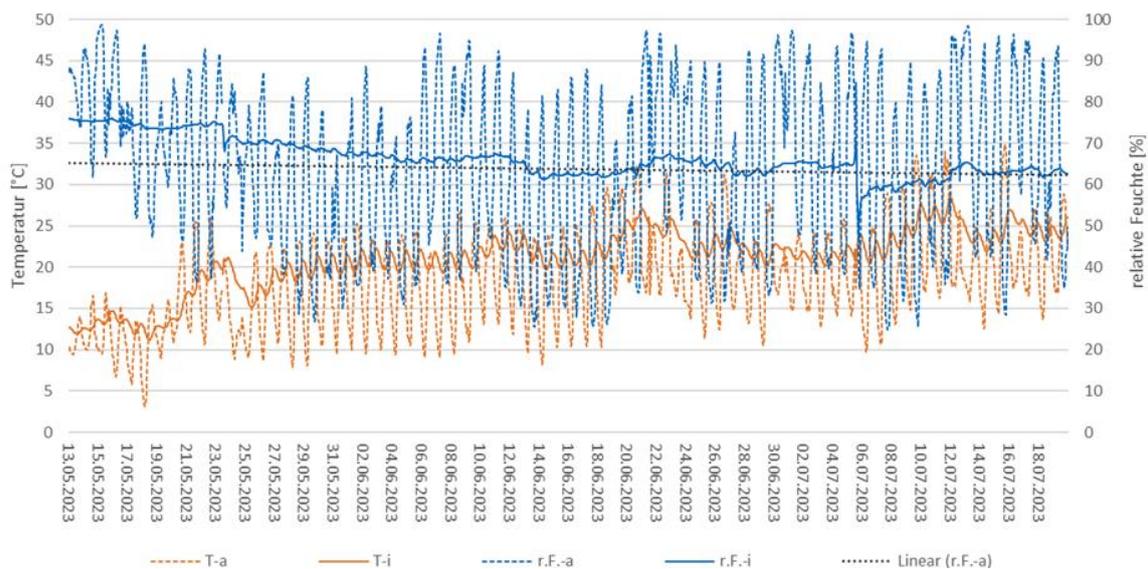


Wetterdaten und Innenraumklima im zweiten Betrachtungszeitraum

Die Umgebungsbedingungen im zweiten Betrachtungszeitraum der hygrothermischen Untersuchung von greenTES umfassen die Innenraummessungen zu relativer Luftfeuchte sowie der Temperatur und die Messdaten der Wetterstation im Außenraum.

In Abbildung 60 sind die Messdaten zur relativen Feuchte und Temperatur innerhalb und außerhalb der Konstruktion zu sehen. Es sind die vom Tagesverlauf abhängigen Schwankungen zu erkennen.

Abbildung 60: Verlauf relative Luftfeuchte & Temperatur außen und innen ZR 2

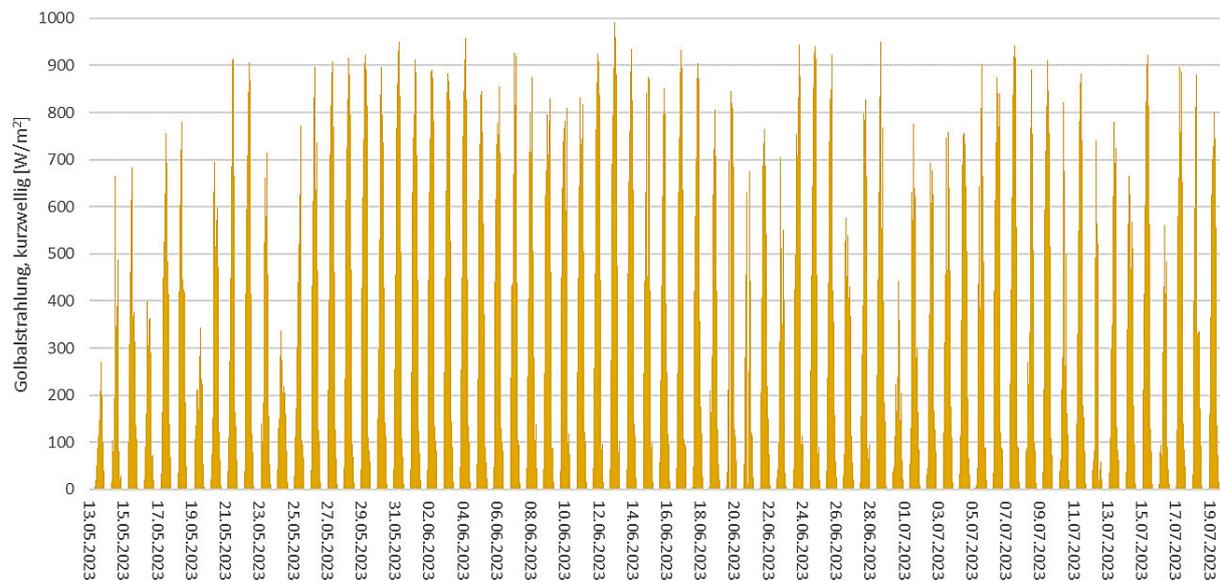


Die im Innenraum gemessenen Werte weisen, mit Tagesspannweiten von 4 °C und 6,8 % r.F., in den geringeren Schwankungen als das Außenklima auf. Der Vergleich der Tagesmittelverläufe aller vier Messdatenreihen zeigt zudem, dass die Innenraumdaten träger reagieren als die Wetterdaten. Im Verlauf der knapp zehnwöchigen Zeitspanne lässt sich eine deutliche aufwärtsgerichtete Tendenz der Temperaturen im Inneren des betrachteten Systems feststellen. Diese Entwicklung spiegelt sich in einem Anstieg der Tagesmitteltemperatur von anfänglich 12,5 °C auf ungefähr 25 °C wider.

Auffällig ist der Sprung der relativen Luftfeuchte im Innenraum am 05.07. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass zu jenem Zeitpunkt die Tür des Mock-Ups zum Auslesen der Daten geöffnet wurde. In die Auswertung der maximalen Tagesspannweiten wird dies nicht mit einbezogen, um die Vergleichbarkeit mit anderen Werten nicht zu beeinträchtigt.

In Abbildung 61 sind die Aufzeichnungen der Wetterstation bezüglich der kurzweiligen Globalstrahlung dargestellt. Diese Daten wurden auf einer horizontalen Ebene erfasst und zeigen einen Höchstwert von 916 W/m² am 13.06.2023. Der Mittelwert über den gesamten erfassten Zeitraum beträgt 173,8 W/m², wobei das höchste Tagesmittel bei 323,7 W/m² liegt. Diese Daten zeichnen ein repräsentatives Bild für die betrachtete Jahreszeit.

Abbildung 61: Strahlungsdaten, kurzwellige Globalstrahlung ZR 2



Die Windgeschwindigkeitsdaten werden durch das Anemometer der Wetterstation gemessen, wobei ein deutlicher Unterschied zwischen den Wert bei Tag und bei Nacht besteht. Wie in Abbildung 62 ersichtlich ist, erreicht die Windgeschwindigkeit nachts minimal 0,12 m/s und tagsüber im betrachteten Zeitraum einen Maximalwert von 2,05 m/s. Der gemittelte Wert über den gesamten Zeitraum beläuft sich auf 0,68 m/s.

Abbildung 62: Windgeschwindigkeit in [m/s] ZR 2

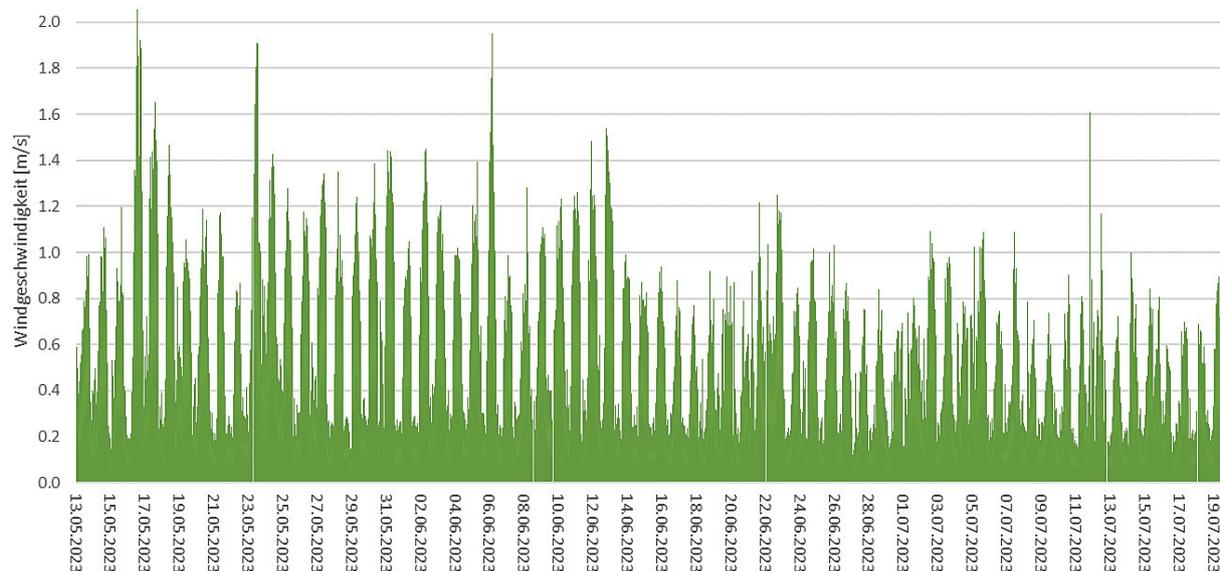
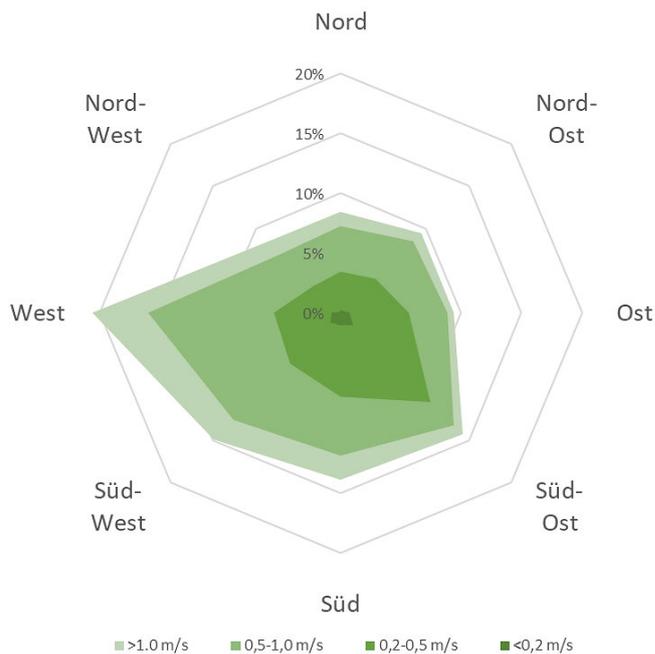


Abbildung 37 bietet einen Einblick in die Häufigkeit der verschiedenen Windrichtungen über die Darstellung einer Windrose. Windgeschwindigkeiten unter 0,2 m/s bzw. über 1,0 m/s sind mit 5,6 % bzw. 14,1 % vergleichsweise selten. Die beiden Kategorien mit Windgeschwindigkeiten von 0,2 m/s bis 1,0 m/s machen mit etwa 80 % den größten Anteil aus. In Bezug auf die Windrichtungen zeigt sich Westen als die am häufigsten auftretende Richtung mit 20,9 %, gefolgt von Süd, Süd-West und Süd-Ost, die jeweils eine Häufigkeit von 14,0 % bis 15,0 % aufweisen (siehe Abbildung 63).

Hierbei ist anzumerken, dass sich die Wetterstation im Süden des Mock-Ups befand, was die Messung von Wind aus Norden beeinträchtigt haben könnte.

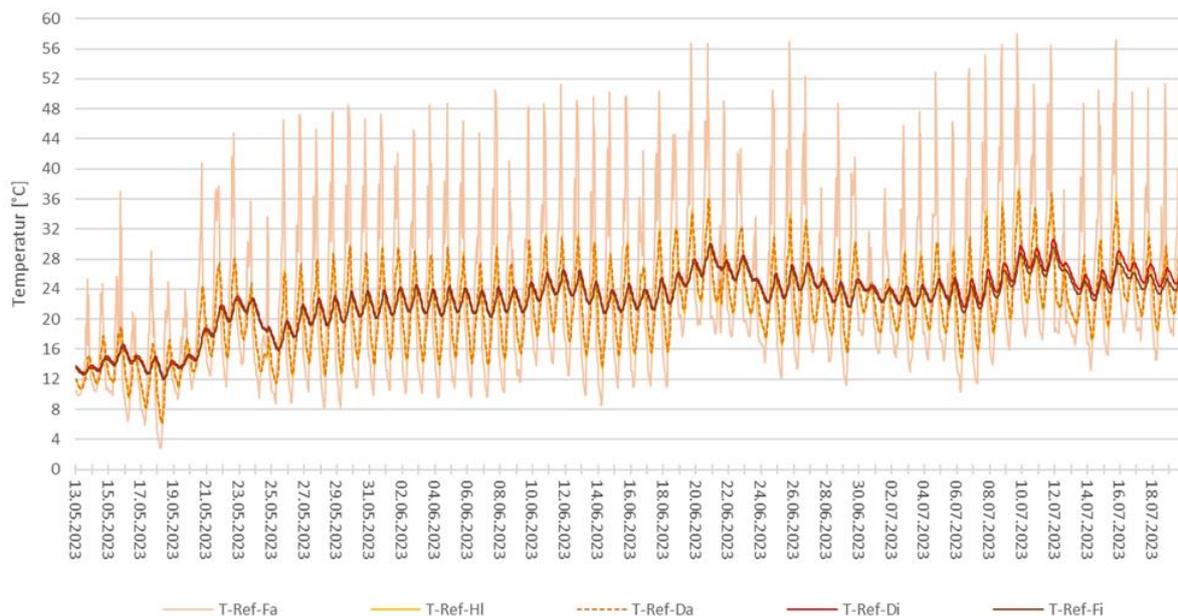
Abbildung 63: Windrose zur Darstellung der Windrichtungshäufigkeit ZR 2



Referenzfassade Zeitraum 2

Die Analyse der gemessenen Oberflächentemperaturen in den unterschiedlichen Schichten der Konstruktion wird in der nachfolgenden Abbildung 64 veranschaulicht. Das Liniendiagramm zeigt einen deutlichen Aufwärtstrend der Messdaten, welcher durch den Vergleich mit den berechneten TMW der Kurven validiert wird.

Abbildung 64: Temperaturverlauf Referenzfassade ZR 2



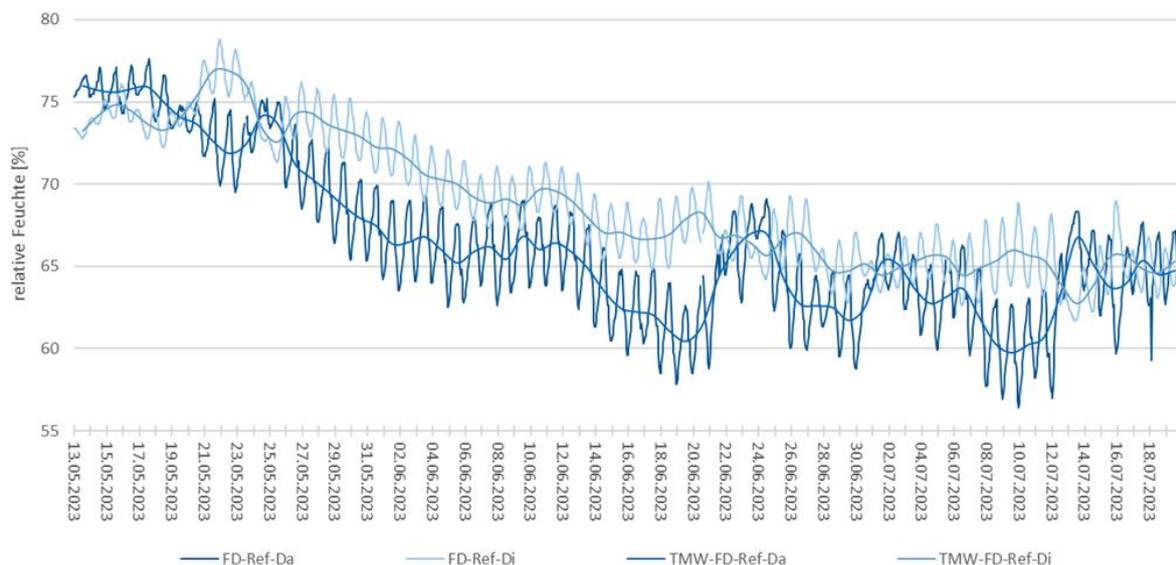
Die Abweichung der TMW zwischen den ersten und letzten sieben Tagen des betrachteten Zeitraums beträgt im Durchschnitt etwa 11,5 °C für die Sensoren an den Positionen Fa und Fi. Der Sensor an Position Fa zeichnet sich durch ein maximales Temperaturniveau von 57,9 °C aus, bedingt durch die direkte Sonneneinstrahlung

auf die Süd-West-Fassade. Die minimalen Tageswerte an Position Fa, mit einem Minimum von 2,8 °C, orientieren sich an den Außentemperaturen, was zu einer Tagesspannweite zwischen 13,9 °C und 44,7 °C führt.

Ein Vergleich der dargestellten Messdaten zwischen Außentemperatur und Globalstrahlung bestätigt die Plausibilität der aufgezeichneten Daten. Die Maximalwerte an der Position Fa korrelieren direkt mit der Intensität der Globalstrahlung des jeweiligen Tages. Bei der Gegenüberstellung der Oberflächentemperatur T-Ref-Fi und der Temperatur T-i ist ein nahezu deckungsgleicher Verlauf zu beobachten, wobei T-Ref-Fi im Durchschnitt um 0,7 °C höher liegt. Diese Differenz lässt sich einerseits durch die unterschiedliche Höhenlage der Positionen erklären, da der Sensor an der Wand auf einer Höhe von 1,5 m installiert ist, während der Innenraumtemperatursensor am Boden platziert ist. Zudem ist die spezifische Wärmekapazität der Holzfaserplatte mit 1700 J/kg K höher als die der Luft, was zu einer effizienteren Wärmespeicherung führt [38]. Die Verläufe der Temperaturmessungen zeigen nahezu identische Kurven zwischen den Positionen Hi und Da sowie Di und Fa. Der Vergleich der minimalen und maximalen Werte sowie der Tagesmittelwerte ergibt einen maximalen Unterschied von 0,8 °C zwischen den jeweiligen Verläufen, der innerhalb der Toleranzen der Messgeräte von ± 1 °C liegt und daher vernachlässigbar ist. Die Übereinstimmung der Verläufe resultiert aus der engen Positionierung der Sensoren, die jeweils nur 15 mm bzw. 18 mm voneinander entfernt sind. Über die Tiefe der Sensorpositionen in der Konstruktion ist eine Phasenverschiebung von rund drei bis fünf Stunden zu sehen, was der Geschwindigkeit des Temperaturtransports durch die Konstruktion entspricht.

Die Kurven der gemessenen relativen Feuchte in der Dämmung sind in Abbildung 65 abgebildet. Zur Veranschaulichung sind neben den bereinigten Messdaten die berechneten Tagesmittelwerte dargestellt. Beide Verläufe zeigen einen deutlich abnehmenden Trend. Diese Entwicklung deutet auf einen allgemeinen Feuchterückgang in der Dämmung hin, was für die Sommermonate zu erwarten ist. Von einer effektiven Feuchtigkeitsregulierung in der betrachteten Bauteilkonstruktion kann folglich ausgegangen werden.

Abbildung 65: Verlauf der relativen Feuchte in der Dämmebene Referenzfassade ZR 2



Die durchschnittliche Differenz zwischen beiden Kurven über den Zeitraum von der ersten bis zur letzten Woche beträgt dabei 9,9 % r.F. Ein Vergleich mit der relativen Außen-Luftfeuchte zeigt, dass die relative Feuchte in der Dämmebene insgesamt höher ist, aber die Tagesspannweiten mit 5,7 % (Da) und 9,2 % (Di) geringere Schwankungen aufweisen.

Beim Vergleich der außen- und innenliegenden Datenreihe ist eine tagesverlaufsabhängige Gegenläufigkeit zu erkennen.

Um die hygrothermischen Wechselwirkungen zu analysieren sind in Abbildung 66 die zuvor behandelten relativen Feuchten den entsprechend gemessenen Temperatur gegenübergestellt. Anhand der Temperaturdaten ist eine Phasenverschiebung innerhalb der Dämmebene von etwa drei bis vier Stunden erkennbar. Im Rahmen dieser zeitlichen Verschiebung zeigen beide Temperaturverläufe einen gemeinsamen steigenden Trend.

Die relative Feuchte an Position Da verläuft sowohl im Tagesverlauf als auch über einen Großteil des Zeitraums gegenläufig zur Temperatur. Über den gesamten Verlauf ist eine Erhöhung der Temperatur und gleichzeitig eine Abnahme der Feuchte in der Dämmung zu verzeichnen.

Abbildung 66: Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene Referenzfassade ZR 2

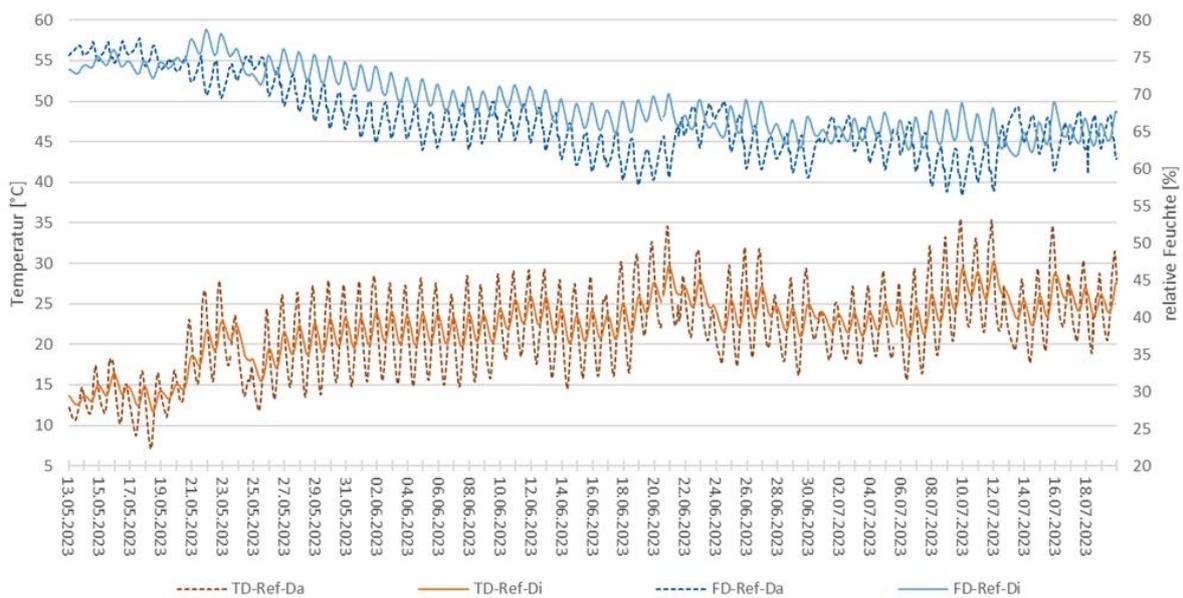
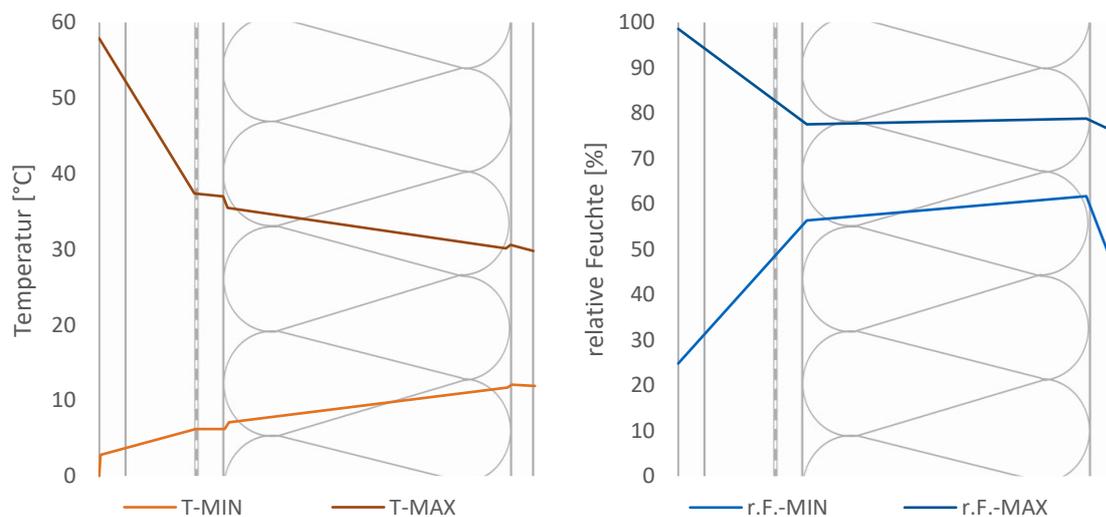


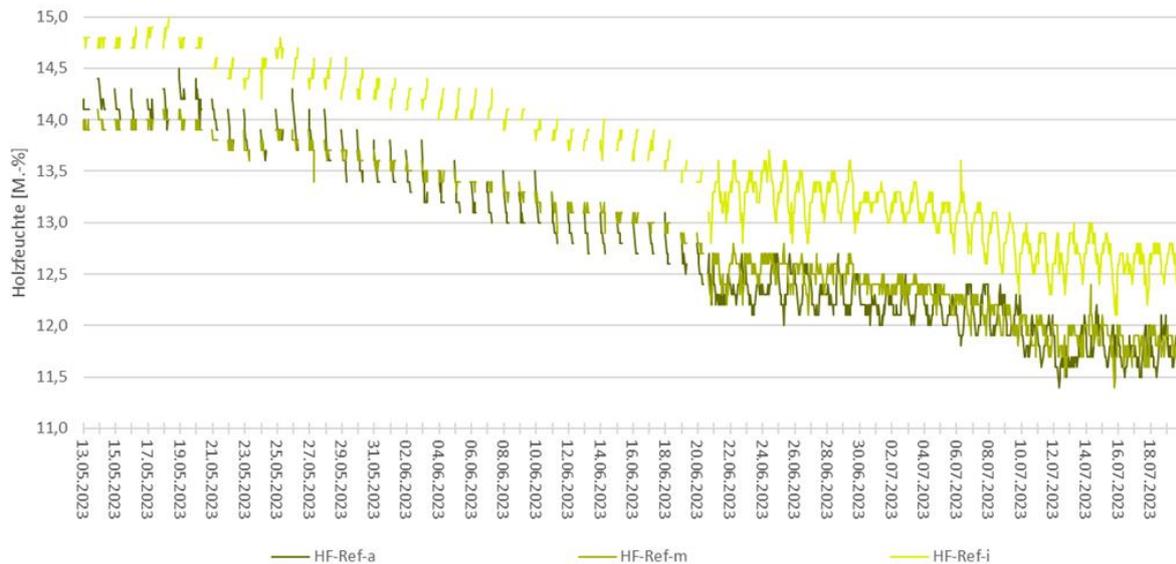
Abbildung 67 zeigt den hygrothermischen Verlauf über den Bauteilquerschnitt der Referenzfassade im zweiten Beobachtungszeitraum. Die Temperatur bleibt in der Holztafelwandebene konstant bei zwischen rund 7 °C und 37 °C. Die Werte zur relativen Feuchte im Bauteil haben einen Anstieg von 63,7 % außen zu 66,3 % innen. Die Werte sind hier in der Dämmschicht am höchsten.

Abbildung 67: Hygrothermischer Verlauf über den Bauteilquerschnitt Referenzfassade ZR 2



Die bearbeiteten und transformierten Daten der elektrischen Widerstandsmessungen zur Holzfeuchtemessung sind in Abbildung 68 für alle drei Positionen am Holzständer als zeitliche Verläufe dargestellt. Bis zum 20.06.23 fehlen Messdaten für die Stunden mit Tageslicht. Trotz dieser Einschränkung werden die Werte für die Nacht weiterhin für eine Visualisierung der Trends und zur Plausibilisierung über den Vergleich mit anderen Daten genutzt.

Abbildung 68: Holzfeuchteverlauf Referenzfassade ZR 2

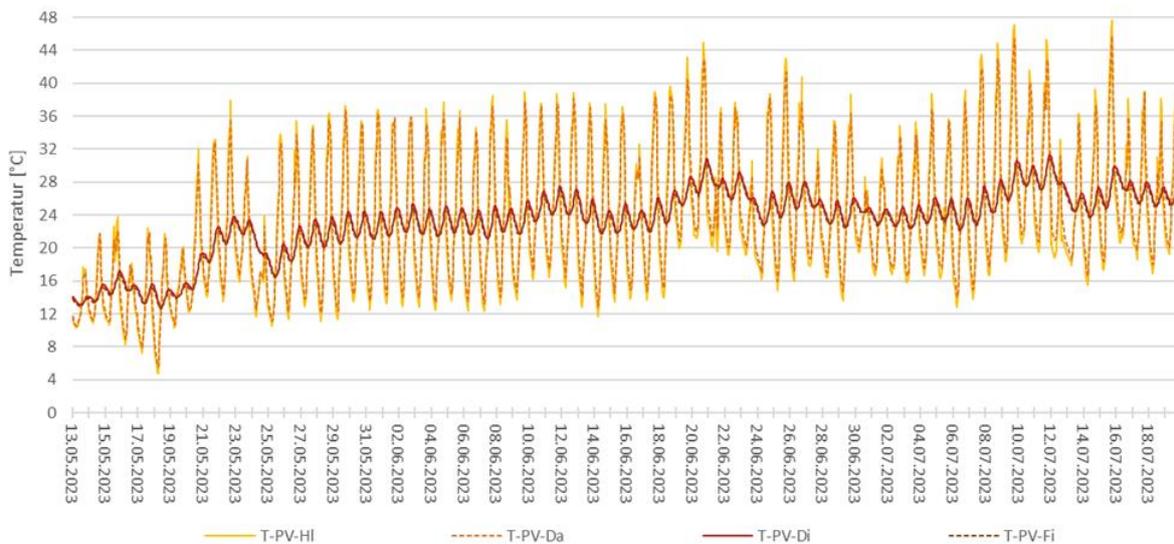


Die analysierten Verläufe zeigen einen eindeutigen abnehmenden Trend für alle drei Positionen, wobei die Holzfeuchte durchschnittlich um 2,4 M.-% abnimmt. Auffällig ist dabei, dass die mittlere Holzfeuchte an der inneren Position (i) um 0,8 M.-% höher ist als die 12,6 M.-% der beiden anderen Positionen.

Photovoltaikfassade Zeitraum 2

Die erfassten Oberflächentemperaturen sind in Abbildung 69 für die Photovoltaikfassade als Liniendiagramm dargestellt. Da es keine Messdaten der Oberflächentemperatur der PV-Module gibt, ist entsprechend die Position HI die äußerste Messstelle in dieser Konstruktionsvariante. Der Verlauf aller Datensätze zeigt eine steigende Tendenz und offenbart eine durchschnittliche Differenz von 12,0 °C zwischen den beiden Positionen HI und Fi innerhalb der ersten und letzten Woche des betrachteten Zeitraums.

Abbildung 69: Temperaturverlauf Photovoltaik-Fassade ZR 2



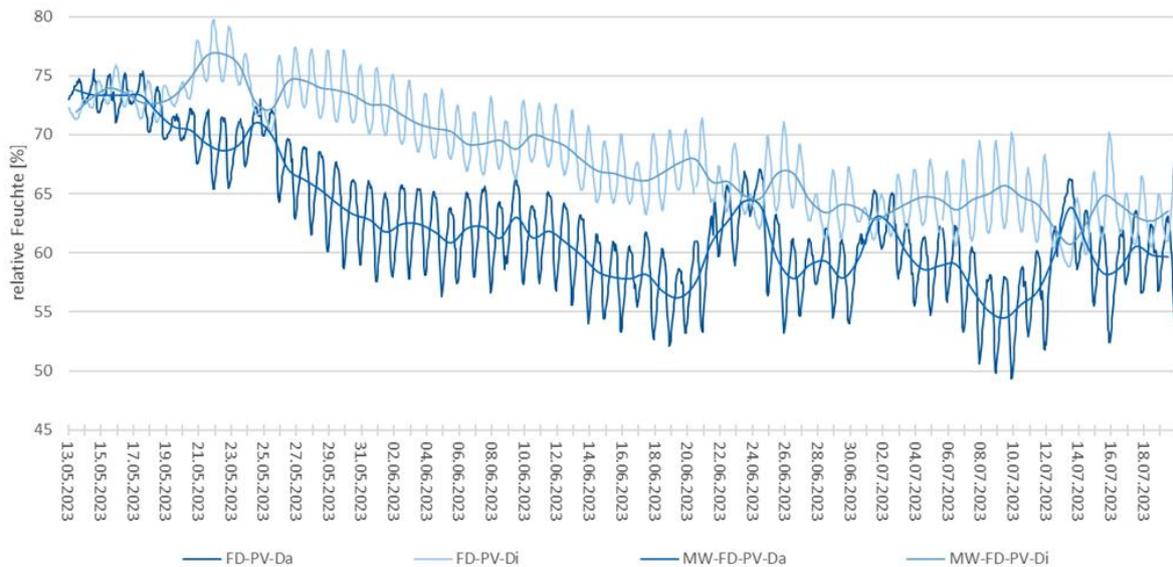
Der Abgleich mit den meteorologischen Daten unterstreicht die Konsistenz der Messdaten. Die erfasste Außentemperatur zeigt den gleichen Verlauf wie die Temperaturdaten in der Hinterlüftungsebene, wobei der berechnete Mittelwert an der Position T-PV-HI um 4,5 °C höher liegt. Diese Diskrepanz resultiert aus der Fähigkeit der Konstruktion zur Wärmespeicherung im Vergleich zu einer freistehenden Wetterstation ohne vergleichbare Umgebungseinflüsse. Ein ähnlicher Trend zeigt sich beim Vergleich der Innenraumtemperatur mit der Temperatur an der Oberfläche der Innenwand. Hier verlaufen ebenfalls beide Messreihen identisch und die Temperatur in Position T-PV-Fi ist im Schnitt um 2,1 °C höher als die der Luft.

Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, überlagern sich die Positionen HI und Da sowie Da und Fi. Diese Überlagerung ist auf die spezifische Positionierung zurückzuführen, wie im Kapitel zur Referenzfassade erörtert. Daher werden im Folgenden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Positionen HI und Fi analysiert.

Die Betrachtung der einzelnen Sensoren zeigt für die Hinterlüftungsebene einen minimalen bzw. maximalen Wert von 4,8 °C bzw. 47,7 °C. Die Tagesspannweiten variieren je nach äußeren Einflüssen zwischen 7,4 °C und 30,4 °C. Die Schwankungen der inneren Oberflächentemperatur sind geringer. Mit einem minimalen und maximalen Wert von 12,6 °C und 30,8 °C sowie Tagesspannweiten zwischen 0,9 °C und 4,7 °C ist eine dämpfende Wirkung des Konstruktionsaufbaus auf die Temperatur ersichtlich. Des Weiteren zeigt sich eine Phasenverschiebung von etwa vier Stunden zwischen der äußersten und innersten Position.

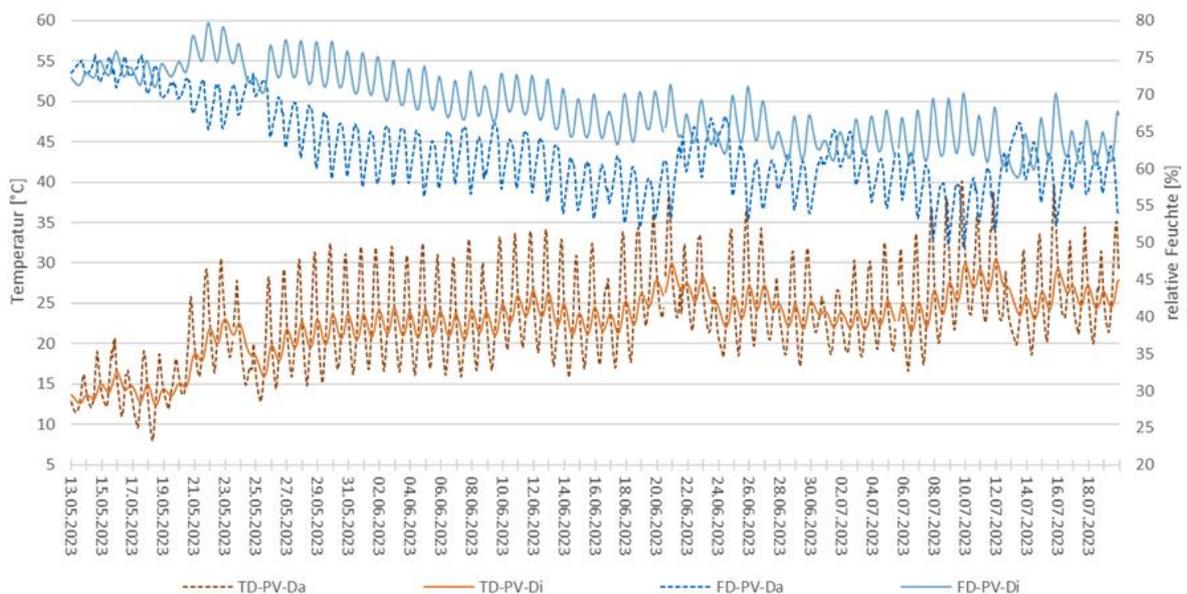
Die Verläufe der gemessenen relativen Luftfeuchte innerhalb der Dämmung sind in Abbildung 70 als Liniendiagramm der Tagesmittelmerte über den zweiten Betrachtungszeitraum dargestellt. Beide Datenreihen zeigen einen abnehmenden Trend, wobei sich über den betrachteten Zeitraum eine Differenz von 11,3 % r. F. einstellt. Im Vergleich zu den gemessenen relativen Feuchtedaten der Wetterstation fällt auf, dass die Feuchtigkeitsabnahme in der Dämmung steiler ist. Die Fassadenkonstruktion trocknet im Verlauf des Zeitraums aus. Der Mittelwert der Position Di liegt mit 68,3 % um 5,8 % höher als der Durchschnitt der Position *Da* mit 62,5 % r. F. Des Weiteren zeigt sich eine Gegenläufigkeit der beiden Messdatenreihen bei kurzfristigen Veränderungen der Außenbedingungen. Gleichzeitig stellt sich eine Phasenverschiebung von außen nach innen von etwa drei Stunden ein.

Abbildung 70: Verlauf der relativen Feuchte in der Dämmebene Photovoltaik-Fassade ZR 2



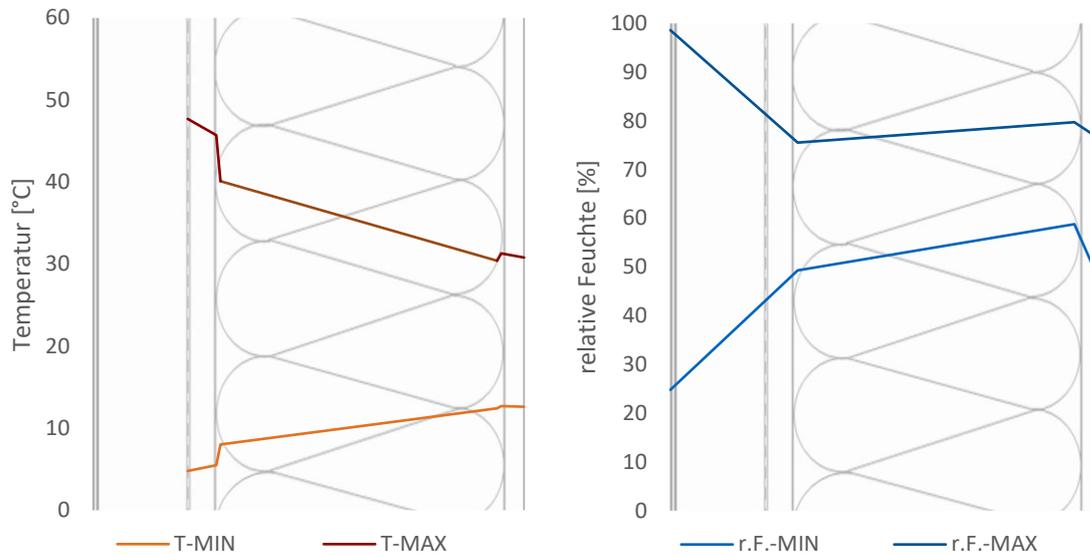
In Abbildung 71 sind die Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene der Photovoltaik-Fassade im zweiten Betrachtungszeitraum abgebildet. Hierbei zeigt sich eine Phasenverschiebung in den Temperaturmessung von etwa zwei bis drei Stunden. Die Messreihen der Feuchte und Temperatur, jeweils für außen und innen, sind genau gegenläufig. Ein Anstieg der Temperatur führt dabei zum Sinken der relativen Feuchte im Bauteil.

Abbildung 71: Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene Photovoltaik-Fassade ZR 2



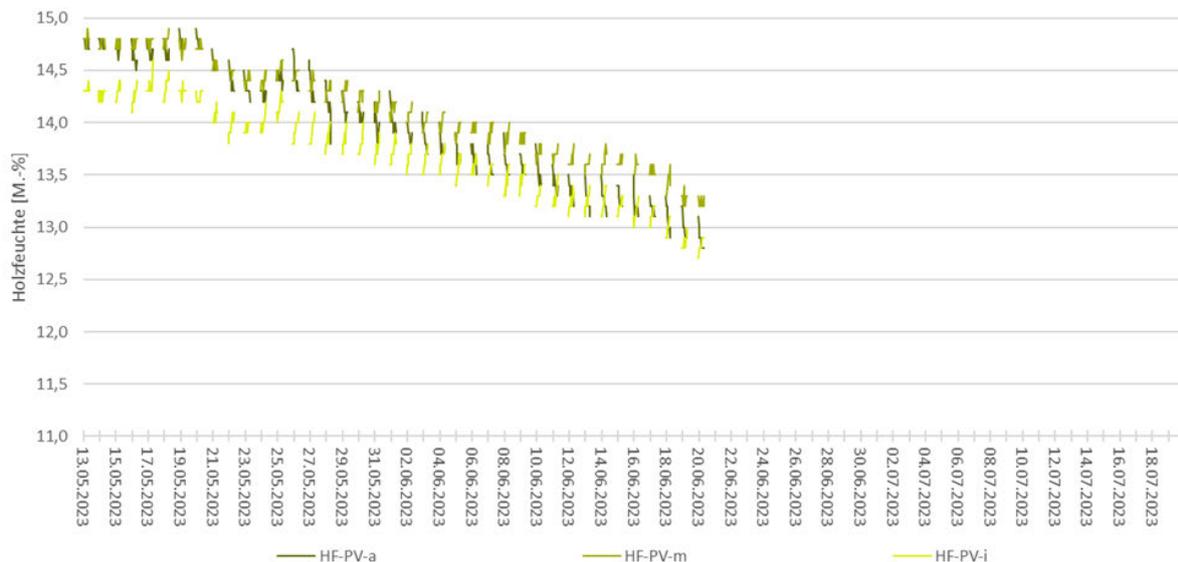
In Abbildung 72 sind der Wärme- und Feuchtetransport über das Bauteil dargestellt. Der Verlauf der Temperaturwerte weist in der betrachteten Zeitspanne eine Differenz der Maximalwerte von circa 15 K sowie Minimalwerte von circa 5 °C auf. Auch die Feuchte innerhalb der Holztafelwand zeigt wenig Schwankungen von innen nach außen.

Abbildung 72: hygrothermischer Verlauf über den Bauteilquerschnitt Photovoltaik-Fassade ZR 2



Zur Vollständigkeit der Darstellungen zeigt Abbildung 73 den Verlauf der ermittelten Holzfeuchte. Aufgrund des Störfalls sind die Daten nicht lückenlos verfügbar, und es liegen lediglich nächtliche Werte bis zum 20.06. vor. Daher erfolgt an dieser Stelle eine kurze Betrachtung der Holzfeuchte. Der Trend der Messdatenreihen weist einen fallenden Verlauf um durchschnittlich 1,7 M.-% auf. Beim Vergleich der Mittelwerte zeigt sich, dass der Wert an der Position HF-PV-m mit 14,1 M.-% am höchsten ist, während der Mittelwert an der Position HF-PV-i mit 13,7 M.-% am geringsten ausfällt. Der Grenzwert von 20 M.-% nach DIN 68800:2019 [25] wird nicht erreicht.

Abbildung 73: Holzfeuchteverlauf Photovoltaik-Fassade ZR 2



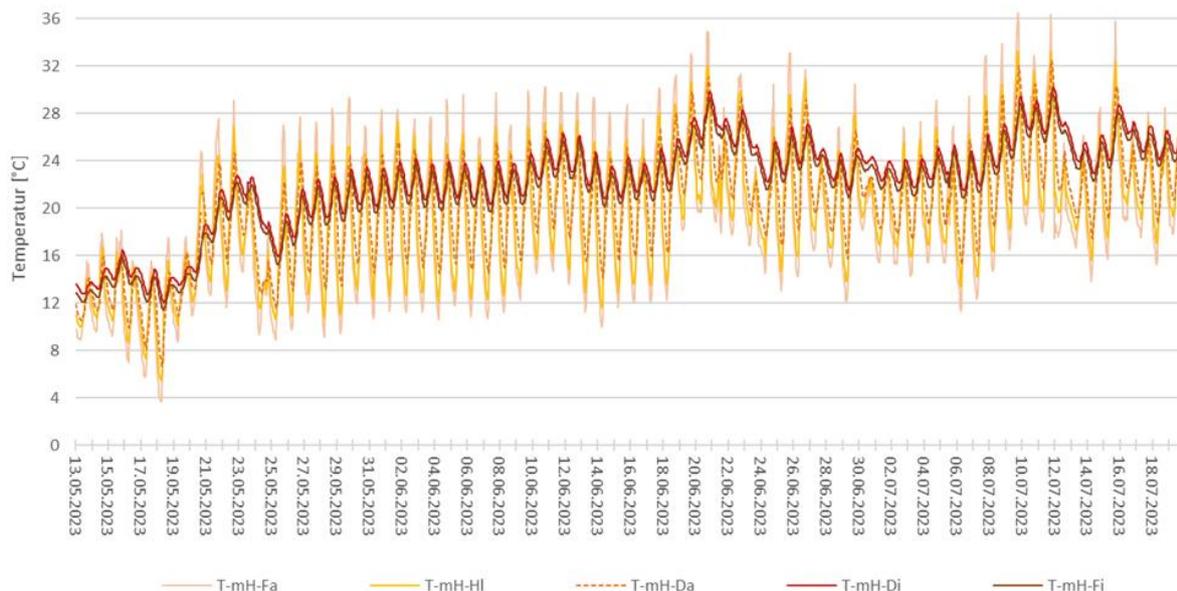
Selbstklammer-Fassade hinterlüftet Zeitraum 2

Die zeitlichen Verläufe der Temperaturmessdaten an der hinterlüfteten begrünerten Fassade sind in Abbildung 45 veranschaulicht. Ein eindeutiger Trend zeichnet sich an allen Positionen ab: Die Temperaturen steigen kontinuierlich an und weisen eine Differenz von 10,9 °C zwischen der ersten und letzten Woche des

betrachteten Zeitraums auf. Der Vergleich mit den Temperaturmessungen der Wetterstation deutet auf eine plausible Messdatenkurve hin. An der Position T-mH-Fa zeigt sich ein Mittelwert von 19,3 °C, der um 1,7 °C kühler ist als die Temperatur aus den Wetterdaten. Diese Differenz ist auf die nord-westliche Ausrichtung der Fassade zurückzuführen. Die kurze direkte Sonneneinstrahlung auf die Fassade und die tief stehende Position der Sonne in den Abendstunden führen dazu, dass sich die Fassadenoberfläche nur minimal aufheizt. Dies wird auch in der visuellen Darstellung der Messdaten im Liniendiagramm deutlich. Mit einem durchschnittlichen Tagesmaximum von 27,5 °C liegt die Temperatur an der Position Fa lediglich um 2,9 °C über der Außenlufttemperatur.

Ein Vergleich der Mittelwerte über den gesamten Zeitraum lässt erkennen, dass die Position Di mit 22,4 °C den höchsten Wert aufweist. Wie im Diagramm ersichtlich, stellt sich nachts eine deutliche Abkühlung der Bauteilschichten ein. Die drei Sensoren auf der Außenseite der Dämmebene weisen mit einer Spannweite von bis zu 20,6 °C (Fa) die größten Tagestemperaturunterschiede auf, während die Werte der beiden Sensoren auf der Innenseite der Dämmebene eine maximale Spannweite von 4,6 °C (Fi) aufzeigen.

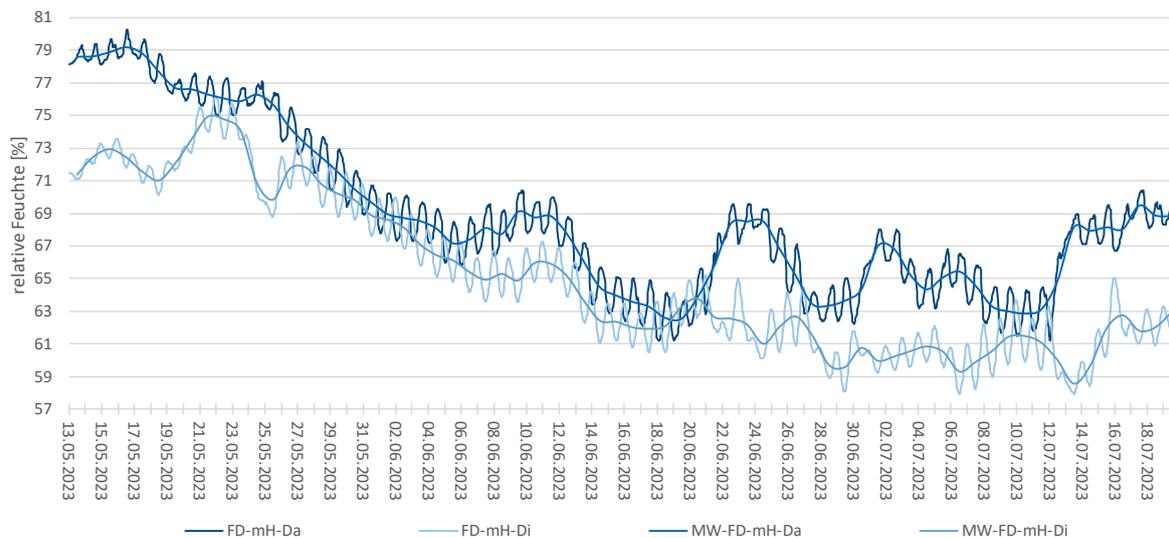
Abbildung 74: Temperaturverlauf Selbstklimmer-Fassade hinterlüftet ZR 2



Die Position T-mH-Fa weist einen Mittelwert von 19,3 °C auf, der um 1,7 °C kühler ist als die Temperatur aus den Wetterdaten. Diese Abweichung lässt sich auf die nord-westliche Ausrichtung der Fassade zurückführen. Die geringe direkte Sonneneinstrahlung auf die Fassade und die tief stehende Position der Sonne von Westen führen dazu, dass sich die Fassadenoberfläche nur minimal aufheizt. Diese Beobachtung wird zusätzlich durch die visuelle Darstellung der Messdaten im Liniendiagramm gestützt. Mit einem durchschnittlichen Tagesmaximum von 27,5 °C liegt die Temperatur an der Position Fa lediglich um 2,9 °C über der Außenlufttemperatur. Ein genauerer Vergleich der Mittelwerte über den gesamten Zeitraum zeigt, dass die Position Di mit 22,4 °C den höchsten Wert aufweist. Während die drei Sensoren auf der Außenseite der Dämmebene die größten Tagestemperaturunterschiede mit einer Spannweite von bis zu 20,6 °C (Fa) aufweisen, zeigen die Werte der innenliegenden Sensoren in der Dämmebene eine maximale Spannweite von 4,6 °C (Fi).

In der detaillierten Untersuchung der Abbildung 75 wird der Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Dämmebene durch zwei Sensoren illustriert, ergänzt durch die berechneten Tagesmittelwerte in entsprechender Farbdarstellung. Die Daten verdeutlichen einen insgesamt abnehmenden Trend an beiden Positionen, wobei die Differenz zwischen der ersten und letzten Woche des betrachteten Zeitraums 10,2 % r. F. beträgt. Das Liniendiagramm ermöglicht eine genauere Betrachtung, indem es zeigt, dass die Position Da im Durchschnitt mit 68,8 % feuchter ist als die Position Di.

Abbildung 75: Verlauf der relativen Feuchte in der Dämmebene Selbstklimmer-Fassade hinterlüftet ZR 2



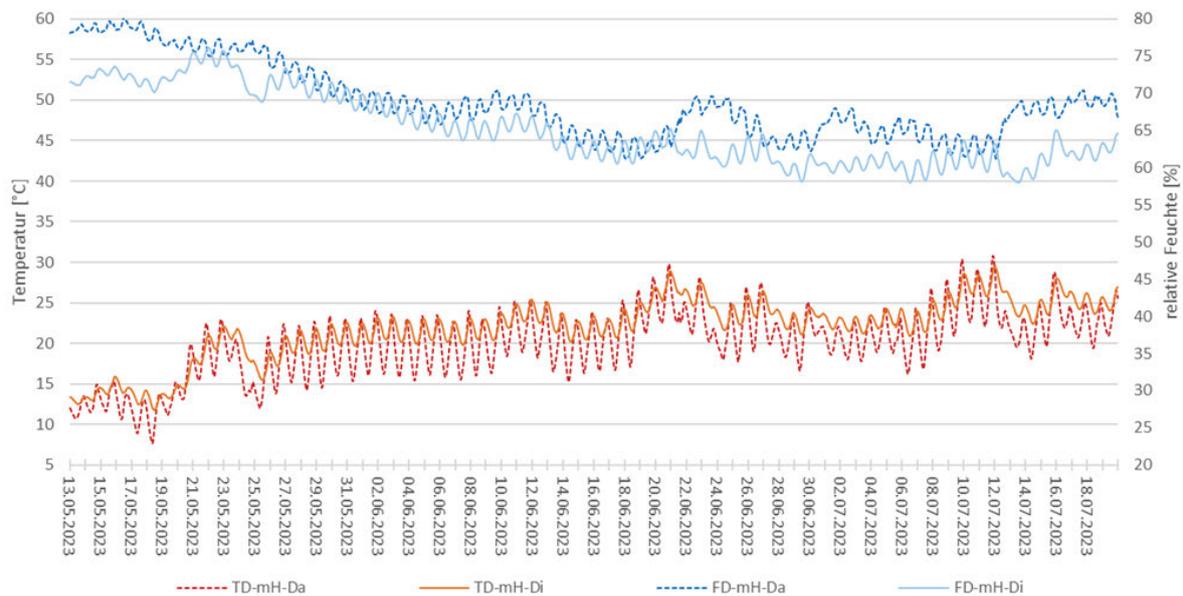
Die Werte an der Position Di zeigen eine Phasenverschiebung von 5,5 Tagen und erreichen ein Maximum von 76,2% r. F.

Über einen Zeitraum von etwa 24 Tagen ab dem 27.05. nähern sich die Verläufe beider Positionen an und weisen eine minimale Differenz von nur 1,0% auf. Ab dem 20.06. zeigt sich eine Veränderung im fallenden Trend der Position Da, und die Verläufe weisen wieder deutlichere Feuchteunterschiede von bis zu 9,0% auf. Diese Differenzen können durch Veränderungen in den Temperaturen sowie durch den damit verbundenen Wasserdampfdiffusionstransport und vermehrte Niederschläge erklärt werden. Insbesondere die Begrünung der Fassade trägt zusätzliche Feuchteinflüsse auf die Konstruktion bei.

Die Wechselwirkungen zwischen Temperatur und relativer Feuchte in der Dämmebene werden im nachfolgenden Abschnitt eingehend erläutert, um ein Verständnis für die hygrothermischen Prozesse zu bieten.

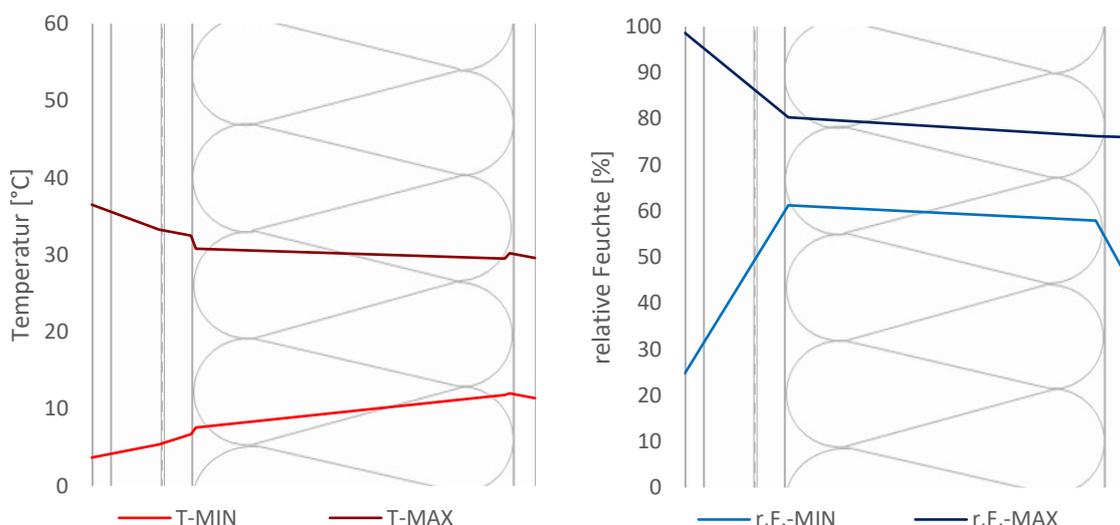
Das Liniendiagramm in Abbildung 76 stellt die hygrothermischen Verhältnisse innerhalb der Dämmung dar. In den Temperaturverläufen zeichnet sich die Phasenverschiebung von etwa zwei bis drei Stunden von außen nach innen ab. Diese Verzögerung zeigt sich auch in den relativen Feuchteverläufen, wobei zwischen den Minimal- und Maximalwerten an den einzelnen Tagen etwa sechs bis sieben Stunden liegen.

Abbildung 76: Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene Selbstklimmer-Fassade hinterlüftet ZR 2



Die detaillierte Analyse des Temperaturverlaufs über die Bauteiltiefe in Abbildung 77 zeigt, dass die Temperaturen von außen nach innen um 2,6 °C ansteigen. Die höchste Temperatur liegt bei 22,4 °C, die an der Position Di gemessen wird. Die Verläufe der relativen Feuchte zeigen hingegen einen gegensätzlichen Trend. Die Feuchtwerte an der Dämmungssinnenseite (Di) liegen mit 65,2 % relativ niedriger im Vergleich zu denen an der Position Da mit 68,8 % r. F. Dieser Unterschied in Feuchte und Temperatur zwischen den Positionen weist darauf hin, dass die Begrünung der Fassade einen direkten Einfluss auf die Feuchteverhältnisse im Bauteil ausübt. Um eine ganzheitliche Bewertung vorzunehmen, wird im Anschluss ein ausführlicher Vergleich mit der Referenzfassade gezogen. Dabei werden insbesondere die unterschiedlichen Orientierungen der Fassaden berücksichtigt, um eine fundierte Beurteilung der Ergebnisse vornehmen zu können.

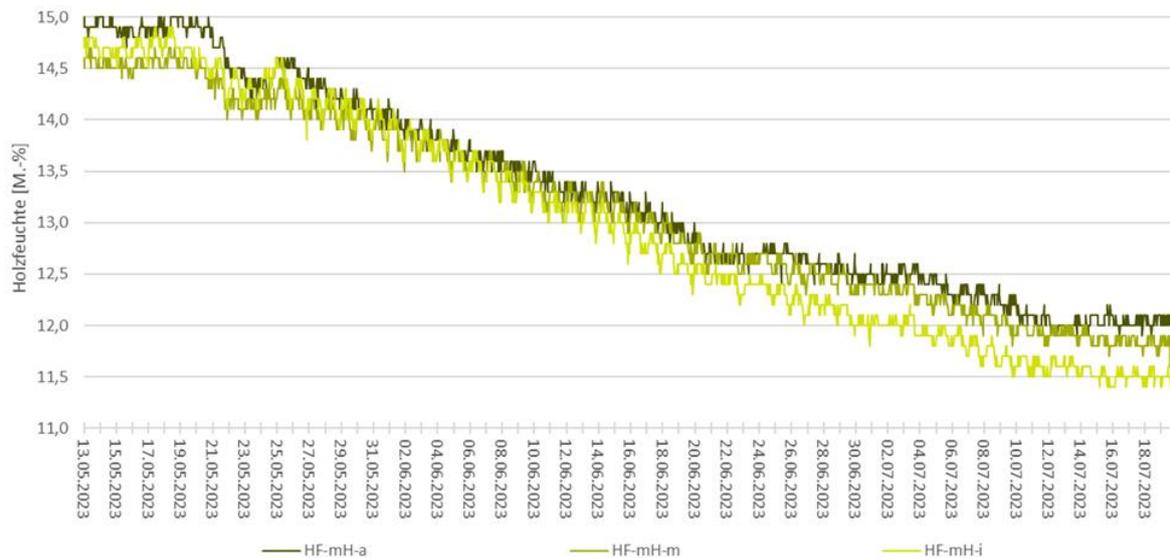
Abbildung 77: hygrothermischer Verlauf über den Bauteilquerschnitt Selbstklimmer-Fassade hinterlüftet ZR 2



Im Rahmen der hygrothermischen Analyse werden in Abbildung 78 die Messdaten zur Holzfeuchte in M.-% vorgestellt. Die Holzfeuchte verzeichnet an allen drei Positionen einen abnehmenden Trend, wobei sich über den betrachteten Zeitraum die Positionen um durchschnittliche 3,0 M.-% unterscheiden. Bei genauer Betrachtung der Datenreihen zeigt sich zwischen dem 27.05.2023 und 23.06.2023 eine Annäherung der Werte

aller drei Positionen. Dies deutet darauf hin, dass konstante Wetterbedingungen und steigende Durchschnittstemperaturen zu einer Angleichung der Feuchte in der Konstruktion führen, wobei das Holz eine über den Querschnitt hinweg konstante Ausgleichsfeuchte annimmt.

Abbildung 78: Holzfeuchteverlauf Selbstklimmer-Fassade hinterlüftet ZR 2



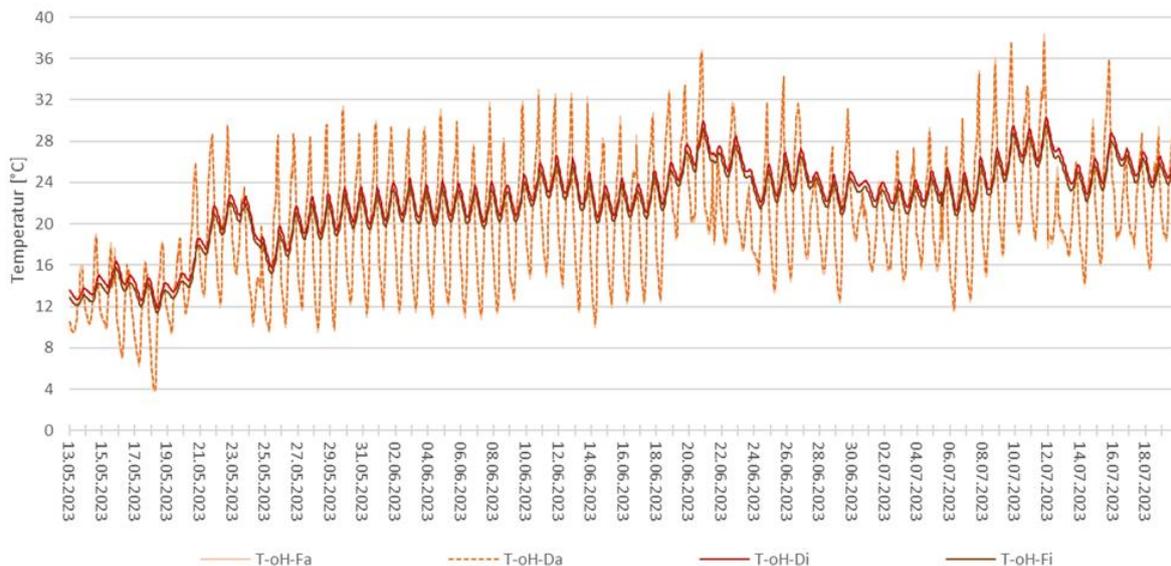
Anhand des Diagramms ist zu erkennen, dass die Position HF-mH-a durchgehend die höchste Holzfeuchte aufweist (MW = 13,3 M.-%), während die Holzfeuchte an der Position HF-mH-i mit durchschnittlich 13,0 M.-% am geringsten ist. Dieser Unterschied kann als marginal betrachtet werden. Es ist festzustellen, dass der Verlauf der Holzfeuchte erst ab etwa dem 06.06. die niedrigsten Werte der drei Messdatenreihen im Vergleich zeigt. Die anfänglich höheren Werte an dieser Position können auf die Einbaufeuchte zurückgeführt werden, die im Winter und Frühjahr aufgrund der geringen Temperaturdifferenz und somit kaum vorhandenen Wasserdampfdiffusion durch das Bauteil nicht ausgetrocknet werden konnte.

Die betrachtete Konstruktion weist über den analysierten Sommerzeitraum einen erwünschten Austrocknungsprozess von innen nach außen auf. Die maximale Holzfeuchte in dieser Fassade liegt deutlich unter dem Grenzwert von 20 M.-%.

Selbstklimmer-Fassade nicht hinterlüftet Zeitraum 2

In Abbildung 79 sind die Temperaturdaten der Oberflächentempersensoren an sämtlichen Positionen des Bauteilquerschnitts in einem Liniendiagramm veranschaulicht. Über den analysierten Zeitraum hinweg zeichnet sich an jeder Position ein ansteigender Trend ab, wobei eine durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen der ersten und letzten Woche von 10,9 °C festzustellen ist. Der Vergleich dieses Trends mit den Temperaturdaten der Wetterstation legt nahe, dass die gemessenen Ergebnisse plausibel sind. Der MW an der Position T-oH-Fa beläuft sich auf 19,9 °C und liegt somit um 1,3 °C über dem durchschnittlichen Wert der Außenlufttemperatur. Dies ist auf die höhere Wärmespeicherkapazität der Holzbekleidung der Fassade zurückzuführen, die 1600 J/kg K beträgt im Vergleich zur Luft mit etwa 1000 J/kg K. Die Unterschiede der Mittelwerte zwischen den beiden äußeren Positionen Fa und Da sowie den beiden inneren Positionen Di und Fi sind mit 0,1 °C bzw. 0,4 °C marginal. Daher konzentriert sich die nachfolgende Analyse hauptsächlich auf die Positionen Fa und Fi.

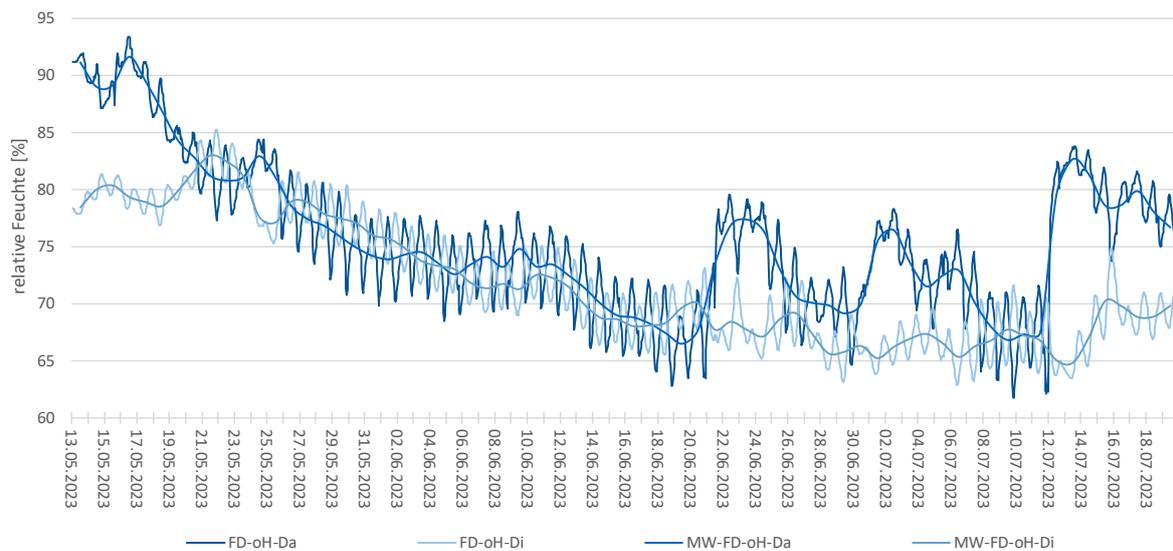
Abbildung 79: Temperaturverlauf Selbstklimmer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2



Die maximalen und minimalen Werte der gesamten Konstruktion treten an Position T-oH-Fa mit 38,4 °C bzw. 3,8 °C auf. Im Vergleich der Tagesspannweiten an den vier Positionen zeigt sich an der äußeren Messposition ebenfalls das Maximum von 22,4 °C. Die Temperatur an T-oH-Fi erreicht eine mittlere Tagesspannweite von 4,8 °C. Die äußere Fassadenoberfläche erfährt den stärksten Einfluss der Außentemperatur, wobei dieser über die Bauteiltiefe abnimmt. Die statistische Auswertung der Daten zeigt, dass der Mittelwert der Position Di mit 22,4 °C am höchsten ist. Eine detaillierte Betrachtung des Verlaufs der gemessenen Temperaturen über den Bauteilquerschnitt wird mittels Abbildung 81 erörtert.

Für eine eingehende Analyse der relativen Luftfeuchte innerhalb der Dämmebene wurden in Abbildung 80 die Messergebnisse einschließlich der berechneten Tagesmittelwerte über den zeitlichen Verlauf hinweg aufgezeichnet. Deutlich zeigt sich an beiden Positionen ein rückläufiger Trend, der eine Differenz von 10,2 % relativer Feuchte zwischen der ersten und letzten Woche des betrachteten Zeitraums aufweist. Ab dem 20.06.2023 wird eine Änderung dieses Trends erkennbar. Während die Werte an der Position Di im Durchschnitt bei 67,4 % stagnieren, zeigen die Daten an der Position Da erhebliche Schwankungen der Tagesmittelwerte, die bis zu 12 % r. F. betragen. Dies lässt sich durch verstärkte Temperaturschwankungen ab jenem Zeitpunkt und zusätzliche Niederschlagsereignisse erklären, die zu einem erhöhten Feuchtigkeitsaufkommen im Bauteil führen.

Abbildung 80: Verlauf der relativen Feuchte in der Dämmebene Selbstklimmer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2

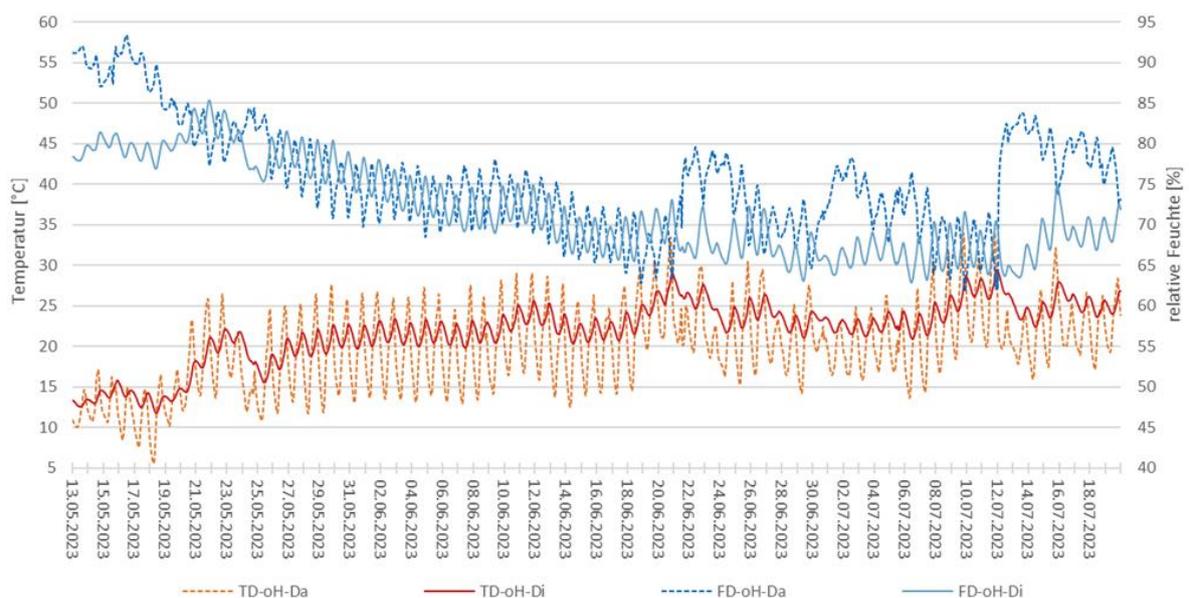


Eine Betrachtung über die Winterperiode hinweg ist notwendig, um das potenzielle Risiko für eine Schadensanalyse in der Dämmebene abschließend zu bewerten.

Für eine ganzheitliche hygrothermische Untersuchung der nicht hinterlüfteten begrünten Fassade wurden in Abbildung 81 die Kurvenverläufe der relativen Feuchte und Temperatur, basierend auf den Messungen der Thermo-Hygro-Sensoren, zusammengestellt.

Die Temperaturmessdaten zeigen eine durchschnittliche Phasenverschiebung von etwa drei Stunden zwischen den Positionen Da und Di. Bei der Analyse der täglichen Extremwerte der relativen Feuchte an beiden Sensoren zeigt sich eine gegenläufige Entwicklung der beiden Kurven. Zudem lässt sich erkennen, dass die Feuchtigkeitsänderungen in der Dämmung im Durchschnitt etwa 1,5 Stunden zeitverzögert, auf die sich ändernde Temperatur an der Position Da reagieren. Diese Kurvenverläufe ermöglichen Einblicke in die komplexen Zusammenhänge von Wärmeleitung und Feuchtetransport durch die Dämmebene.

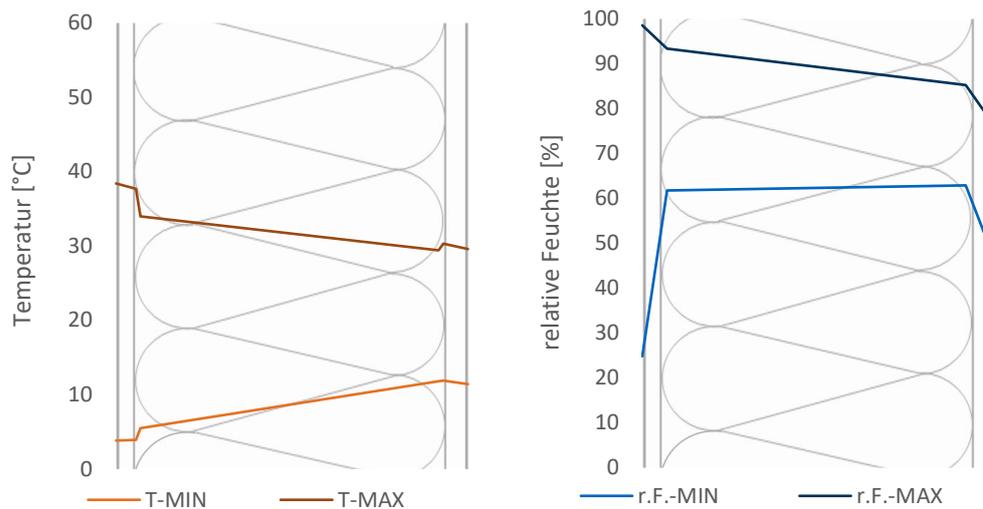
Abbildung 81: Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene Selbstklimmer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2



Die Abbildung 82 zeigt die Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur für sämtliche Sensorpositionen entlang des Bauteilquerschnitts.

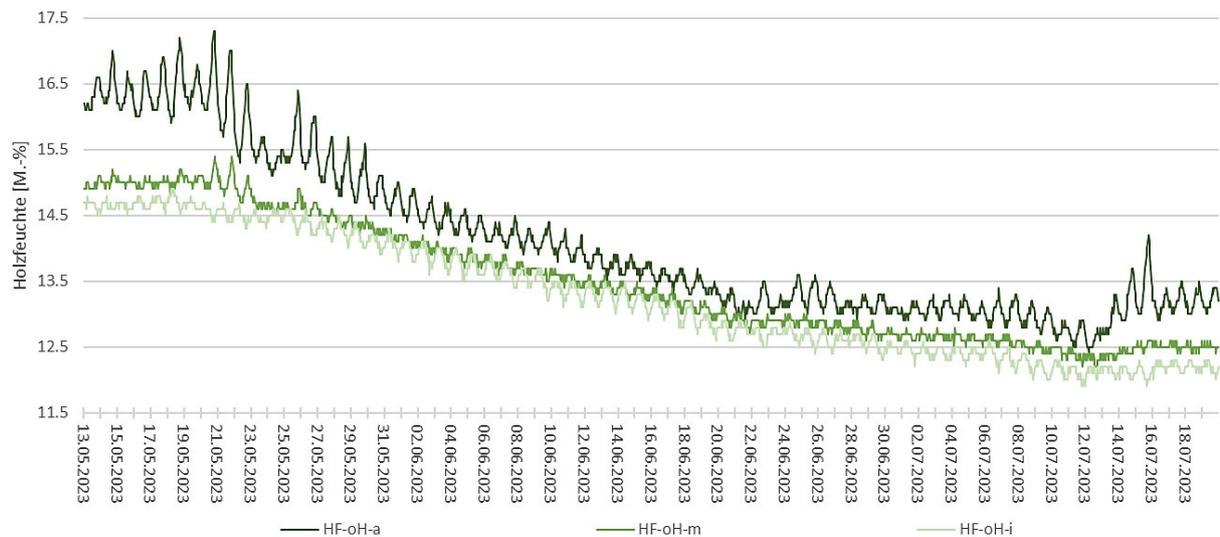
Der Temperaturverlauf verdeutlicht einen graduellen Anstieg bzw. Abfall von rund 10 K von der äußeren zur inneren Position des Bauteilquerschnitts, wobei die innerste Position Di mit einem Höchstwert von 32,4 °C abschließt. Im Gegensatz dazu zeigen die Messdaten zur relativen Feuchte einen Absinken – hier wird ein maximaler Feuchtwert von 93,3 % r. F. an Position Da erreicht. Dieser Feuchtwert nimmt jedoch mit der Dämmtiefe ab und stabilisiert sich bei 71,8 % r. F. an Position Di.

Abbildung 82: hygrothermischer Verlauf über den Bauteilquerschnitt Selbstklimmer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2



Die dargestellten Daten zur Holzfeuchte in Abbildung 83 erstrecken sich über den gesamten zweiten Betrachtungszeitraum. Ein deutlicher abwärts gerichteter Trend ist an allen drei Sensorpositionen erkennbar, wobei die durchschnittliche Differenz der täglichen Mittelwerte 3,1 M.-% beträgt. An der Position HF-oH-a bildet sich mit einem Mittelwert von 14,1 M.-% die höchste Holzfeuchte ab, die auf externe Veränderungen mit einer gewissen Trägheit reagiert. Im Gegensatz dazu weist die Holzfeuchte an der Position HF-oH-i mit einem Mittelwert von 13,3 M.-% den niedrigsten Wert auf. Über den Großteil des untersuchten Zeitraums zeigen die Messdaten aller Positionen eine geringe Varianz. Es ist festzustellen, dass der in den Normen definierte Grenzwert von 20 M.-% für ein erhöhtes Wachstum holzerstörender Pilze im Holz nicht erreicht wird.

Abbildung 83: Holzfeuchteverlauf Selbstklimmer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2



Vergleich der Fassadenkonstruktionen Zeitraum 2

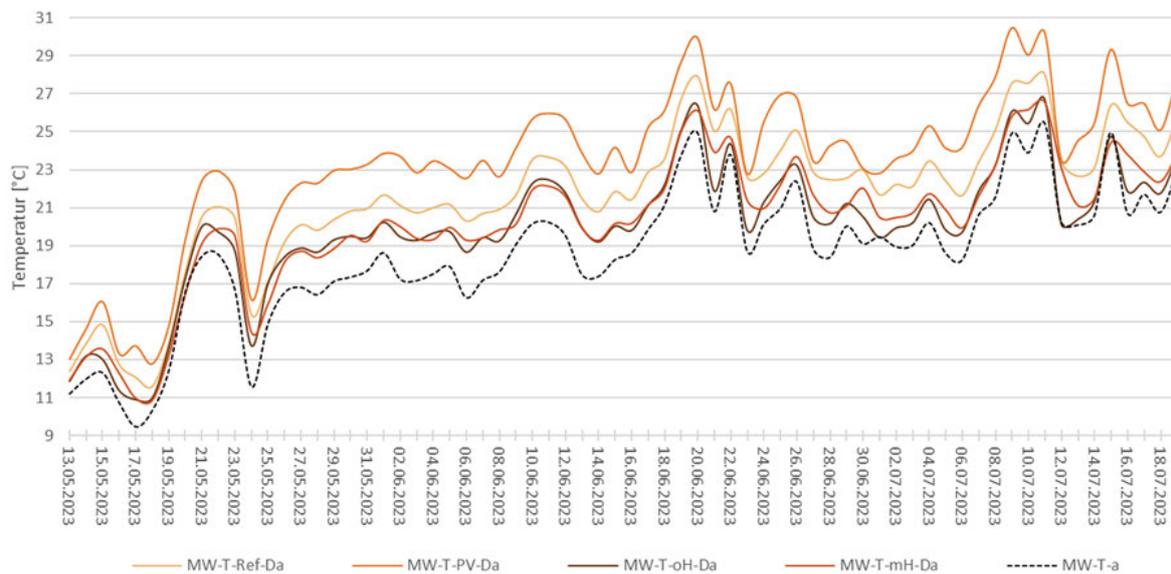
In diesem Abschnitt erfolgt eine Gegenüberstellung sämtlicher Konstruktionsvarianten, um die maßgeblichen hygrothermischen Unterschiede herauszuarbeiten, die sich durch die Integration von PV-Modulen und Begrünung an der Fassade ergeben. Dabei werden die Messdaten der Temperatur, der relativen Feuchte sowie die Materialfeuchte der Dämmung und die ermittelte Holzfeuchte verglichen. Eine eingehende Analyse des Einflusses der Hinterlüftungsebene auf die begrünten Varianten folgt darauf.

Abbildung 84: Legende der Farbkodierung für die Auswertung der hygrothermischen Messergebnisse

Ref			
PV			
mH			
oH			

Für den Vergleich der Temperaturverläufe wurde die Position Da als Referenzpunkt aus allen Konstruktionsvarianten ausgewählt und in Abbildung 85 dargestellt. Diese Position erweist sich als maßgeblicher Indikator für den Einfluss der Außenbedingungen auf die Konstruktion. Abgesehen von dieser Sensorposition liegen alle Unterschiede im Aufbau der Konstruktionsvarianten.

Abbildung 85: Temperaturverläufe aller Fassaden an Position Da ZR 2

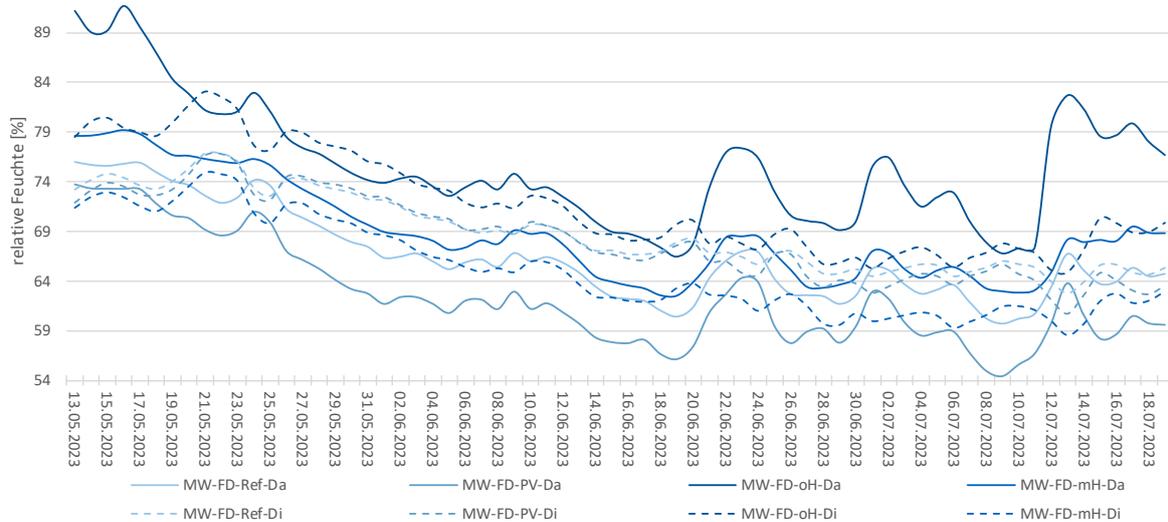


Die statistische Analyse hebt einen durchschnittlichen Temperaturunterschied von 3,4 °C zwischen den Verläufen hervor. Die PV-Fassade zeichnet sich mit einem Höchstwert von 23,4 °C als wärmste Variante aus, während die beiden begrünten Fassaden mit 20,0 °C (ohne Hinterlüftung) und 20,2 °C (mit Hinterlüftung) die kühlest sind. Aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung der Fassaden lässt sich jedoch nicht unmittelbar ableiten, welchen Einfluss die Begrünung auf den Wärmetransport hat. Eine klare Bestimmung des direkten Einflusses der Module auf den Wärmetransport in der Fassade gestaltet sich als schwierig. Die Auswirkung der Hinterlüftung ist durch den alleinigen Vergleich der begrünten Fassaden anhand der berechneten Mittelwerte nicht möglich, dafür sind die Differenzen zu gering. Der Vergleich der beiden Verläufe lässt allerdings eine unregelmäßige Phasenverschiebung sowie eine Abweichung der Extremwerte erkennen. Die Konstruktion ohne Hinterlüftung reagiert dabei schneller und intensiver auf äußere Einflüsse.

Der Vergleich zwischen der Referenzfassade und der PV-Fassade offenbart einen durchschnittlichen Temperaturunterschied von 1,8 °C. Dieser Unterschied lässt sich auf zwei Faktoren zurückführen. Zum einen spielt die Höhe der Sensorposition in den unterschiedlich hoch angebrachten Fassadenvarianten eine zentrale Rolle. Die Referenzfassade, aufgrund früherer Verschattung weniger direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt, heizt sich daher weniger auf. Zum anderen ist eine rückseitige Wärmeabstrahlung der PV-Module vorhanden. Die Module erreichen nach Angaben des Herstellers AVANCIS Temperaturen von bis zu 60 °C [105]. Dadurch werden auch die dahinterliegende Hinterlüftungsebene sowie das Bauteil aufgeheizt.

Die Messungen der relativen Feuchte sind in Abbildung 86 zu sehen. Anhand der Daten wird ersichtlich, dass die begrünte Fassade ohne Hinterlüftung an beiden Positionen in der Dämmebene die höchsten durchschnittlichen relativen Feuchtwerte aufweist: 75,7 % (MW-FD-oH-Da) und 71,8 % (MW-FD-oH-Di). Auch die begrünte Fassade mit Hinterlüftung zeigt an Position Da mit 68,8 % eine im Mittel höhere relative Feuchte als in Position Di mit 65,2 %. Hingegen zeigen die süd-westorientierten Konstruktionsvarianten PV- und Referenzfassade ein gegensätzliches Muster mit höheren Werten für Di. Insbesondere die PV-Fassade zeigt einen markanten Unterschied zwischen den beiden Positionen, wobei die relative Feuchte an Di mit 68,3 % um etwa 6 % höher ist als an Position Da mit 62,5 %. Gleichzeitig sind die gemessenen Werte an Position Da der PV-Fassade im Durchschnitt am geringsten. Dieser Unterschied resultiert aus der Orientierung und der geringen Verschattung dieser Fassade, kombiniert mit der Abstrahlung der PV-Module, was zu erhöhten Temperaturen und folglich niedrigeren Feuchtwerten an Position Da führt. Beim Vergleich aller Temperaturdatenreihen der inneren Dämmposition zeigen sich eingependelte Werte, die plausible Messergebnisse darstellen.

Abbildung 86: Verläufe der relativen Feuchte aller Fassaden in der Dämmebene ZR 2

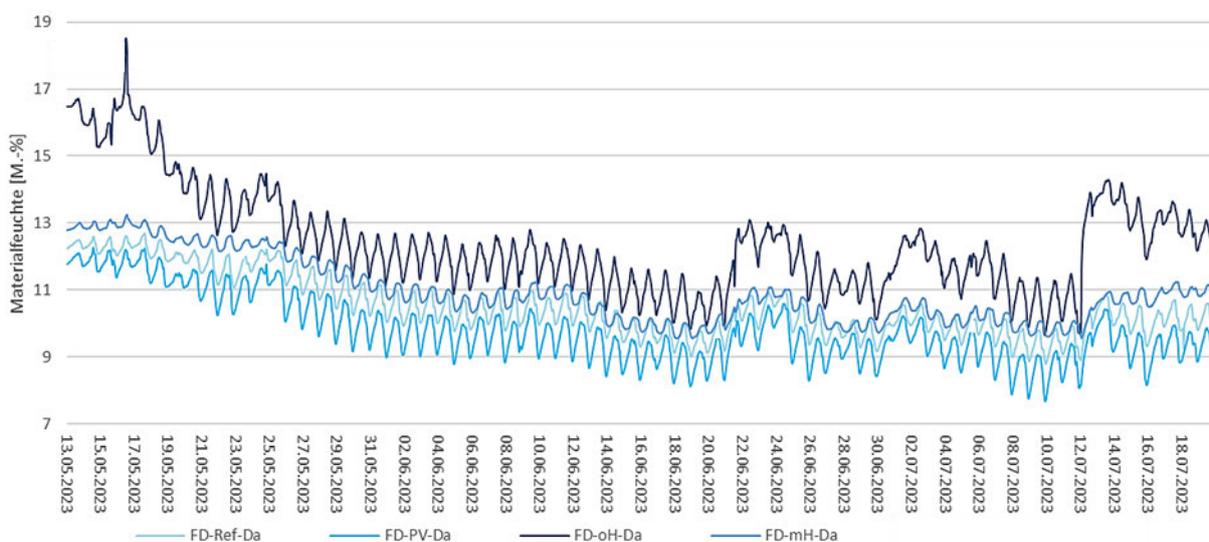


Zur genaueren Analyse der kritischen Bereiche der Konstruktionsvarianten im Hinblick auf den Feuchtegehalt bietet Abbildung 87 einen detaillierten Einblick in die berechnete Materialfeuchte der Zellulosedämmung. Dieser Wert wurde unter Anwendung der von ISOCELL bereitgestellten Sorptionsisotherme in der äußeren Dämmung (Da) ermittelt [104].

Die durchschnittlichen Feuchtegehalte der hinterlüfteten Fassadenvarianten bewegen sich innerhalb eines Bereichs von 9,8 M.-% (PV-Da) bis 10,9 M.-% (mH-Da). Über den gesamten Untersuchungszeitraum zeigt sich ein abnehmender Trend, wobei die Differenz zwischen der ersten und letzten Woche durchschnittlich 2,1 M.-% beträgt. Beim Vergleich der Fassaden mit Hinterlüftungsebene fällt auf, dass die Fassade mit Selbstklimmer-Elementen und Hinterlüftung die höchsten Feuchtigkeitswerte aufweist, während die PV-Fassade die trockenste Dämmung aufzeigt.

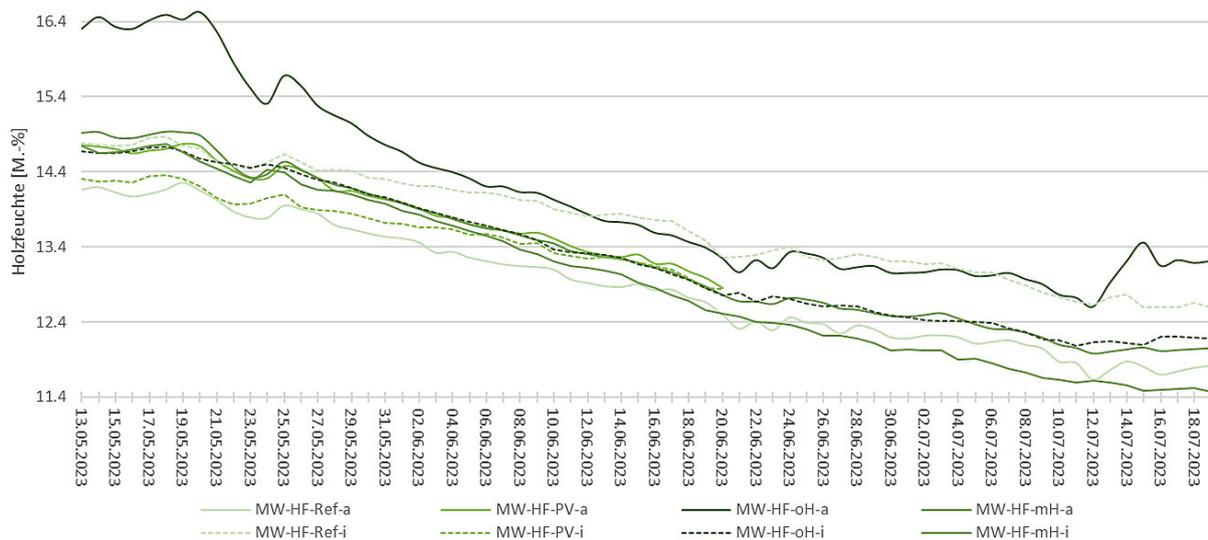
Die Feuchtigkeitsdaten der nicht hinterlüfteten begrünten Fassade zeigen im Vergleich mit den anderen Fassaden größere Unstetigkeit und Schwankungen. Mit einem durchschnittlichen Wert von 12,4 M.-% ist hier die Dämmung zudem feuchter als bei den anderen drei Konstruktionsvarianten.

Abbildung 87: Materialfeuchte der Zellulosedämmung aller Fassaden ZR 2



Für einen Vergleich der Holzfeuchte in sämtlichen Bauteilaufbauten sind in Abbildung 88 die Messdaten der Positionen a und i aufgeführt. Diese Daten ermöglichen eine Analyse des Feuchtigkeitsverlaufs über die Tiefe des Holzständers. Obwohl bei der Referenz- und PV-Fassade die höchsten Mittelwerte an der Position m gemessen wurden – die jedoch nur um jeweils 0,1 M.-% höher sind als an Position a – wurden diese Werte zur besseren Übersichtlichkeit des Diagramms vernachlässigt.

Abbildung 88: Holzfeuchteverlauf aller Fassaden Positionen a und i im ZR 2



Die Darstellung der Messwerte verdeutlicht, dass keine der Fassaden den kritischen Grenzwert für die Holzfeuchte von 20 M.-% überschreitet. Alle Graphen folgen einem abnehmenden Trend, der in bauphysikalischer Hinsicht kohärent mit den Wettereinflüssen ist. Über den analysierten warmen Zeitraum hinweg zeigen die Konstruktionen eine eindeutige Tendenz zur Austrocknung. Der Holzständer - Position a der begrünten Fassade ohne Hinterlüftung – weist zu Beginn des betrachteten Zeitraums die höchste Feuchtigkeit auf (16,4 M.-%) – ein Unterschied von etwa 1 M.-% im Vergleich zu den anderen Positionen. Im Verlauf der Periode mit konstanten und steigenden Wetterbedingungen nähert sich dieser Feuchtigkeitsverlauf den Werten der anderen Positionen an. Weiterhin ist die anhaltend hohe und nur langsam abnehmende Holzfeuchte der Referenzfassade an Position i auffallend.

Vergleich der hinterlüfteten begrünten Konstruktion zur nicht hinterlüfteten

Bei der begrünten Fassade ist vor allem der Einfluss der Hinterlüftung von Interesse. Die vorherige Vergleichsanalyse der verschiedenen Konstruktionsvarianten für beide Zeiträume hebt insbesondere die variierenden Feuchteinträge in die einzelnen Konstruktionen hervor. Die relative Feuchte der Dämmebene ist bei der Fassade ohne Hinterlüftung stets feuchter als mit Hinterlüftung. Gleichzeitig zeigt der Temperaturvergleich an der kritischen Position Da lediglich eine Differenz von 0,2 °C. In Bezug auf die Holzfeuchte an der kritischen Position a, weist die nicht hinterlüftete Fassade einen durchschnittlich 0,8 M.-% höheren Wert auf.

Für die weiterführende Analyse des Hinterlüftungseinflusses auf das hygrothermische Verhalten der begrünten Fassade werden nachfolgend die Daten der punktuellen Anemometermessungen herangezogen. Die nachfolgenden Diagramme in Abbildung 89 und Abbildung 90 veranschaulichen die Messdaten zu Luftgeschwindigkeiten und Volumenströme, jeweils mit ihren durchschnittlichen (Avg) sowie minimalen und maximalen Werten.

Abbildung 89: Luftgeschwindigkeit in der Hinterlüftung der Selbstklimmer-Fassade an ausgewählten Tagen in [m/s]

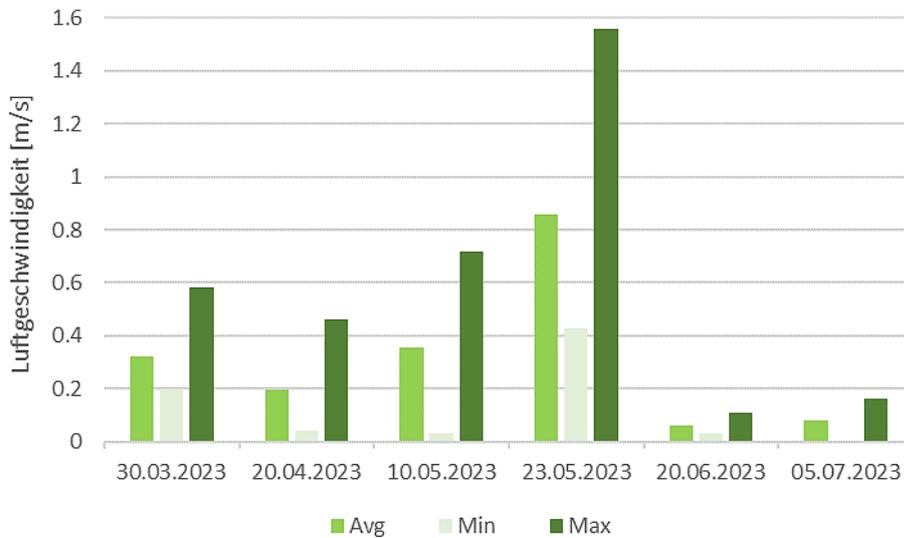
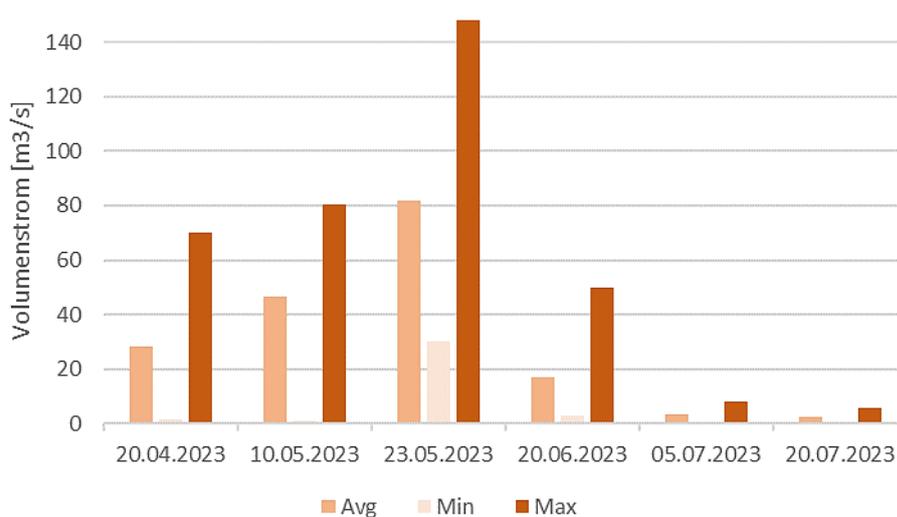


Abbildung 90: Volumenstrom in der Hinterlüftung der Selbstklimmer-Fassade an ausgewählten Tagen in [m³/s]



Am 23.05. zeichnet sich eine markante Zunahme der Luftgeschwindigkeit und des Volumenstroms ab, mit durchschnittlich 0,86 m/s bzw. 81,9 m³/s (gemessen um 13:40 Uhr). Diese Werte sind eine direkte Folge der Windgeschwindigkeit von 1,65 m/s, die für 14:00 Uhr laut der Wetterstation registriert wurde (siehe Abbildung 62). Der Wind kommt zu diesem Zeitpunkt aus westlicher Richtung und beeinflusst maßgeblich die Luftströmung an der Fassade. Der thermische Einfluss ist hierbei, bedingt durch die Ausrichtung der Fassade, als gering zu bewerten. Dies wird durch die kurzweiligen Strahlungsdaten um 13:40 Uhr bestätigt, die mit 486,4 W/m² im Vergleich zum durchschnittlichen Tagesmaximum von 805,3 W/m² über den betrachteten Zeitraum 2 keine außergewöhnlich hohen Werte aufweisen. Somit ist der thermische Effekt auf den Luftwechsel in der Hinterlüftung vernachlässigbar.

Dies wird bestätigt durch die Betrachtung gegenteiliger Szenarien. Die Messung vom 20.06 zeigt, dass zu diesem Zeitpunkt die Luftgeschwindigkeit und der Volumenstrom auf niedrigem Niveau lagen. Hierbei erreicht die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit um 13:45 Uhr lediglich 0,06 m/s und der Volumenstrom 17,0 m³/s. Zu diesem Zeitpunkt kommt der Wind mit einer Geschwindigkeit von 0,75 m/s aus östlicher Richtung und beeinflusst den Luftwechsel in der Hinterlüftung der begrünten Fassade nur minimal. Die kurzweilige Strahlung ist mit 821,0 W/m² höher als das durchschnittliche Tagesmaximum. Trotz

Berücksichtigung der Orientierung ist auch hier kein signifikanter Effekt der solaren Strahlung auf den Luftwechsel in der Hinterlüftungsebene zu verzeichnen.

Am 05.07. um 12:15 Uhr lag die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit bei 0,08 m/s und der Volumenstrom bei 3,4 m³/s. Die stündlichen Wetterdaten zeigen für diesen Zeitpunkt eine Windgeschwindigkeit von 1,03 m/s aus östlicher Richtung. Gleichzeitig ist eine Abnahme der kurzwelligen Einstrahlung von 646 W/m² auf 389 W/m² und kühlere Temperaturen um 5 °C zu verzeichnen. Der Einfluss des Windes und der solaren Einstrahlung auf den Luftwechsel in der Hinterlüftungsebene ist somit als marginal einzustufen.

Für eine präzise Analyse der Hinterlüftungsebene werden nun die Verläufe der relativen Feuchte an Position Da an den genannten Tagen für beide begrünten Konstruktionsvarianten detailliert betrachtet. Die Differenz der relativen Feuchte zwischen den Konstruktionen an Position Da beläuft sich am 23.05. auf 5,7 %, am 20.06. auf 4,5 % und am 05.07. auf 6,7 %. Trotz dieser detaillierten Einblicke ergeben sich keine eindeutigen Schlussfolgerungen bezüglich der Korrelation zwischen dem Luftwechsel in der Hinterlüftung und der resultierenden Feuchte an Position Da in der Dämmung. Der Versuch Tagesmittelwerte und stündliche Feuchtemesswerte anhand der Windgeschwindigkeit zu kategorisieren und eine Verbindung zwischen diesen Parametern herzustellen, lieferte keine klaren Ergebnisse. An Tagen mit durchschnittlich hohen Windgeschwindigkeiten (> 0,5 m/s) liegt die relative Feuchte an beiden begrünten Konstruktionen und Positionen in der Dämmung etwa 2 % höher im Vergleich zu Tagen mit Windgeschwindigkeiten unter 0,2 m/s. Die punktuellen Messungen mit dem Handanemometer bieten keine ausreichenden Erkenntnisse über den tatsächlichen Einfluss der Hinterlüftungsebene auf die resultierende Feuchte in der Dämmung der Konstruktionen. Daher kann ein Vergleich der beiden Selbstklimmer-Fassaden ausschließlich auf Grundlage der Ergebnisse des hygroskopischen Verfahrens erfolgen.

Vergleich der Messdaten ohne Einflüsse durch Position und Orientierung

Nach der Messdatenauswertung und dem Vergleich der einzelnen Konstruktionsvarianten wird deutlich, dass ein Herstellen direkter Abhängigkeiten Einschränkungen mit sich bringt. Einerseits ist die Intensität der solaren Einstrahlung und andererseits die Windgeschwindigkeit aufgrund der Orientierung der vier untersuchten Fassaden unterschiedlich. Auch Niederschlag und Luftzirkulation verhalten sich hierdurch anders. Weiterhin befinden sich die Sensoren an denselben Fassaden auf unterschiedlichen Gebäudehöhen. Der Unterschied von rund zwei Metern kann je nach Verschattung die Ergebnisse beeinflussen.

Um einen aussagekräftigen Vergleich zwischen den Varianten zu ermöglichen, werden im Folgenden die meisten problematischen Einflussfaktoren eliminiert. Hierfür werden die nächtlichen Temperaturdaten an drei vergleichsweisen windstillen Tagen erfasst und über die kühlest Stunden hinweg miteinander verglichen. Die Auswahl der Tage basiert auf durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten: der 08.07. mit 0,404 m/s, der 11.07. mit 0,384 m/s und der 13.07. mit 0,379 m/s.

Die Temperaturdaten an der Position Da werden an diesen Tagen über einen Zeitraum von neun Stunden, von 00:00 Uhr bis 09:00 Uhr, verglichen, und die Differenzen in den minimalen Werten werden ausgewertet. Die verschiedenen Konstruktionsvarianten zeigen ihre Minima zwischen 06:00 Uhr und 08:00 Uhr, wobei die Varianten PV und oH ihr Minimum etwa eine Stunde früher erreichen als die Varianten Ref und mH.

Die Differenzen zwischen diesen Werten belaufen sich auf 0,6 °C bis 1,4 °C für die Varianten Ref, PV und mH. Besonders markant ist, dass das Minimum der Variante oH an allen drei Tagen im Vergleich um 1,8 °C bis 2,7 °C niedriger ausfällt. Dabei ist zu beachten, dass der Einfluss der Wärmespeicherung in den Bauteilkonstruktionen für eine ganzheitliche Interpretation nicht vernachlässigt werden darf. Dennoch verdeutlichen diese Daten einen Unterschied im Temperaturgefälle, der die puffernde Wirkung der Hinterlüftungsebene unterstreicht.

Da die gemessenen Daten sich ausschließlich über einen Sommerzeitraum erstrecken und Messausfälle zu verzeichnen waren, können diese nicht als Basis für eine Auswertung dienen. Stattdessen werden sie zur Validierung der Simulationsergebnisse, welche im folgenden Kapitel erläutert werden, herangezogen.

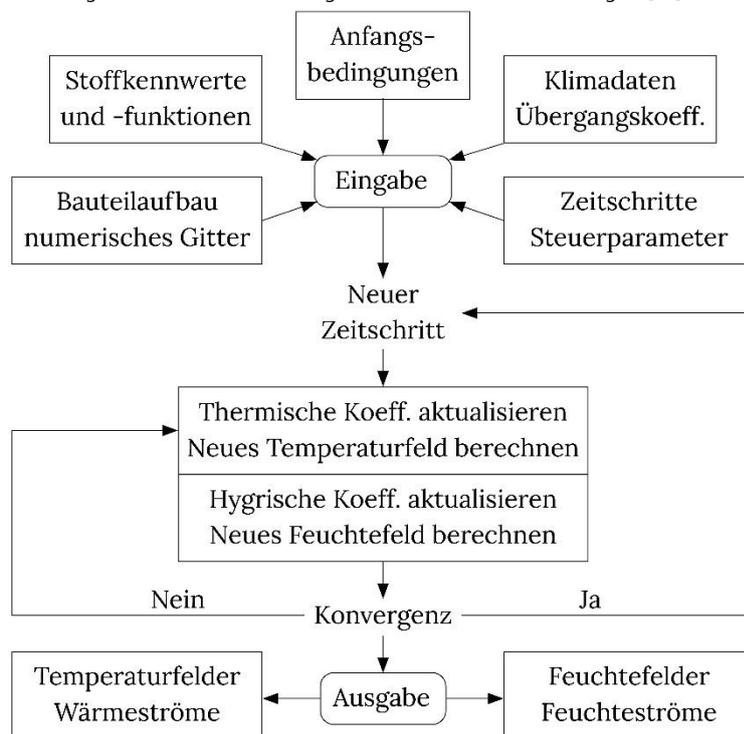
Simulationsbasierte Untersuchung

Als Simulationssoftware wurde das Programm WUFI Pro 6.7 (**W**ärme **u**nd **F**euchte **i**nstationär) ausgewählt. WUFI berechnet anhand eines numerischen Berechnungsverfahrens instationäre Wärme- und Feuchtfelder über einen Bauteilquerschnitt. In der Version WUFI Pro 6.7 werden Bauteile eindimensional von innen nach außen betrachtet [50]. Das Programm verfügt über eine umfangreiche Materialdatenbank, hat sich bei hygrothermischen Simulationen in den vergangenen Jahren bewährt und ist umfangreich dokumentiert. Gleichzeitig erlaubt das Simulationsprogramm Nachweise im Rahmen der DIN 4108-3 [106] in Verbindung mit DIN 15026 [51] unter Betrachtung der Aspekte des Holzschutzes nach DIN 68800-2 [107] zu führen [108].

Modellierung der greenTES-Fassaden

Abbildung 91 zeigt den allgemeinen Ablauf des Berechnungsmodells in WUFI Pro 6.7.

Abbildung 91 Ablauf des Berechnungsmodells in WUFI in Anlehnung an [50]



Für die Modellierung in WUFI sind verschiedene Eingabeparameter notwendig. Einige Parameter sind durch die in den einzelnen Konstruktionsvarianten verwendeten Materialien und Schichtdicken vorgegeben (vgl. Kapitel greenTES Konstruktionsvarianten). Zudem liefern die softwareinterne Datenbank von WUFI und das vorangegangene Forschungsprojekt über ein Gründachmodell Inputdaten [108, 109]. Weitere Parameter werden durch Simulationen ermittelt oder angenommen.

Die Eingabeparameter lassen sich gemäß Tabelle 14 in die Kategorien ‚Grundkennwerte‘ und ‚Hygrothermische Funktionen‘ gliedern. Dabei zählen die Grundkennwerte zu der minimalen Berechnungsgrundlage für eine hygrothermische Berechnung. Die hygrothermischen Funktionen gehen über die Grundkennwerte hinaus und werden nicht bei jedem Material benötigt. Sie werden durch Zahlenwerte erstellt und als Tabelle in der Software WUFI Pro 6.7 eingepflegt [110].

Tabelle 14 Eingabeparameter für den Bauteilaufbau. Entnommen aus [108]

Anzahl der Konstruktionsschichten	[-]
Dicke der Konstruktionsschichten	[mm]
Grundkennwerte der Materialien	Rohdichte [kg/m ³]
	Porosität [m ³ /m ³]
	Spez. Wärmekapazität [J/kgK]
	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]
	Typische Baufeuchte [kg/m ³]
Hygrothermische Funktion der Materialien	Feuchtespeicherfunktion (Wassergehalt [kg/m ³] pro rel. Feuchte [%])
	Flüssigkeitstransportkoeffizient (Saugen) (Flüssigkeitstransportkoeffizient [m ² /s] pro Wassergehalt [kg/m ³])
	Flüssigkeitstransportkoeffizient (Weiterverteilung) (Flüssigkeitstransportkoeffizient [m ² /s] pro Wassergehalt [kg/m ³])
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (feuchteabhängig) (Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-] pro rel. Feuchte [%])
	Wärmeleitfähigkeit (feuchteabhängig) (Wärmeleitfähigkeit [W/mK] pro Wassergehalt [°C])
	Wärmeleitfähigkeit (temperaturabhängig) (Wärmeleitfähigkeit [W/mK] pro Temperatur [kg/m ³])
	Enthalpie (temperaturabhängig) (Spez. Enthalpie [J/kg] pro Temperatur [°C])

Die interne Materialdatenbank von WUFI Pro 6.7 enthält einige hygrothermische Materialdatensätze. Sie beinhaltet alle Grundkennwerte und weitestgehend die relevanten hygrothermischen Funktionen [108]. Die mit den Konstruktionsaufbauten übereinstimmenden Datensätze aus der Datenbank werden für die Modellierung in WUFI verwendet. Ist kein identischer Datensatz vorhanden, aber einer mit ähnlichen Stoffeigenschaften, wird dieser an das verwendete Material durch Werte aus Datenblättern oder Angaben des Herstellers angenähert. Die für die Modellierung der greenTES-Konstruktionsvarianten benötigten Materialien sind in Tabelle 15 aufgelistet. Die Authentizitätsskala gibt dabei Auskunft über die Herkunft des Materialdatensatzes und den Grad der Annahmen.

Tabelle 15 Zusammenstellung der greenTES-Konstruktionsmaterialien und der zugehörigen Datenquelle. Authentizität: xxx = aus der WUFI-Materialdatenbank übernommen, xx = Anpassung eines existierenden Datensatzes, x = eigenständig angenähert.

Material	Authentizität	Datenquelle
Begrünung		Eigene Modellentwicklung

Material	Authentizität	Datenquelle
PV-Modul		Eigene Modellentwicklung
Pflanzrinnensystem	x	Grundmaterial: <i>Metal Deck</i> [111] Angepasst durch Materialkennwerte [39]
Holz: Fichte, radial	xxx	Fraunhofer Institut für Bauphysik [108]
Aquapanel	x	Grundmaterial: <i>Weather Defence</i> [112] Angepasst durch Herstellerinformationen
Luftschicht	xxx	Fraunhofer Institut für Bauphysik [108]
Winddichtung	x	Grundmaterial: <i>Witterungsschutzbahn</i> Angepasst durch Datenblatt [113]
Gipsfaserplatte	xxx	Fraunhofer Institut für Bauphysik [108]
Zellulosedämmung	xxx	Fraunhofer Institut für Bauphysik [108]
OSB-Platte	xx	Fraunhofer Institut für Bauphysik für d=12mm und d=25mm [108] Rechnerische Ableitung weiterer Materialstärken

Die in der Modellierung der greenTES Konstruktionen verwendeten Materialien und ihre Grundkennwerte sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16 Grundkennwerte der in den Simulationen verwendeten Materialien

Material	Rohdichte [kg/m ³]	Porosität [m ³ /m ³]	Spez. Wärmekapazität [J/kgK]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusionswiderstand [-]	Typ. Baufeuchte [kg/m ³]
Pflanzrinnen	7800	0,001	450	17	9999	0,0018
Holz: Fichte, radial	455	0,73	1400	0,09	130	80
Aquapanel	1159	0,627	850	0,313	26	5,9
Luftschicht	1,3	0,99	1000	0,18	0,46	
Winddichtung	250	0,001	2300	2,3	42	
Gipsfaserplatte	1153	0,52	1200	0,32	16	15,8
Zellulose	50-60	0,95	2110	0,37	1,8	5
OSB-Platte	673	0,66	1400	0,12	107	

Die Materialien decken die Bestandteile der Modellierung der Grundkonstruktion (GK) ab. Je nach greenTES-System wachsen vor der Holzkonstruktion Pflanzen als Fassadenbegrünung oder sind PV-Module angebracht (vgl. Kapitel greenTES Konstruktionsvarianten). Für diese zwei Schichten gibt es keine Datensätze und Parameter in der Materialdatenbank oder Forschung. Sie werden daher eigens entwickelt.

Modellierung der Fassadenbegrünung

Die WUFI Materialdatenbank beinhaltet Datensätze für Dachbegrünungen. Sie setzen sich aus dem Substrat, einem Schutzvlies, einem Filtervlies oder einer Drainage und der Bepflanzung in Form von Sedum- oder Grasbepflanzung zusammen [108]. Diese Datensätze können jedoch nicht für Fassadenbegrünungen angewandt werden, da:

- Fassadenbegrünungen kein vollflächiges Substrat besitzen
- Die Parameter die Übergänge und Einflüsse für eine horizontale und nicht für eine vertikale Ebene abbilden

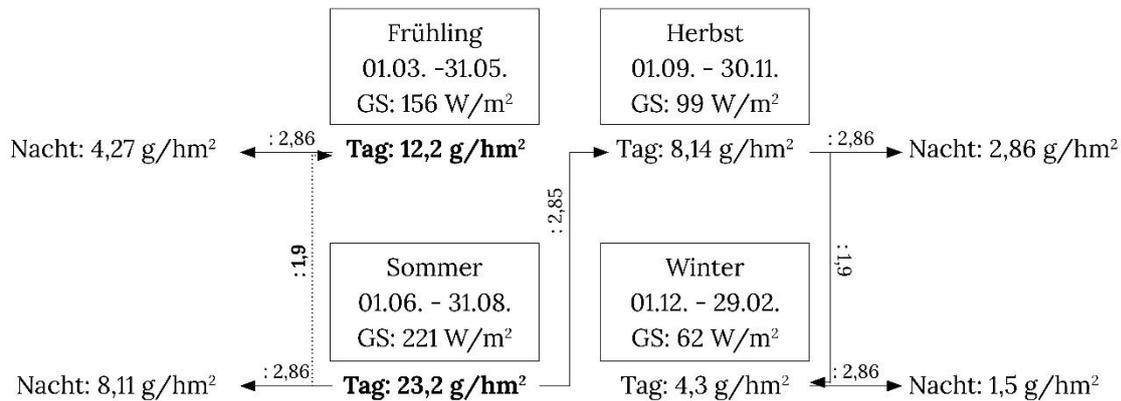
Daher wird eine neuer Datensatz für Fassadenbegrünungen erstellt, der die folgenden hygrothermischen Mechanismen abbildet: Fassadenbegrünung besteht aus einzelnen Blättern, Stängeln und Blüten, die von Luft umgeben sind. An die Fassade gelangender Wind wird in dieser Begrünung abgebremst. Die Blätter halten zudem Regen von der Fassade ab und fangen ihn auf ihrer Oberfläche auf. Die Feuchtigkeit sowie sich bildendes Tauwasser auf den Oberflächen verdunstet vor der Fassade [114]. Ein Teil der Solarstrahlung wird von den Blättern absorbiert und gelangt nicht mehr an die Fassadenoberfläche. Durch Strahlung wird die Fotosynthese der Pflanzen angetrieben. In diesem Prozess nutzen die Pflanzen die Energie der Solarstrahlung und entziehen sie ihrer direkten Umgebung. Zusätzlich transpirieren Pflanzen dauerhaft Wasser, um den Wassertransportkreislauf von den Wurzeln in die Blätter aufrechtzuhalten. Je wärmer die Umgebungstemperatur ist, desto mehr Feuchtigkeit benötigen die Pflanzen und die transpirierte Wassermenge steigt an [115].

Diese Eigenschaften werden in WUFI im ersten Schritt durch das Material einer Luftschicht abgebildet. Dadurch werden die Einflüsse des Außenklimas abgemildert und eine dämmende Wirkung auf die dahinterliegende Konstruktion erzielt. Auf die Außenoberflächentemperatur der Grundkonstruktion wirkt sich die Luftschicht durch einen Temperaturanstieg aus. Dieses Verhalten repräsentiert die Eigenschaften des Abschirmens von direktem Regen durch die Pflanzen und der schützenden Schicht der Fassadenbegrünung vor Windeinflüssen.

Um die Verschattung und den grünen Farbton der Pflanzen abzubilden, wird die kurzwellige und langwellige Strahlungsemissionszahl auf 0,3/0,6 und 0,9 respektive angepasst [116]. Veränderungen des Wärmeübergangskoeffizienten haben gemäß Aussagen eines Forschungsprojekts des Fraunhofer-Instituts IBP zur Dachbegrünungsmodellierung für WUFI nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis haben und können vernachlässigt werden [117].

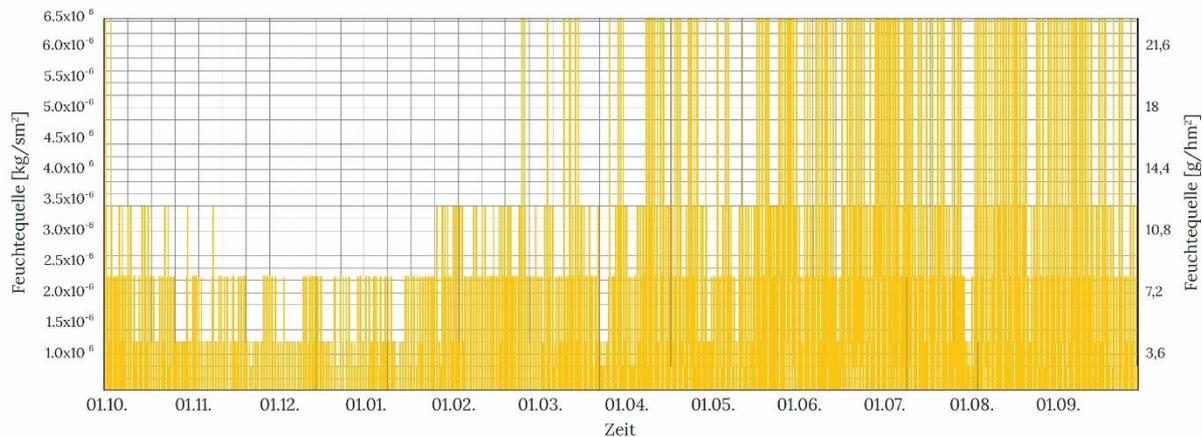
Um die Feuchtigkeitseinwirkung durch die Fassadenbegrünung auf die Konstruktion abzubilden, wird zusätzlich eine Feuchtequelle in der Mitte der Begrünungsschicht in den Datensatz eingefügt. Zur Dimensionierung der Feuchtigkeitsmenge werden Werte aus der Literatur herangezogen [118]. Hier wurden Messwerte über einen Zeitraum vom 20. Februar bis 10. Juli erhoben und aus diesen Daten für die Jahreszeiten Frühling und Sommer der jeweilige Mittelwert gebildet. Für die Sommermonate ergibt sich somit eine Transpiration von 23,2 g/m²h und für den Frühling 12,2 g/m²h [118]. Die Transpirationen für den Herbst und Winter sind von diesen Daten in Abhängigkeit der Globalstrahlung gemäß Abbildung 92 abgeleitet – je höher die Globalstrahlung, desto höher ist auch die Transpiration. Für die Nacht ist die Feuchtigkeitsmenge des Tages individuell für die Jahreszeiten gemindert. Sie sinkt jedoch nie auf null, da eine nächtliche Transpiration der Pflanzen angenommen wird.

Abbildung 92 Herleitung der Feuchtigkeitsmenge für Fassadenbegrünung basierend auf [118]



Die Feuchtigkeitsmenge der Begrünung wird für ein Jahr berechnet (siehe Abbildung 93) und wiederholt sich fortlaufend, wie auch die Wetterdaten in der Simulation.

Abbildung 93 Feuchtequelle des Fassadenbegrünungsmodells mit Feuchtigkeitsmenge über das Jahr



Eine weitere Anpassung wird am anhaftenden Teil des Regens vorgenommen. Dieser Faktor wird gewöhnlich gemäß Bauteilneigung modelliert und beinhaltet, dass ein Teil des Regens an der Oberfläche abprallt oder herunterläuft. Da die Blätter Regentropfen zurückhalten, wird der Faktor für die Begrünung auf eins gesetzt, d.h. die Regenbelastung wird maximiert.

Die Auswirkungen des Verteilungsbereichs der Feuchtequelle werden durch eine Parameterstudie mit unterschiedlichen Bereichen untersucht. Die Analyse ergibt, dass der Wassergehalt zwischen einer Materialstärke von 10 und 90 mm bei identischer Feuchtemenge um maximal 0,1 M.-% variiert. Der Verteilungsbereich einer Feuchtequelle hat demzufolge keine signifikanten Auswirkungen auf das hygrothermische Verhalten.

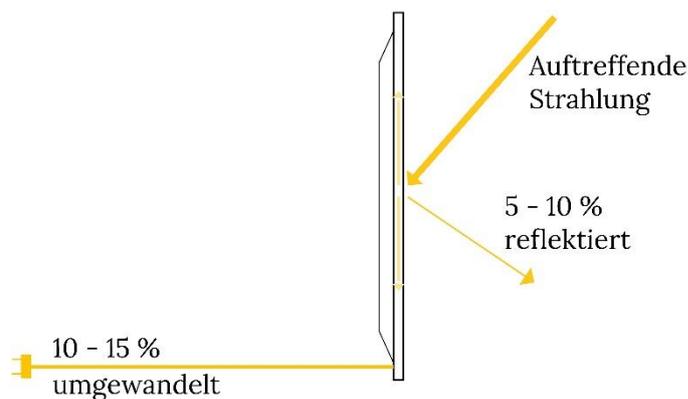
Modellierung der Photovoltaikmodule

Auch für Photovoltaikmodule sind keine Datensätze in der WUFI Materialdatenbank vorhanden. Da das Grundmaterial der Module Glas ist, wird in der Simulation der vorhandene Materialdatensatz für Glas als Basis verwendet. Um dem Glas die opake Eigenschaft der Photovoltaikmodule hinzuzufügen, wird der Oberflächenübergangskoeffizient verändert. Angepasst wird der Wärmeübergangskoeffizient durch Werte der ÖNORM 8110-2 von 17 W/m²K für Außenwände auf 25 W/m²K für Fenster [119]. Die kurzweilige Strahlungsabsorptionszahl wird auf 0,8 einer dunklen Farbe aus der DIN 4108-3 erhöht, um die opake dunkle

Farbe der Photovoltaikmodule abzubilden [106]. Der anhaftende Anteil des Regens wird aufgrund der glatten Oberfläche des Glases vernachlässigt.

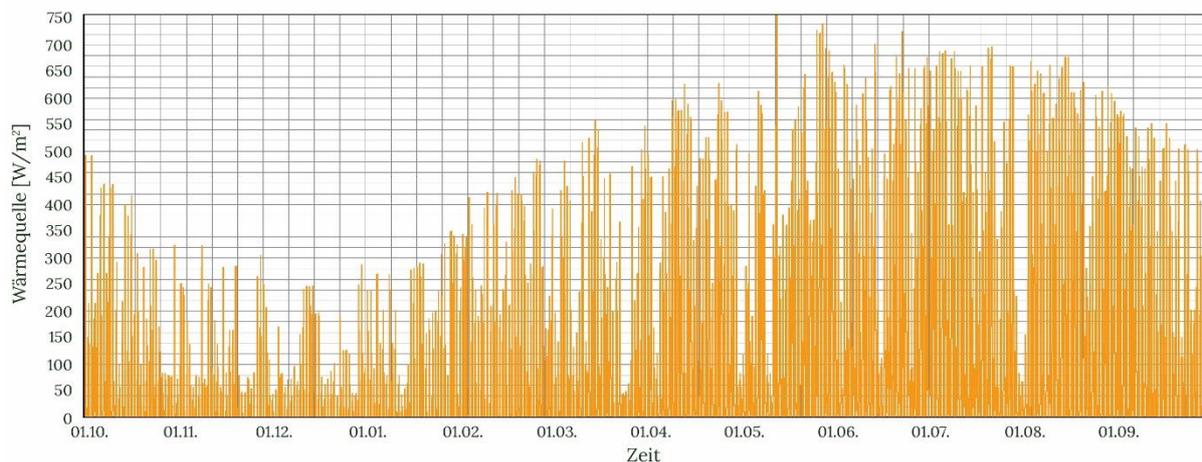
Ein Teil der auf die Module auftreffenden Solarstrahlung wird von den Modulen absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt, ein Teil wird reflektiert und ein Teil in Elektrizität umgewandelt. Die Größenordnung der jeweiligen Teile wird aus einer Einschätzung der Firma AVANCIS abgeleitet (siehe Abbildung 94).

Abbildung 94 Schematische Darstellung der auftreffenden, reflektierten und umgewandelten Strahlung an einem Photovoltaikmodul



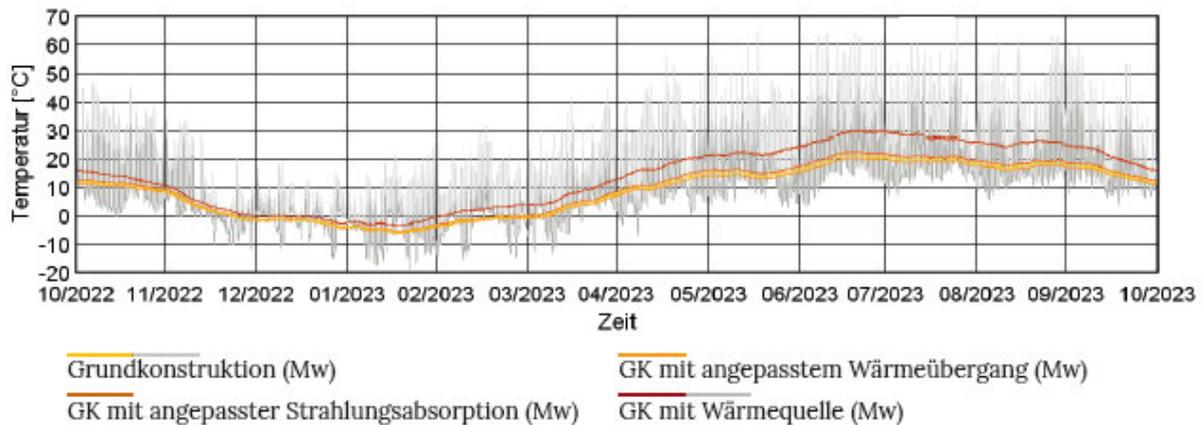
Daraus wird der Anteil der Globalstrahlung bestimmt, der in Wärme umgewandelt wird: 5 - 10 % der auf das PV-Modul auftreffenden Strahlung werden reflektiert und 10 – 15 % in Energie umgewandelt. Es bleiben 85 - 75 % der auftreffenden Strahlung, die in Wärme umgewandelt werden. Für die Dimensionierung wird der Mittelwert von 80 % verwendet. Diese Strahlungsabsorption und Umwandlung in Wärmeenergie sind durch eine Wärmequelle in das Modell der Simulation integriert. Die Wärmequelle ist anhand der Globalstrahlungsdaten aus den Wetterdaten von WUFI dimensioniert. Der resultierende Verlauf der Wärmequelle im Jahresverlauf ist in Abbildung 95 dargestellt.

Abbildung 95 Wärmequelle des Photovoltaikmodells im Jahresverlauf



Auf das hygrothermische Verhalten der Simulation haben die einzelnen Schritte der Modellierung die in Abbildung 96 gezeigten Auswirkungen. Jeder Parameter ist in den Schritten einzeln angepasst und simuliert, um die Auswirkung der Modellierung untersuchen zu können. Die Grundkonstruktion (GK) hat hierbei lediglich das Material Glas gemäß Materialdatensatz der WUFI Datenbank vor der Fassade. Es wird ersichtlich, dass die Implementierung der globalstrahlungsbasierten Wärmequelle die Temperatur des Moduls im Sommer um bis zu 7,5 °C im Mittelwert erhöht. Die Temperatur des Moduls mit Wärmequelle, zu sehen im hellgrauen Graph, erreicht im Sommer Temperaturen um die 60 °C. Hingegen erreicht das Modul der Grundkonstruktion, der dunkelgraue Graph, maximal 46 °C.

Abbildung 96 Gemittelte (Mw) und absolute Temperaturen des Glasmoduls bei den Modellierungsschritten des Photovoltaikaufbaus.



Weitere hygrothermische Quellen

Neben den durch Begrünung und Photovoltaik induzierten Feuchte- und Wärmequellen werden in der Simulation weitere hygrothermische Quellen berücksichtigt.

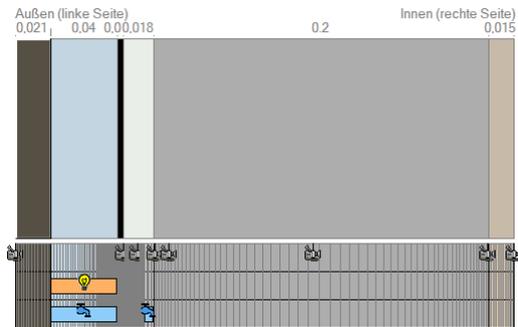
Vorgeschrieben durch die DIN 68800-2 2 [107] und ist die Berücksichtigung einer Infiltrationsquelle auf der kalten Seite der Konstruktion, an der Stelle von zu erwartendem Tauwasserausfall. In den Konstruktionen ist die Quelle in den inneren 0,5 cm der außen liegenden Beplankung eingefügt. Als Quelltyp dient das Luftinfiltrationsmodell des Fraunhofer IBP mit einer Durchströmung der Hülle von 3,0 m³/m²h. Die Höhe der Luftsäule ist mit 5,0 m angesetzt [120].

Eine hinterlüftete Konstruktion erfordert außerdem eine Luftwechselquelle in der Ebene der Hinterlüftung, um das Austrocknen der Konstruktion durch die durchströmende Luft nachzubilden. Die Luftwechselzahl wird unter anderem durch die Konstruktion, Temperatur und Wind wie auch die Größe der Hinterlüftungsöffnung beeinflusst [117]. Um das Verhalten der Konstruktion unter kritischen Bedingungen abzubilden, wird ein Luftwechsel von 10 1/h angenommen. Dieser Wert wird von dem Fraunhofer IBP für belüfteten Putz mit einem Luftspalt von 10 mm empfohlen und ist somit geringer als die für Holzverkleidungen gegebene Luftwechselrate von 20 1/h [120].

greenTES Konstruktionsvarianten

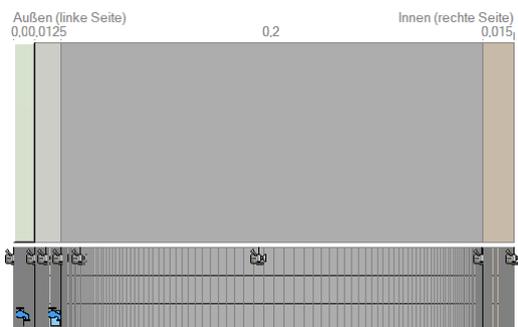
Für die hygrothermischen Simulationen wird jede Konstruktionsvariante im greenTES-Projekt (vgl. Kapitel greenTES Konstruktionsvarianten) gemäß Abbildung 97 in WUFI Pro Version 6.7 implementiert. Das graue Icon einer Kamera setzt eine Monitorposition, die es ermöglicht nach einer Simulation die Feuchte- und Temperaturverläufe an dieser Stelle in der Konstruktion einzusehen. Das blaue Icon eines Wasserhahns steht für eine Feuchtequelle an dieser Position. Ist diese mit einer orangenen Glühbirne kombiniert, handelt es sich um eine Luftwechselquelle. Das Icon der Glühbirne allein stellt eine Wärmequelle dar.

Abbildung 97 Implementierung der greenTES Konstruktionsvarianten in WUFI Pro Version 6.7



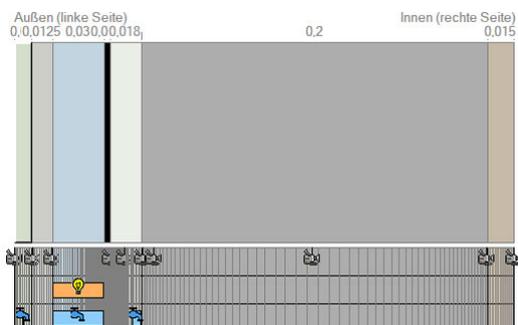
Referenzfassade (Ref)

21 mm	Fichte radial
40 mm	Hinterlüftung mit Luftwechselquelle
1 mm	Winddichtung ($s_d=0,03$)
18 mm	Gipsplatte mit Infiltrationsquelle
200 mm	Zellulosedämmung / Holzständer
15 mm	Living Board (OSB)



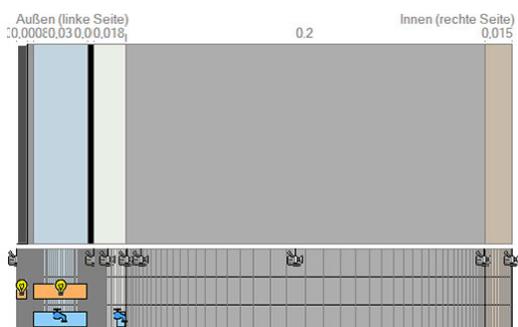
Selbstklimmer ohne Hinterlüftung (oH)

10 mm	Luftschicht mit Feuchtequelle
12,5 mm	Aquapanel mit Infiltrationsquelle
200 mm	Zellulosedämmung / Holzständer
15 mm	Living Board (OSB)



Selbstklimmer mit Hinterlüftung (mH)

10 mm	Luftschicht mit Feuchtequelle
12,5 mm	Aquapanel
30 mm	Hinterlüftung mit Luftwechselquelle
1 mm	Winddichtung ($s_d=0,03$)
18 mm	Gipsplatte mit Infiltrationsquelle
200 mm	Zellulosedämmung / Holzständer
15 mm	Living Board (OSB)



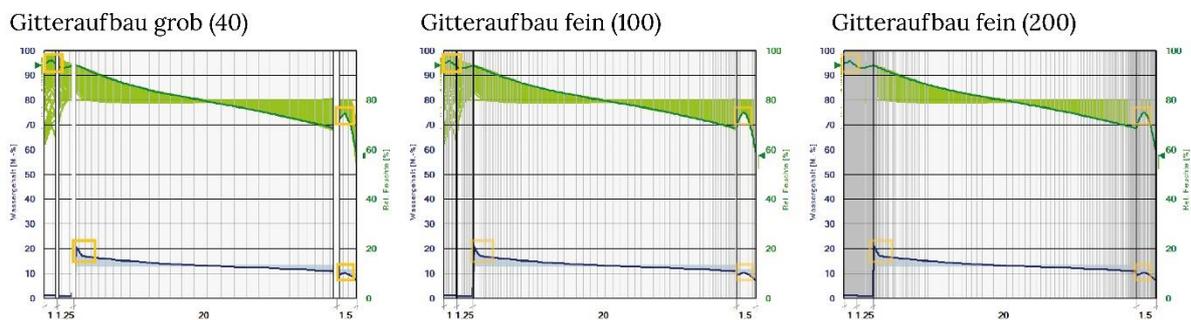
Photovoltaik Dünnschicht (PV)

6 mm	Glas
0,8 mm	Metall
30 mm	Hinterlüftung mit Luftwechselquelle
1 mm	Winddichtung ($s_d=0,03$)
18 mm	Gipsplatte mit Infiltrationsquelle
200 mm	Zellulosedämmung / Holzständer
15 mm	Living Board (OSB)

Gitteraufbau

Dem in WUFI modellierten Konstruktionsaufbau wird ein Simulationsgitter zugewiesen. Das Gitter dient den Berechnungen der numerischen Lösung von Wärme- und Feuchtetransportgleichungen. Die Feinheit des Gitters bestimmt die Auflösung der berechneten Wärme- und Feuchteverteilung. Die Software generiert auf der Grundlage der Schichten und ihrer Stärken automatisch eine an die Konstruktion angepasste Verteilung des Gitters. Eine feine Einstellung des Gitters ist bei steilen Gradienten und ausgeprägten Krümmungen von Wärme- und Feuchteprofilen notwendig. Beeinflusst werden die Gradienten und Krümmungen durch die Randbedingungen, den Bauteilaufbau und die Materialeigenschaften [110]. Knicke in den Verläufen weisen auf eine nicht ausreichende Berechnung an dieser Stelle aufgrund eines zu groben Gitteraufbaus hin. Aufgrund hoher Feuchtelasten empfiehlt das Fraunhofer-Institut IBP für Gründächer einen feinen Gitteraufbau mit 200 Elementen [116]. Durch eine Simulation mit unterschiedlichen Gitteraufbauten zeigt sich ein Gitter mit 200 Elementen als erforderlich und ausreichend (siehe Abbildung 98).

Abbildung 98 Analyse verschiedener Gitteraufbauten von grob (40) bis fein (200)



Oberflächenübergangskoeffizienten

Die für die Simulation relevanten Oberflächenübergangskoeffizienten setzen sich aus den in Tabelle 17 genannten Eingabeparametern zusammen.

Tabelle 17 Eingabeparameter der Oberflächenübergangskoeffizienten. Entnommen aus WUFI [110]

Außenoberfläche	Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
	s_d -Wert [m]
	Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl [-]
	Langwellige Strahlungsabsorptionszahl [-]
	Terrestr. Kurzwelliger Reflexionsgrad [-]
	Anhaftender Anteil des Regens [-]
Innenoberfläche	Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
	s_d -Wert [m]

Der Wärmeübergangskoeffizient definiert dabei die Einflussintensität der Umgebungsbedingungen in Form von Wärme- und Feuchteströmen auf das Bauteil. Für die Außenoberfläche ist der Wärmeübergangskoeffizient für die Fassadenbegrünungsvarianten und die Referenzfassade von einem Außenbauteil nach DIN 4108-3 mit $17 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ angenommen [106]. Der Wärmeübergangskoeffizient der Innenoberfläche beträgt $8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ und wird ebenfalls durch die DIN 4108-3 vorgegeben [106].

Der s_d -Wert der Oberfläche kann über die Oberflächenübergangskoeffizienten für die Außen- und Innenoberfläche definiert werden. Vorgesehen ist das für die vereinfachte Modellierung von dünnen Beschichtungen wie Farben, Putze oder Folien an der Oberfläche [108]. Für die Konstruktionsvarianten ist

keine zusätzliche Beschichtung gegeben. Die Oberflächen der Materialien werden durch die Materialdatensätze bereits berücksichtigt und der zusätzliche s_d -Wert wird vernachlässigt.

Für die Begrünungskonstruktionen wird die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl von 0,3 des generischen Gründachmodells übernommen. Die langwellige Abstrahlung ist über eine reduzierte kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl berücksichtigt [116]. Für die Referenzfassade mit einer Oberfläche aus Fichtenholz ist der Parameter von 0,4 für die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl für unbehandelte Fichte in WUFI vorgegeben [108]. Die Photovoltaikkonstruktionen mit ihrer dunklen Oberfläche werden mit einem Faktor von 0,8 für dunkle Oberflächen nach DIN 4108-3 modelliert [106].

Der terrestrische kurzwellige Reflexionsgrad gibt an, welcher Anteil der auf den Erdboden fallenden kurzwelligen Globalstrahlung reflektiert wird. Er dient der Strahlungsumrechnung auf nicht horizontale Flächen, da auf diese ein Teil der am Erdboden reflektierten Strahlung fällt. Für die Simulation wird er durch den vorgegebenen Standard mit 0,2 angenommen [108].

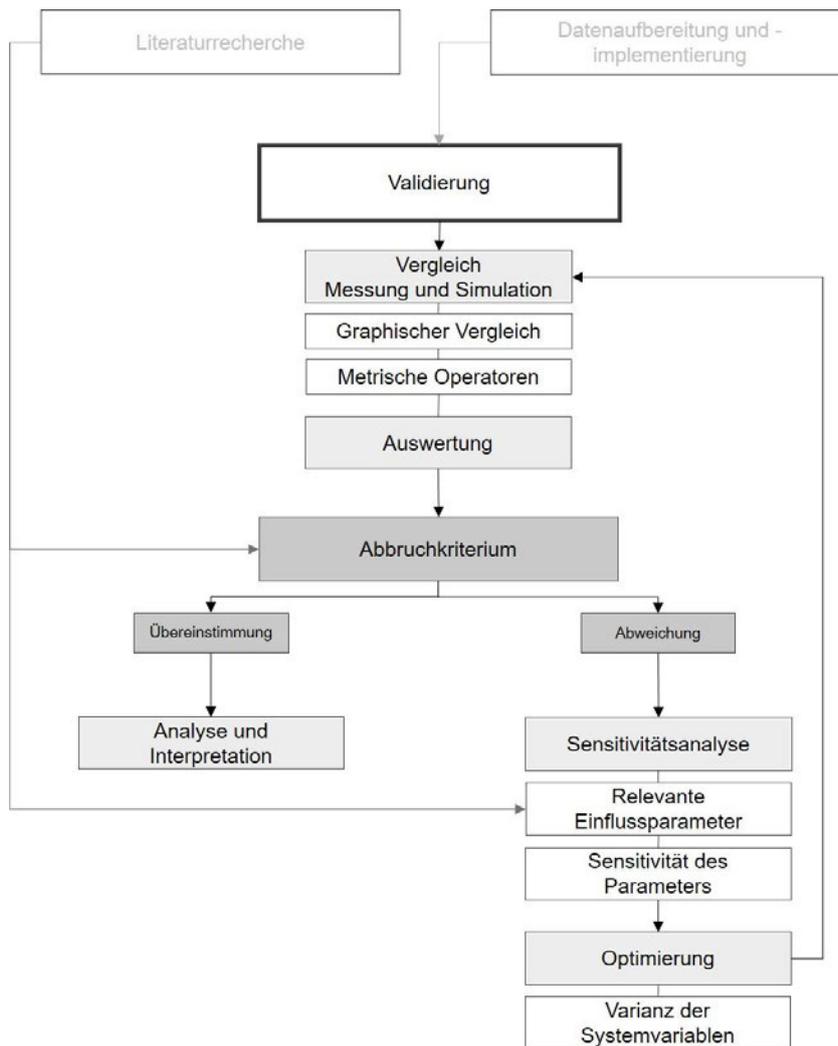
Der anhaftende Anteil des Regens beträgt in der Simulation gemäß der vertikalen Bauteilneigung 0,7 [108]. Dieser Wert wird für die Fassadenbegrünungsvarianten aufgrund der Auflageflächen in den Pflanzen und Rinnen an der Fassade auf 0,9 erhöht. Bei den Photovoltaikvarianten wird wegen der glatten Oberfläche der Glas-Module die Regenwasserabsorption vernachlässigt. Als konstante relative Anfangsfeuchte wird ein Wert von 80 % und als Außentemperatur 20 °C angesetzt, die aus dem WTA Merkblatt 6-8 entnommen werden [55].

Validierung und Optimierung des Simulationsmodells anhand von Messdaten

Um die Genauigkeit und die Grenzen der hygrothermischen Simulationen mit WUFI Pro Version 6.7 bestimmen zu können, werden die Modelle mit den am greenTES Mock-Up erhobenen Messdaten (vgl. Kapitel Messtechnische Untersuchung) gegenübergestellt. Diese Validierung ist insbesondere notwendig, um die neu entwickelten Materialdatensätze für die Fassadenbegrünung und Photovoltaik zu prüfen. Dabei werden zunächst das Simulationsmodell für das Mock-Up erstellt (Modell 1), die erhobenen Wetterdaten als Wetterdatensatz in WUFI Pro implementiert und anschließend die Simulationsergebnisse mit den Messdaten verglichen. Die Auswertung erfolgt basierend auf vorab identifizierten Abbruchkriterien. Eine Sensitivitätsanalyse relevanter Eingangsparameter hilft bei der Optimierung des Modells hin zu den beiden Varianten Modell 2 und Modell 3.

Für die Modellvalidierung wurde basierend auf den in Kapitel Hygrothermische Simulation erläuterten Grundlagen zur Validierung eine Methodik entwickelt, die Abbildung 99 dargestellt ist.

Abbildung 99 Validierungsmethodik



Implementierung

Bei der Datenimplementierung werden die in Tabelle 18 und Tabelle 19 gelisteten Eingabeparameter sowie Rand- und Anfangsbedingungen des Simulationsmodells definiert und das greenTES Mock-Up (vgl. Kapitel Mock-Up) in WUFI modelliert. Die Simulationszeiträume entsprechen dabei den Messzeiträumen (vgl. Kapitel **Messtechnische Untersuchung**).

Tabelle 18 Eingabeparameter Modell 1 in WUFI Pro Version 6.7

Eingabeparameter	oH	mH	Ref	PV
Orientierung	NW	NW	SW	SW
Neigung	90°	90°	90°	90°
Schlagregenbelastung R1/R2	0/0,07	0/0,07	0/0,07	0/0,07
Wärmeübergangskoeffizient (außen)	17	17	17	17
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	0,3	0,3	0,4	0,8

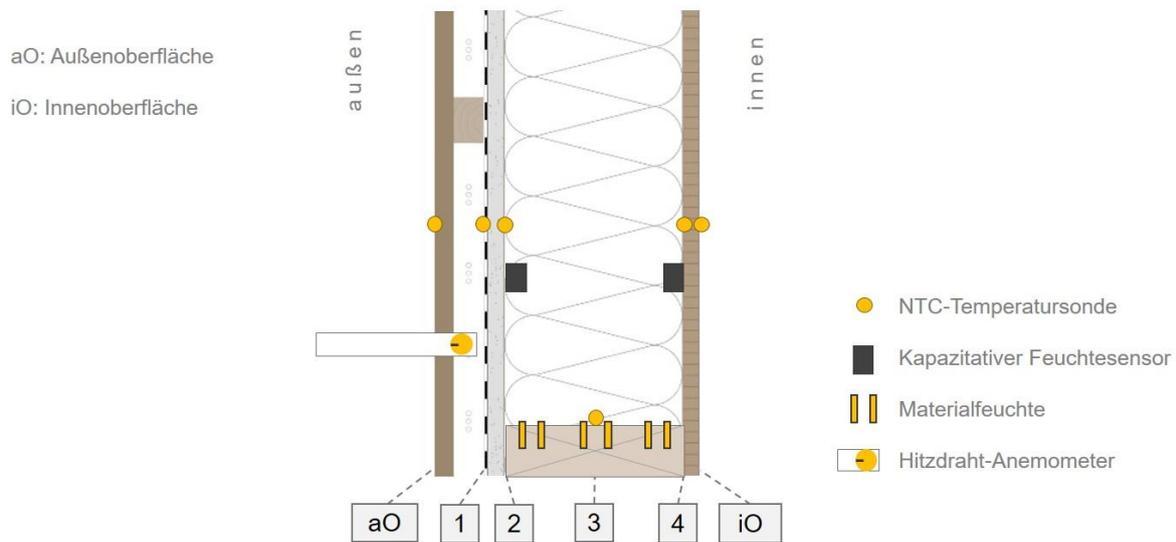
Eingabeparameter	oH	mH	Ref	PV
Terrestrischer kurzwelliger Reflexionsgrad	0,2	0,2	0,2	0,2
Anhaftender Anteil des Regens	1,0	1,0	0,7	-
Wärmeübergangskoeffizient (innen)	8	8	8	8
Feuchtequelle Transpiration	ja	ja	-	-
Feuchtequelle Infiltration	ja	ja	ja	ja
Wärmequelle	-	-	75 %	-
Luftwechselquelle	-	10 1/h	10 1/h	10 1/h

Tabelle 19 Herkunft der Rand- und Anfangsbedingungen des Simulationsmodells (WET = Wetterdaten, BER = Berechnung, MESS = Messdaten)

Wetter	Außenklima	Temperatur außen	°C	RB	WET
		Rel. Luftfeuchte außen	%	RB	WET
		Windrichtung	°	RB	WET
		Windgeschwindigkeit	m/s	RB	WET
		Globalstrahlung	W/m ²	RB	WET
		Bewölkungsgrad	-	RB	BER
		Regen	l/m ² h	RB	BER
Mock-Up	Innenklima	Temperatur innen	°C	RB	MESS
		Rel. Luftfeuchte innen	%	RB	MESS
	Bauteilschicht	Temperatur	°C	AB	MESS
		Rel. Feuchte	%	RB	MESS
		Wassergehalt	kg/m ³	AB	BER
Modell	Mock-Up	Transpirationsfeuchte	kg/m ³	RB	BER
	Wetter	Diffusstrahlung	W/m ²	RB	BER
		Direktstrahlung	W/m ²	RB	BER

Die Bezeichnung des Messstellen und Simulationspunkte erfolgt gemäß Abbildung 100.

Abbildung 100 Position der Messgeräte und Benennung der Simulationspunkte



Vergleich Simulationsergebnisse und Messdaten

Anschließend werden die Simulationsergebnisse mit den erhobenen Messdaten verglichen. Dies geschieht zunächst anhand eines graphischen Vergleichs. Darin werden die Übereinstimmung von Langzeittrends sowie die Ähnlichkeit in Tagesschwankungen analysiert. Danach werden die metrischen Operatoren 90 % Quartil (Q90) und Bestimmtheitsmaß (R²) für die Differenz zwischen den Ergebnisparametern der Simulation und der Messung berechnet (vgl. Kapitel **Hygrothermische Simulation**).

Die Genauigkeit des Simulationsmodells wird durch zwei Faktoren eingeschränkt. Diese sind die Messgenauigkeit der Sensoren und die Fähigkeit des Simulationsmodells die Realität abzubilden. Zu dem zweiten Punkt gehören auch Einschränkungen durch die Eingabeparameter und durch die Modellimplementierung. Für die Beurteilung der Genauigkeit des Modells und einer validen Simulation werden die in Tabelle 20 gelisteten Grenzwerte herangezogen. Stimmen die Simulationsergebnisse mit den Kriterien überein, gilt die Validierung als erfolgreich. Werden diese Kriterien nach mehreren Iterationen nicht erreicht, erfolgt eine Analyse des Problems und eine Einschränkung des Modells [50, 121–126].

Tabelle 20 Kriterien zur Beurteilung der Abweichung von Mess- und Simulationsergebnis in Bezug auf das 90 %-Quartil und das Bestimmtheitsmaß

Parameter	Messtechnisches Kriterium	Kriterium Literatur	Korrelation
Temperatur [°C]	0,5	2,0	$\geq 0,9$
Rel. Feuchte [%]	4,0	10,0	$\geq 0,8$
Wassergehalt [kg/m ³]	0,3	1,0	-

Sensitivitätsanalyse

Die anschließende Sensitivitätsanalyse ist eine Methode, die Verwendung in der statistischen Auswertung findet, um den Einfluss eines Faktors auf das Ergebnis zu untersuchen. Dabei wird der Zusammenhang des

Modells extrahiert und die beeinflussenden Eingabeparameter anhand von Variationen untersucht [127]. Die vorliegende Sensitivitätsanalyse untersucht relevante Eingabeparameter hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Ergebnisparameter. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die untersuchten Eingangsparameter und ihre Sensitivität. Alle Ergebnisse sind detailliert in Übersichtstabellen und Abbildungen in Anhang A.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt.

- Rohdichte Zellulosedämmung (ρ_{iso}): Der Parameter ρ bewirkt eine Änderung im Feuchtegehalt von 0-0,25 kg/m³. Eine Reduktion der Zellulosedämmung führt zu einer Annäherung der Simulationsergebnisse an die Messdaten.
- Wärmeleitfähigkeit Zellulosedämmung (λ_{iso}): Der Parameter λ wird zwischen 0,02 W/mK bis 0,06 W/mK variiert. Dabei wird der Wassergehalt um 0-0,25 kg/m³ beeinflusst und die Temperatur variiert zwischen 0-2 °C. Tagsüber kommt es zu einem Temperaturanstieg und die relative Feuchte sinkt. Nachts verhält es sich andersherum und es kommt zu einer höheren relativen Feuchte. Dies bewirkt außerdem ein höheres Dampfdruckgefälle, wodurch die Fassade schneller austrocknet.
- Wasserdampfdiffusionswiderstand Zellulosedämmung (μ_{iso}): Der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ wirkt sich zwischen 0,5-1,5 kg/m³ auf den Feuchtegehalt in allen Fassaden aus. Der Effekt auf die Temperatur liegt bei ≤ 1 °C. Im Vergleich zu einem μ -Wert von fünf nimmt bei einem μ -Wert von eins die Kurvenamplitude zu. Wird der μ -Wert reduziert, diffundiert Wasserdampf schneller durch das Bauteil. Mit reduziertem μ -Wert nähern sich die Simulationsergebnisse an die Messergebnisse an.
- Luftwechsel (n): Durch eine Reduktion der Luftwechselzahl steigt das Feuchteniveau in der Zellulosedämmung um 0,5 kg/m³ an. Der Einfluss auf die Temperatur liegt bei 0 °C oder ≤ 1 °C. Ein reduzierter Luftwechsel führt zu einer besseren Annäherung an die Messdaten.
- Wärmequelle PV (WQ): Die Wärmequelle in Abhängigkeit der einfallenden Strahlung gibt es nur in der Fassadenvariante PV. Eine Reduktion der Wärmequelle auf 55 % erhöht den Wassergehalt um 0,25-0,5 kg/m³ und reduziert die Temperatur in der Fassade um 5-10 °C. Damit werden die Simulationsergebnisse den Messdaten angenähert, aber dennoch wird die Tageshöchsttemperatur des PV-Moduls um 5-30 °C überschätzt, da die zusätzliche Wärmequelle eine Dopplung zum Strahlungsabsorptionskoeffizienten ist. Die Wärmequelle wird daher aus dem Simulationsmodell entfernt.
- Feuchtequelle durch Transpiration (FQ T): Für die Sensitivitätsanalyse wird anstelle der globalstrahlungs-basierten Transpirationsquelle ein konstanter Wert verwendet. Die Gesamtmenge der Feuchtequelle von 16.500 g/m²a entspricht dabei der gleichen Feuchtemenge, die über die globalstrahlungs-basierte Feuchtemenge im gleichen Zeitraum eingebracht wird. An sonnigen Tagen erreicht die strahlungs-basierte Feuchtequelle einen um 0,25 kg/m³ höheren Wert als die konstante Feuchtequelle, während sich das Verhältnis an regnerischen Tagen umkehrt.
- Feuchtequelle durch Infiltration (q_{50}): Der Parameter q_{50} hat in allen Fassadenvarianten einen Einfluss von 0 kg/m³. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse kann keine Aussage über den Parameter getroffen werden.
- s_d -Wert: Eine Variation des s_d -Wertes hat eine Auswirkung von $\leq 0,25$ kg/m³ auf die Feuchte in allen Fassadenvarianten. Im Rahmen der kurzen Messperiode kann kein Zusammenhang zwischen einer Reduktion oder Erhöhung des s_d -Wertes und der Korrelation mit den Messergebnissen hergestellt werden.
- Strahlungsabsorptionskoeffizient (α): Der Strahlungsabsorptionskoeffizient hat den höchsten Einfluss auf das Temperaturfeld im Bauteil, was sich wiederum auf den Wassergehalt auswirkt. Ein erhöhter Strahlungsabsorptionskoeffizient bewirkt einen Temperaturanstieg von 5- 20 °C tagsüber. Auch nachts sind die Temperaturen aufgrund der Wärmespeicherung im Bauteil um etwa 1 °C erhöht.
- Regenbelastung (R): Eine Regenbelastung wird in die wasserführende Schicht der Fassade eingebracht und um 0-4 % variiert. Ohne diesen Feuchteeintrag wird der Wassergehalt nur über die relative Feuchte der Umgebungsluft gesteuert, was zu einer Austrocknung der Fassade im Vergleich zur Messung

während Regenereignissen führt. Die Implementierung einer Regenquelle von 1 % führt zu einer Annäherung der Simulationsergebnisse an die Messdaten.

- Wasserdampfdiffusionswiderstand der äußeren Beplankung (μ_{Ferma} und μ_{Aque}): Nimmt der μ -Wert von 4-16 zu, steigt der Wassergehalt im Tagesmaximum um bis zu $0,25 \text{ kg/m}^3$. Aufgrund der Phasenverschiebung kann jedoch keine Aussage zu einer Anpassung der Simulationsergebnisse an die Messdaten getroffen werden.
- Wärmeleitfähigkeit Holzständerwerk (λ_{Holz}): Eine Annäherung der Simulationsergebnisse an die Messergebnisse durch die Varianz der Wärmeleitfähigkeit kann aufgrund der starken Abweichungen nicht nachvollzogen werden. Es ist möglich, dass der Betrachtungszeitraum nicht ausreicht, da sich die Simulation mit Holz länger einpendeln muss.

Modelloptimierung auf Basis der Sensitivitätsanalyse

In der Modelloptimierung werden auf Basis der Erkenntnisse der Sensitivitätsanalyse die Eingabeparameter variiert und somit zwei weitere Modellvarianten erstellt. Dabei wird das ursprünglich erstellte Modell als ‚Modell 1‘ bezeichnet; ‚Modell 2‘ und ‚Modell 3‘ sind die optimierten Varianten.

Modell 2

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Reduktion der Rohdichte der Zellulosedämmung auf 45 kg/m^3 eine Annäherung an die Messergebnisse bewirkt. Zusätzlich wird der Wasserdampfdiffusionswiderstand auf 1,3 reduziert und die Wärmeleitfähigkeit auf $0,05 \text{ W/mK}$ erhöht. Die Wärmequelle im PV-Modul wird entfernt, da diese eine Dopplung zum Strahlungsabsorptionskoeffizienten ergibt. Der Strahlungsabsorptionskoeffizient für oH, mH und Ref bleibt unverändert, da sich keine Verbesserung durch eine Änderung abzeichnet. Für PV wird eine Anpassung des Strahlungsabsorptionskoeffizienten von 0,8 vorgenommen, da eine Unterschätzung des Wassergehalts darauf hindeutet, dass die Strahlungsabsorption mit 0,8 zu hoch ist. Das Dünnschicht-PV-Modul der Firma AVANCIS hat im Gegensatz zu klassischen monokristallinen PV-Modulen keine schwarze, sondern eine graue Oberfläche. Somit wird der Wert für den Strahlungsabsorptionskoeffizient auf 0,6 nach DIN 4108-3 3 [106] für graue Oberflächen reduziert. Für die Anpassung der Luftwechselzahl werden die Messergebnisse des Hitzdrahtanemometers verwendet. Am 23.05.2023 werden 15 1/h in der Hinterlüftung der Begrünung und $7,5 \text{ 1/h}$ in der Referenzfassade gemessen. In diesem Zeitraum kommt der Wind von Westen und die Windgeschwindigkeit beträgt $1,63 \text{ m/s}$. In den drei Messungen vom 20.06.2023, 05.07.2023 und vom 20.07.2023 liegen die Werte zwischen $1,0\text{-}2,5 \text{ 1/h}$ für die begrünte Fassade und $1,0\text{-}1,5 \text{ 1/h}$ für die Referenzfassade. Der Wind kommt aus Süd-Ost oder Süd-West und die Windgeschwindigkeit beträgt $0,5\text{-}1,5 \text{ m/s}$. Der Durchschnitt der Windgeschwindigkeit beträgt $0,6 \text{ m/s}$. Die Luftwechselzahl für Modell 2 wird auf 5 1/h gesetzt, um den Durchschnitt der Windgeschwindigkeiten zu repräsentieren und vereinzelt höhere Luftgeschwindigkeiten abzubilden. Die Regenbelastung wird mit 1 % in allen Fassaden in der wasserführenden Schicht eingebracht. Die Feuchtequelle entspricht damit der Schlagregenbelastung nach [54]. Bei den Parametern s_d -Wert, Infiltrationsquelle, Wärmeleitfähigkeit des Holzes und der Wasserdampfdiffusionswiderstand der äußeren Beplankung wird keine Änderung vorgenommen, da die Sensitivitätsanalyse keinen Aufschluss über weitere mögliche Annäherungen an die Messdaten geben konnte. Eine Übersicht über alle Parameter wird in Tabelle 21 gegeben.

Tabelle 21 Anpassung der Modellparameter für Modell 2

Parameter	Einheit	oH	mH	Ref	PV
ρ_{iso}	kg/m^3	45	45	45	45

Parameter	Einheit	oH	mH	Ref	PV
λ_{ISO}	W/mK	0,05	0,05	0,05	0,05
μ_{ISO}	-	1,3	1,3	1,3	1,3
α	-	0,3	0,3	0,4	0,6
q	%	-	-	-	-
s_d	m	-	0,3	0,3	0,3
q_{50}	m^3/m^2h	3	3	3	3
n	1/h	-	5	5	5
R	%	1	1	1	1
FQT	-	SR	SR	-	-
$\mu_{BepLankung}$	W/mK	66	16	16	16
λ_{Holz}		0,09	0,09	0,09	0,09

Modell 3

In den Fassaden oH und mH wird der Parameter FQ T durch eine konstante Feuchtequelle im Aquapanel ausgedrückt. In den Fassaden Ref und PV wird die Luftwechselzahl weiter abgesenkt und Strahlungsabsorptionskoeffizient der PV wird weiter von 0,6 auf 0,5 reduziert. In Modell 3 wird die strahlungsbasierte Feuchtequelle durch eine konstante Feuchtequelle in die äußeren 5 mm des Aquapanel ersetzt. Dabei wird die konstante Feuchtequelle an die Feuchtemenge durch Strahlung angepasst. Es soll dadurch festgestellt werden, ob sich langfristig Unterschiede zwischen den Modellvarianten mit Strahlung oder als konstante Feuchtequelle einstellen. In der Fassade Ref und PV wird die Luftwechselzahl von 5 1/h auf 2 1/h reduziert, da die Messungen mit dem Hitzdrahtanemometer und der Windgeschwindigkeiten zeigen, dass in der Fassade Ref und PV niedrigere Luftwechselraten vorliegen als in der begrünten Fassade. In Tabelle 22 werden die Parameter für Modell 3 zusammengefasst.

Tabelle 22 Anpassung der Modellparameter für Modell 3

Parameter	Einheit	oH	mH	Ref	PV
ρ_{ISO}	kg/m^3	45	45	45	50
λ_{ISO}	W/mK	0,05	0,05	0,05	0,04
μ_{ISO}	-	1,3	1,3	1,3	1,3
α	-	0,3	0,3	0,4	0,5
q	%	-	-	-	-
s_d	m	-	0,3	0,3	0,3
q_{50}	m^3/m^2h	3	3	3	3
n	1/h	-	5	2	2

Parameter	Einheit	oH	mH	Ref	PV
R	%	1	1	1	1
FQT	-	1.250	1.250	-	-
$\mu_{\text{Bepflankung}}$	W/mK	66	16	16	16
λ_{Holz}		0,09	0,09	0,09	0,09

Auswertung der Modelloptimierung

Anhand der Modelloptimierung wird eine Annäherung der Simulationsergebnisse an die Messdaten erreicht. Dabei wird die Optimierung einzeln für jede der vier Fassadenvarianten betrachtet und die Ergebnisse der statistischen Maße zur Bewertung (Q90 und R²) tabellarisch zusammengefasst. Weitere Graphen zur Auswertung der Modelloptimierung sind im Anhang A.3 Ergebnisse der Modelloptimierung zu finden.

Selbstklammer ohne Hinterlüftung (oH)

Die Fassade oH ist eine Nord-West-orientierte, begrünte Fassade ohne Hinterlüftung. Sie reagiert daher sensitiv auf Parameter, die eine Auswirkung auf den Wassergehalt haben. Modell 1 wird gemäß den Erläuterungen zu Beginn von Kapitel **Hygrothermische Simulation** modelliert. In Modell 2 werden die Materialeigenschaften der Zellulosedämmung angepasst und eine Regenbelastung in die wasserführende Schicht implementiert. In Modell 3 wird die strahlungsbasierte Feuchtequelle in der Luftschicht durch eine konstante Feuchtequelle im Aquapanel ersetzt.

Die Temperatur der Außenoberfläche (TaO) heizt sich in der Simulation tagsüber schneller auf als in der Messung. Es gibt einen zeitlichen Versatz im Tagespeak um etwa eine Stunde. Da das Mock-Up in Realität nicht tatsächlich Süd-West, also 225°, orientiert ist, sondern etwa 240-250°, werden in der Simulation die Tageshöchsttemperaturen etwa eine Stunde früher erreicht. Dieser Versatz bewirkt ein Q90 für dTaO von 3,46 °C. Der Grenzwert von 2 °C kann somit nicht eingehalten werden, jedoch wird eine hohe Korrelation von 92 % erreicht, siehe Tabelle 23. Nachts treten keine Abweichungen der Simulationsergebnisse zu den Messdaten auf.

Die konstante Feuchtequelle in Modell 3 im Aquapanel erhöht den Feuchtegehalt ab dem 22.06.2023 im Gegensatz zu Modell 2 mit einer strahlungsbasierten Feuchtequelle. Dennoch können stattgefundenen Regenereignisse nicht vollständig abgebildet werden und die fehlende Pufferwirkung wird nur teilweise ausgeglichen. Im Vergleich zu Modell 1 und 2 wird eine Verbesserung des Q90 in drF2 auf 9,24 % erzielt.

Tabelle 23 Modell oH, Sommer, Dämmebene. Genauigkeitskriterien Q90 und R² für die Differenz zwischen Messung und Simulation der Modelle 1 bis 3.

	Modell 1		Modell 2		Modell 3	
	Q90	R ²	Q90	R ²	Q90	R ²
dTaO	2,66	0,93	2,64	0,93	3,48	0,92
dT1	-	-	-	-	-	-
dT2	2,69	0,93	2,75	0,93	3,57	0,92
drF2	15,16	0,64	10,19	0,48	9,24	0,48
dw2	1,69	0,70	1,19	0,56	1,15	0,56

	Modell 1		Modell 2		Modell 3	
dT4	2,27	0,98	2,12	0,99	2,04	0,99
drF4	6,98	0,86	3,04	0,89	6,04	0,88
dw4	0,69	0,87	0,37	0,90	0,72	0,89
dTiO	1,66	0,98	1,56	0,99	1,52	0,99

Selbstklammer mit Hinterlüftung (mH)

Die Fassadenvariante mH hat eine Hinterlüftung mit vorgehängtem, begrünten Aquapanel und ist Nord-West-orientiert. Einwirkungen von außen auf den Wassergehalt werden durch die Hinterlüftung abgepuffert. Modell 1 wird gemäß den Erläuterungen zu Beginn von Kapitel **Hygrothermische Simulation** modelliert. In Modell 2 werden die Materialeigenschaften der Zellulosedämmung angepasst, die Luftwechselzahl der Hinterlüftung reduziert und eine Regenbelastung in die wasserführende Schicht implementiert. In Modell 3 wird die strahlungsbasierte Feuchtequelle in der Luftschicht durch eine konstante Feuchtequelle im Aquapanel ersetzt.

Gleichermaßen wie in der Fassade oH gibt es bei der Betrachtung der Temperaturen einen zeitlichen Versatz zwischen Messung und Simulation von etwa einer Stunde. Jedoch ist der Versatz aufgrund der um 2,5 °C abgeflachten Tagesmaxima weniger deutlich sichtbar. In Modell 2 wird dT2 in mH mit einer Korrelation von 96 % abgebildet und es wird eine Abweichung von 1,79 °C erreicht, siehe Tabelle 24. Sowohl für die Fassade oH, als auch für die Fassade mH zeigt Modell 2 eine bessere Annäherung an die Messergebnisse als Modell 1 und 3.

Tabelle 24 Modell mH, Sommer, Dämmebene. Genauigkeitskriterien Q90 und R² für die Differenz zwischen Messung und Simulation der Modelle 1 bis 3.

	Modell 1		Modell 2		Modell 3	
	Q90	R ²	Q90	R ²	Q90	R ²
dTaO	2,56	0,94	2,60	0,94	3,98	0,92
dT1	3,62	0,85	3,65	0,85	3,83	0,88
dT2	1,87	0,95	1,79	0,96	2,29	0,94
drF2	6,32	0,71	6,17	0,61	6,98	0,58
dw2	0,65	0,74	0,37	0,61	0,82	0,58
dT4	2,26	0,98	2,15	0,99	2,05	0,99
drF4	2,87	0,87	4,36	0,89	7,67	0,84
dw4	0,30	0,90	0,43	0,91	0,82	0,82
dTiO	0,92	0,99	0,85	0,99	0,81	0,99

Referenz mit Hinterlüftung (Ref)

Die Fassadenvariante Ref hat eine unbegrünte, vorgehängte Holzfassade und ist Süd-West-orientiert. Die Fassade erfährt daher eine hohe solare Einstrahlung und äußere Einflüsse werden durch die Hinterlüftung

abgepuffert. Modell 1 wird gemäß den Erläuterungen zu Beginn von Kapitel Hygrothermische Simulation modelliert. In Modell 2 werden die Materialeigenschaften der Zellulosedämmung angepasst, die Luftwechselzahl der Hinterlüftung reduziert und eine Regenbelastung in die wasserführende Schicht implementiert. In Modell 3 wird die Luftwechselzahl weiter reduziert.

Wie auch in oH und mH gibt es einen zeitlichen Versatz von einer Stunde zwischen Messung und Simulation im Bereich der Temperaturen der Bauteilaußenoberfläche. Da die Tagespeaks der Süd-West-orientierten Fassade durch die Intensität der solaren Einstrahlung um 5-10 °C höher sind, steigt auch die Differenz zwischen Messung und Simulation. Das Q90 für dTaO liegt somit bei 8,17 °C und das drF2 bei 0,76 %, siehe Tabelle 25. Für TaO, T1 und T2 kann aus diesem Grund das Genauigkeitskriterium nicht erreicht werden (vgl. Tabelle 20).

Die Reduktion der Luftwechselzahl von 5 1/h auf 2 1/h hebt das Feuchte-Niveau an der Position w2 kontinuierlich an. Es kommt dadurch zu einer Annäherung des Q90-Wertes in drF2 auf 5,96 % relativer Feuchte und 0,62 kg/m³ Wassergehalt in dw2. In Position drF4 und dw4 wird eine Annäherung von 3,87 % und 0,46 kg/m³ Wassergehalt erreicht, siehe Tabelle 25. Die Abweichung liegt im Bereich des messtechnischen Fehlers.

Tabelle 25 Modell RF, Sommer, Dämmebene. Genauigkeitskriterien Q90 und R² für die Differenz zwischen Messung und Simulation der Modelle 1 bis 3.

	Modell 1		Modell 2		Modell 3	
	Q90	R ²	Q90	R ²	Q90	R ²
dTaO	8,17	0,76	8,17	0,76	8,17	0,76
dT1	2,58	0,94	2,57	0,94	2,57	0,94
dT2	2,38	0,94	2,38	0,95	2,36	0,95
drF2	10,82	0,76	7,63	0,66	5,96	0,58
dw2	10,50	0,79	0,76	0,70	0,62	0,60
dT4	2,50	0,99	2,23	0,99	2,22	0,99
drF4	4,94	0,87	2,86	0,90	3,87	0,87
dw4	0,50	0,89	0,33	0,91	0,46	0,87
dTiO	2,15	0,97	2,08	0,98	2,07	0,98

PV mit Hinterlüftung (PV)

In der Fassadenvariante PV ist ein PV-Modul mit Hinterlüftung vorgehängt. Die Fassade ist Süd-West orientiert und äußere Einflüsse werden durch die Hinterlüftung abgepuffert. Modell 1 wird gemäß den Erläuterungen zu Beginn von Kapitel Hygrothermische Simulation modelliert. In Modell 2 werden die Materialeigenschaften der Zellulosedämmung angepasst, die Luftwechselzahl der Hinterlüftung reduziert, und eine Regenbelastung in die wasserführende Schicht implementiert. Des Weiteren wird in Modell 2 und 3 die Strahlungsabsorptionszahl reduziert. In Modell 3 wird die Luftwechselzahl weiter reduziert.

Durch das Entfernen der Wärmequellen und die Änderung des Strahlungsabsorptionskoeffizienten wird in Tabelle 26 ein Q90 von 3,99 °C und eine Korrelation von 90 % erreicht. Aufgrund der Anpassung der Luftwechselzahl ist der Wassergehalt in Modell 3 kontinuierlich höher als in Modell 2. Es wird eine Reduktion von Q90 für dw2 auf 0,75 kg/m³ erreicht und für drF2 auf 7,75 % relative Feuchte. Die Korrelation liegt aufgrund

der Phasenverschiebung für beide Positionen bei etwa 50 %. In Position vier überschätzt die Simulation nach Modell 3 die Messdaten.

Tabelle 26 Modell PV, Sommer, Dämmebene. Genauigkeitskriterien Q90 und R² für die Differenz zwischen Messung und Simulation der Modelle 1 bis 3.

	Modell 1		Modell 2		Modell 3	
	Q90	R ²	Q90	R ²	Q90	R ²
dTaO	-	-	-	-	-	-
dT1	16,97	0,70	6,87	0,80	5,59	0,84
dT2	14,45	0,82	5,08	0,90	3,99	0,92
drF2	29,55	0,61	12,71	0,55	7,75	0,48
dw2	2,76	0,64	1,19	0,60	0,75	0,53
dT4	2,36	0,99	2,77	0,99	2,79	0,99
drF4	8,07	0,90	4,53	0,92	5,21	0,90
dw4	1,03	0,90	0,54	0,92	0,61	0,89
dTiO	2,31	0,99	2,52	0,99	2,56	0,99

Fazit der Modellvalidierung und -optimierung

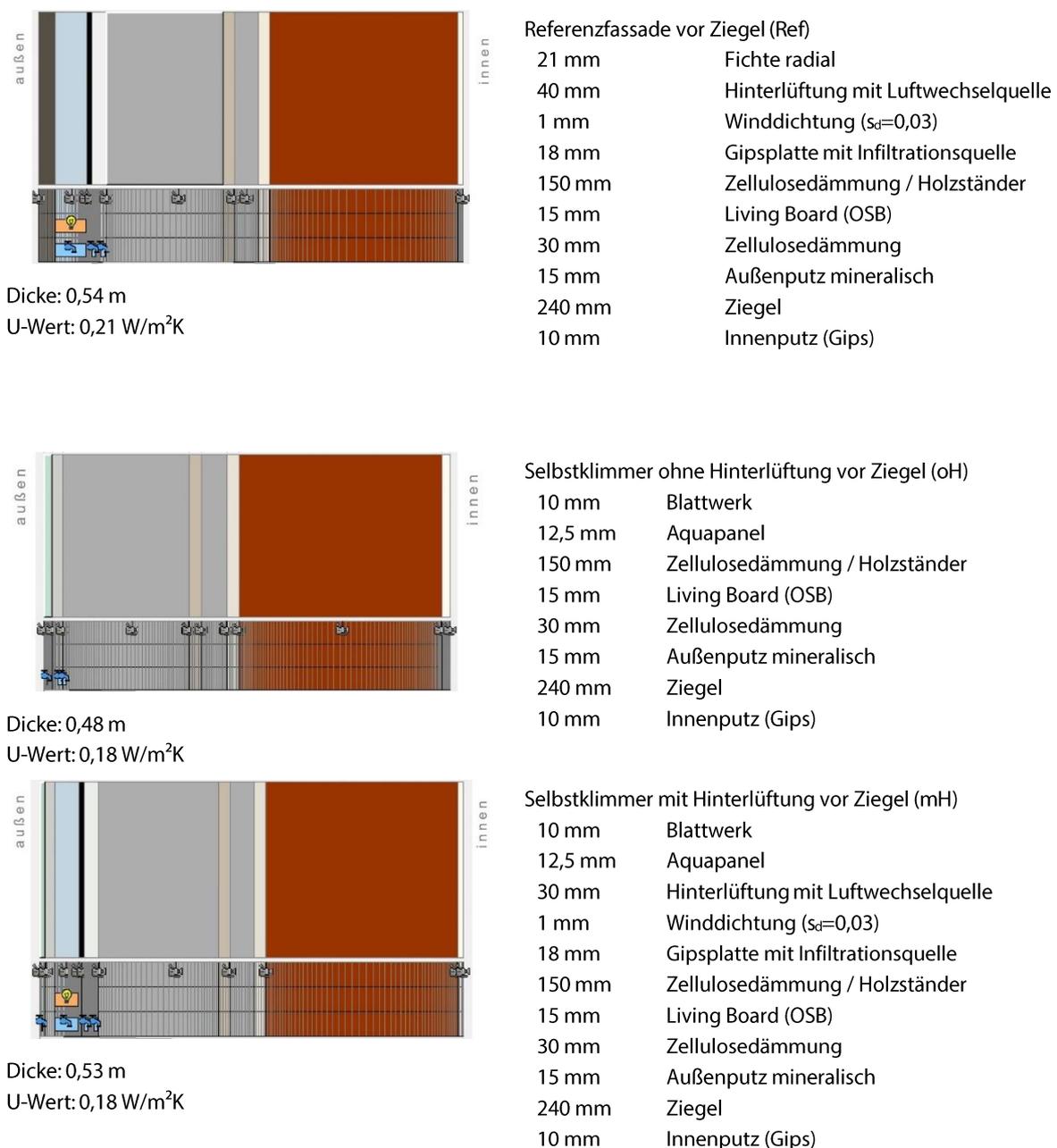
In allen Fassadenvarianten wird eine hohe Korrelation zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten der Temperatur von über 90 % erreicht. Insbesondere bei Wetterlagen mit konstantem sonnigem Wetter (wie zwischen dem 25.05.2023 und dem 22.06.2023) erweist sich das Simulationsmodell als sehr geeignet. Bei wechselhaftem Wetter (wie ab dem 22.06.2023) kommt es häufiger zu Abweichungen und die Modellierung weist Defizite auf. In T4 wird das Kriterium für Q90 von 2 °C für keine Fassadenvariante erreicht. Die Differenz wird verursacht, da das Messgerät für die Innenraumtemperatur auf dem Fußboden steht, und somit 1-2 °C kälter ist. Diese Messung dient der Simulation als Randbedingung und hat bis zur thermischen Barriere durch die Dämmschicht einen direkten Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Diese Abweichung in T4 hat zudem eine Auswirkung auf rF4 und w4: Da die Temperatur als zu gering angenommen wird, überschätzt das Simulationsmodell an dieser Stelle den Wassergehalt. Dies stellt eine Limitation dar, da diese Position nicht angemessen validiert werden kann. Für die Betrachtung von Schimmelpilzbildung und Tauwasserausfall wird jedoch Position zwei betrachtet, daher kann das Modell dennoch verwendet werden. Die Phasenverschiebung der Temperatur in Position zwei kann auf die Drehung des Mock-Ups und die Modellierung der Strahlung zurückgeführt werden. Dennoch wird eine Korrelation von über 90 %, also eine hohe Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messdaten erreicht. Dies trifft auf alle Fassadenvarianten zu, mit Ausnahme der Variante Selbstklammer ohne Hinterlüftung. Diese Fassade weist eine hohe Sensitivität für äußere Einwirkungen auf, da diese durch die Hinterlüftung nicht keinen Puffer aufweisen.

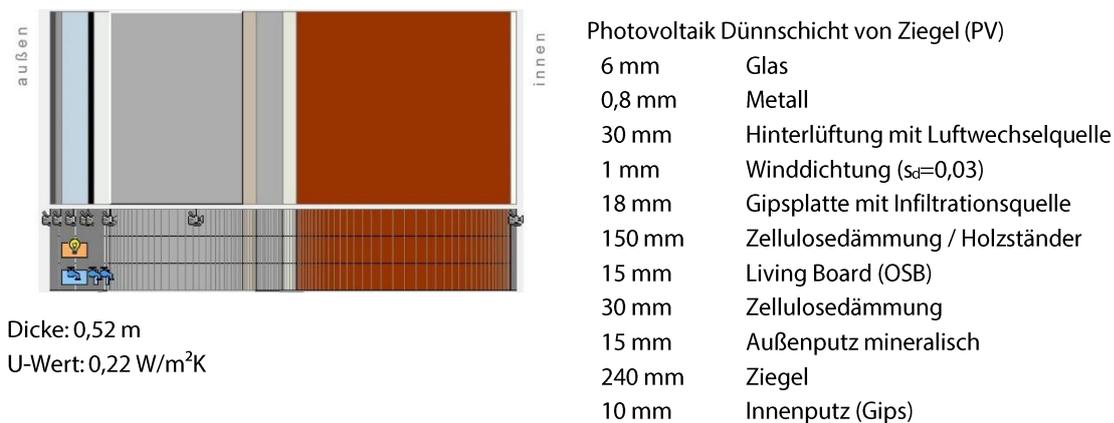
Simulation von Anwendungsszenarien

Nachdem das erstellte Simulationsmodell mithilfe der Messdaten als ausreichend genau validiert wurde, wurden zwei Anwendungsszenarien der greenTES-Fassaden erstellt und hinsichtlich der Gefahr von Schimmelpilzbildung und Tauwasserausfall beurteilt. Die Ergebnisse werden anhand technischer Regelwerke und Normen bewertet und eine Empfehlung zu den jeweiligen Fassaden gegeben.

- **Neubau:** Das Neubauszenario entspricht im Aufbau der greenTES-Fassade, wie in Kapitel greenTES Konstruktionsvarianten beschrieben.
- **Bestand:** Für das Anwendungsszenario ‚Sanierungsmaßnahme eines Bestandsgebäudes‘ wird die greenTES-Fassade selbsttragend vor ein Bestandsgebäude gestellt. Dieses besteht aus einem Ziegelmauerwerk aus Vollziegel mit mineralischem Außenputz und einem Innenputz aus Gips, da ein solcher Aufbau 63,8% \pm 1,5% des Gebäudebestands bis 1978 ausmacht und somit ein Potential für Sanierungsmaßnahmen darstellt [128]. In den Spalt zwischen der Bestandswand und der greenTES-Fassade wird eine 30 mm starke Schicht Zellulosedämmung eingefügt, um Unebenheiten des Mauerwerks auszugleichen. Im Bestandszenario wird die Schichtdicke der Zellulosedämmung auf 150 mm herabgesetzt, damit beide Szenarien den gleichen U-Wert aufweisen. In Abbildung 101 sind die verschiedenen Fassadenvariante des Bestandszenarios dargestellt.

Abbildung 101 Übersicht über die WUFI Fassadenvarianten im Bestand mit Ziegelmauerwerk





Rand- und Anfangsbedingungen

Als Randbedingung für das Außenklima wird der Wetterdatensatz des Fraunhofer Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen verwendet, der bereits in WUFI hinterlegt ist. Dieser beinhaltet ein Testreferenzjahr aus einer langjährigen Messperiode [52]. Das Wetter in Holzkirchen ist mit 1.184,6 mm Niederschlagsmenge jährlich regenreich. Die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit beträgt 2,3 m/s und der Wind kommt vorwiegend aus West und Süd-West [52]. Für das Innenklima wird der Datensatz nach DIN 4108-2 [129] verwendet. Der Innenraum ist auf 20 °C beheizt und im Sommer steigen die Temperaturen auf bis zu 26 °C, in Abhängigkeit der Bedingungen im Außenraum. Es werden jeweils die Orientierungen Nord-West und Süd-West untersucht. Die Anfangsbedingungen werden im Bestandsszenario nach DIN 15026-4 [51] auf 50 % relative Feuchte und 20 °C gesetzt. Dies gilt für neue bauliche Anlagen, die bestehenden Anlagen hinzugefügt werden. Für die Variante Neubau wird die relative Feuchte auf 80 % gesetzt, ebenfalls gemäß DIN 15026-4 [51].

Auswertung der Anwendungsszenarien

Die Anwendungsszenarien werden nach DIN 4108-3 [106] und DIN 68800-2 [107] und nach dem WTA Merkblatt 6-8 [55] bewertet. Die Simulationsergebnisse werden ausgewertet, wenn sich der Wassergehalt eingeschwungen hat. Eingeschwungen bedeutet, es wird ein stabiler Zustand über mehrere Jahre erreicht, ohne dass es zu einer Zunahme der Auffeuchtung kommt. Für die Auswertung der Feuchte wird Position zwei aller Modellvarianten betrachtet. Diese Position ist am kritischsten für Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung, da dort Feuchte aus dem Innenraum auf die kalte Luft im Außenraum trifft, abkühlt und somit die relative Feuchte steigt. Des Weiteren ist diese Position kritisch für eine Akkumulation von Regenwasser von außen. Zunächst wird der Temperaturverlauf untersucht. Im Anschluss werden die relative Feuchte und der Wassergehalt der Fassadenvarianten gemäß Modell 1, 2 und 3 für beide Anwendungsszenarien – Neubau und Bestand - betrachtet.

Relevant bei der Auswertung der Feuchte (Position 2) sind dabei insbesondere die folgenden Grenzwerte:

- Wassergehalt von maximal 18 M.-% nach DIN 68800-2 [107]
- Feuchteakkumulation von maximal 20 M.-% für maximal drei Monate nach WTA Merkblatt 6-8 und DIN 68800-2 [107] [55]

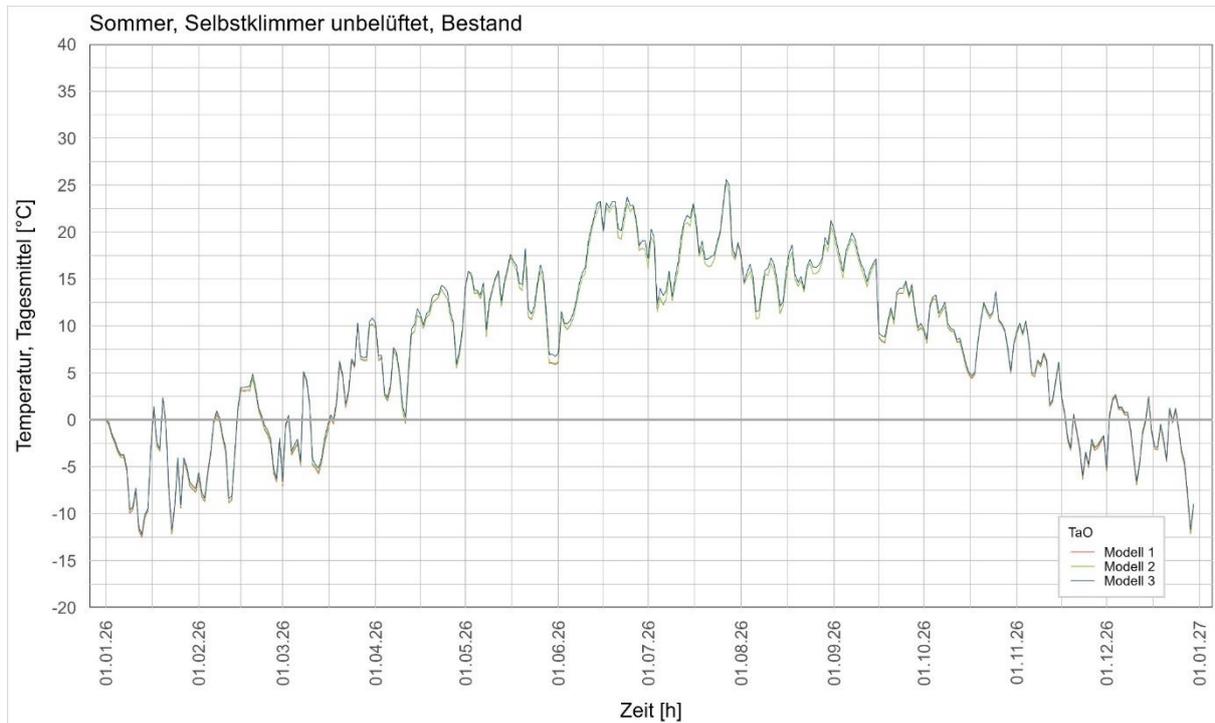
Bei der thermischen Auswertung werden einerseits die Temperaturen an der Außenoberfläche der Bauteile (T_{aO}) betrachtet, sowie an der Position 4.

Auswertung Temperatur

Fassade oH im Bestand

In Abbildung 102 ist der Temperaturverlauf der Fassade oH im Bestand im Jahr 2026 zu sehen, da sich der Wassergehalt in diesem Jahr für alle Fassadenvarianten eingependelt hat. Zwischen Juni und August werden Temperaturen im Tagesmittel bis zu 25 °C erreicht. Im Winter zwischen Dezember und Februar fällt die Temperatur auf bis zu -12,5 °C herab. Die Modelle 1, 2 und 3 unterscheiden sich nur geringfügig.

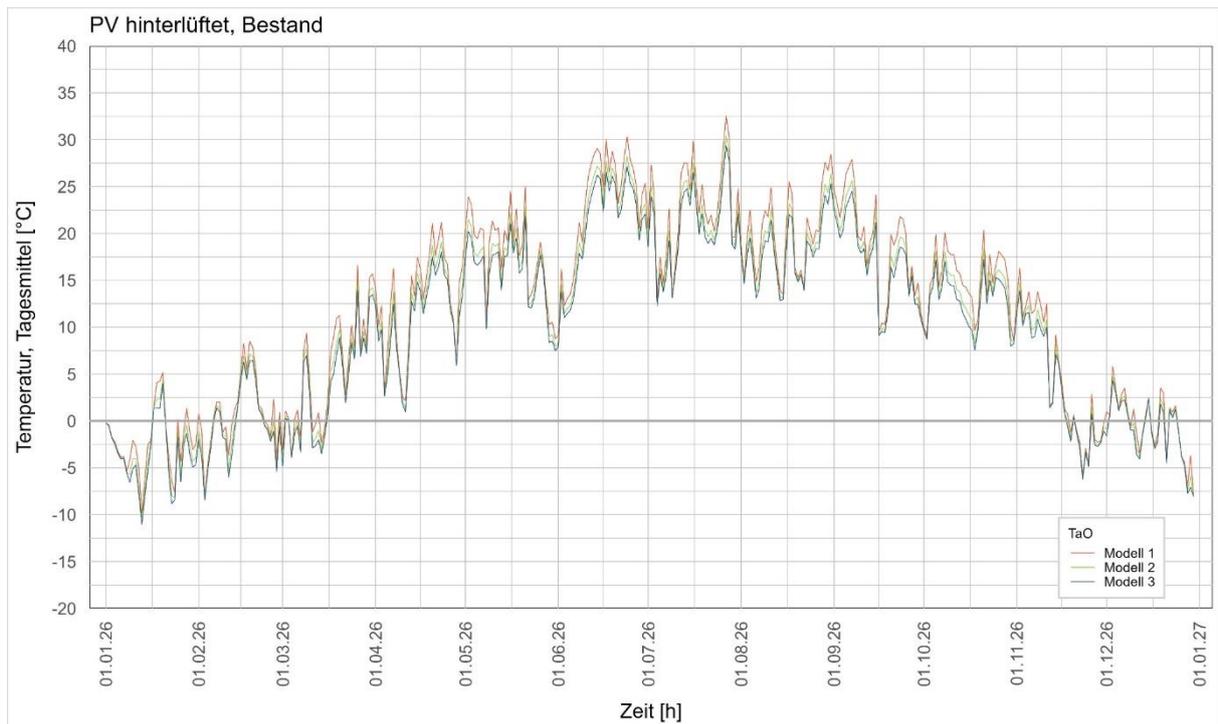
Abbildung 102 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante oH im Bestand. Darstellung der Temperatur an Position TaO.



Fassade PV im Bestand

In Abbildung 103 sind die Tagesmittel der Temperatur der Außenoberfläche der Variante PV dargestellt. Das Tagesmittel erreicht Temperaturen bis 32 °C. Einzelwerte erreichen Maxima von bis zu 55 °C. Zwischen April und November weicht Modell 1 bis zu 5 °C von Modell 3 ab und um 1-2 °C von Modell 2. Die Differenz ist im Sommer maximal, im Winter sind es 1-3 °C, je nach Modell. Diese Unterschiede begründen sich vor allem in der Änderung der Strahlungsabsorption sowie der Entfernung der in Modell 1 implementierten Wärmequelle. Im Winter sind die Temperaturunterschiede geringer, da die Intensität der solaren Einstrahlung geringer ist.

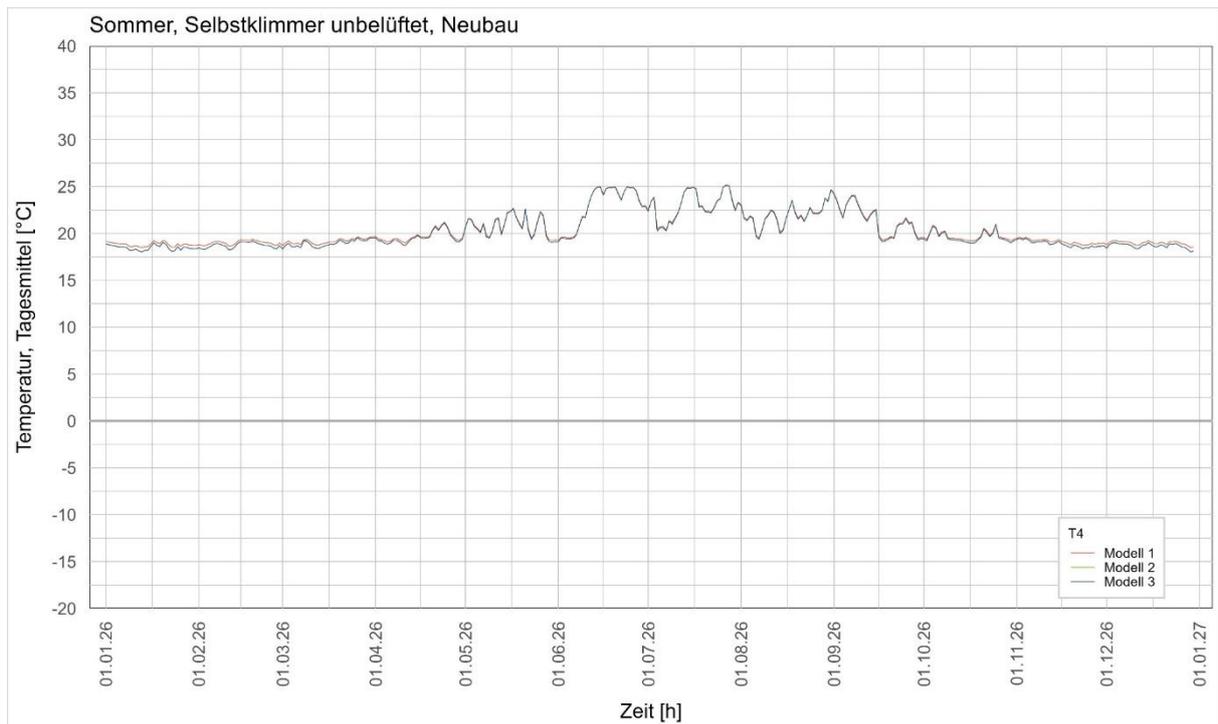
Abbildung 103 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante PV im Bestand. Darstellung der Temperatur an Position TaO.



Fassade oH im Neubau

In Abbildung 104 ist T4 der Variante oH im Neubau dargestellt. Im Vergleich zwischen den Szenarien Neubau und Bestand gibt es eine Temperaturdifferenz von 5-10 °C. Grund hierfür ist, dass die Dämmschicht im Bestand mit 15 cm und im Neubau mit 20 cm bemessen ist. Zudem wird im Bestandsszenario in dem 24 cm starken Mauerwerk Wärme gespeichert und zwischen Mauerwerk und Position vier liegt eine weitere Füllschicht von 3 cm aus Zellulosedämmung. Die Betrachtung der der hygrothermischen Verläufe in Position T4 für das Szenario Neubau und Bestand ist auf alle Fassaden übertragbar.

Abbildung 104 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante oH im Neubau. Darstellung der Temperatur an Position T4.

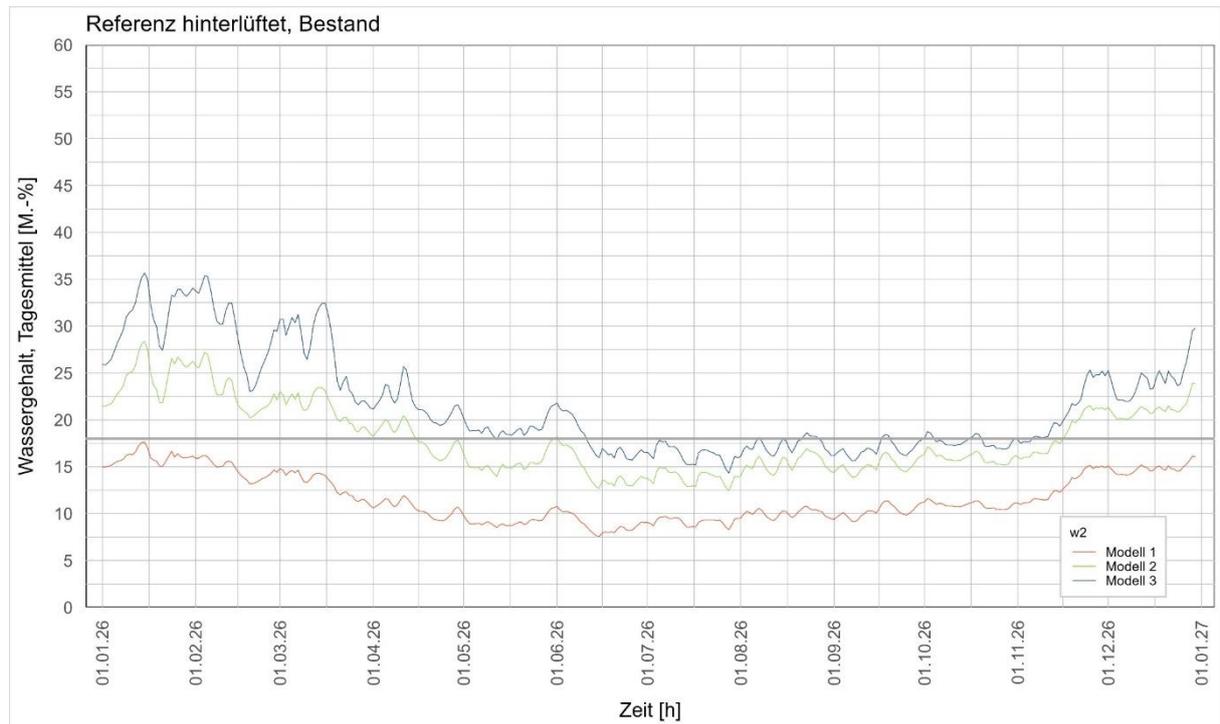


Auswertung Feuchte

Fassade Ref

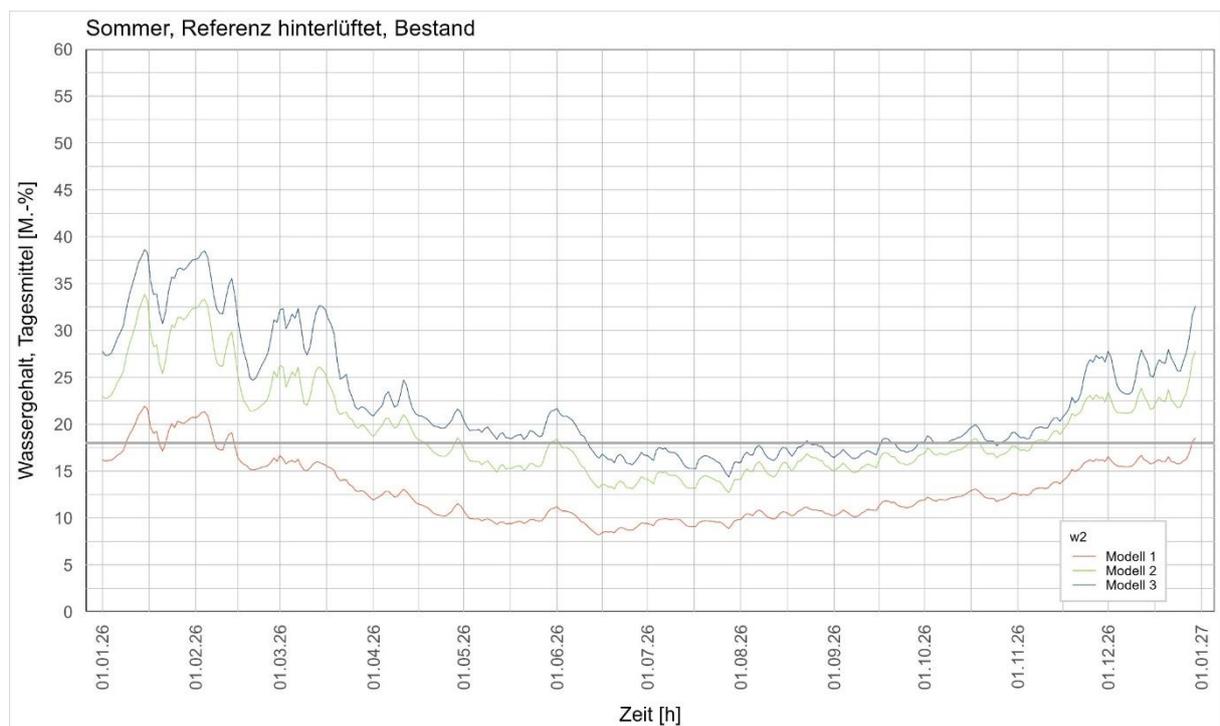
In der Referenzfassade in Süd-West Orientierung wird von Modell 1 der Grenzwert des Wassergehalts im Bauteil von 18 M.-% nach DIN 68800-2 [107] und WTA Merkblatt 6-8 [55] nicht überschritten. Diese Grenze ist in Abbildung 105 als graue Linie hervorgehoben. Die optimierten Modelle 2 und 3 überschreiten den Grenzwert von Mitte November bis Mitte April in Modell 2 und bis Anfang Juni in Modell 3, weisen jedoch eine geringe Feuchteakkumulation auf. Bei einer Erhöhung der Luftwechselzahl auf 15 1/h unter der Annahme von Messfehlern bei den Handmessungen mit dem Hitzdrahtanemometer verbleibt der Wassergehalt an Position 2 auch gemäß Simulationen mit Modell 2 und 3 das gesamte Jahr unter 18 M.-% und die Konstruktion ist schadensfrei.

Abbildung 105 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante Ref im Bestand. Darstellung des Wassergehalts an Position w2 bei Orientierung nach Süd-West.



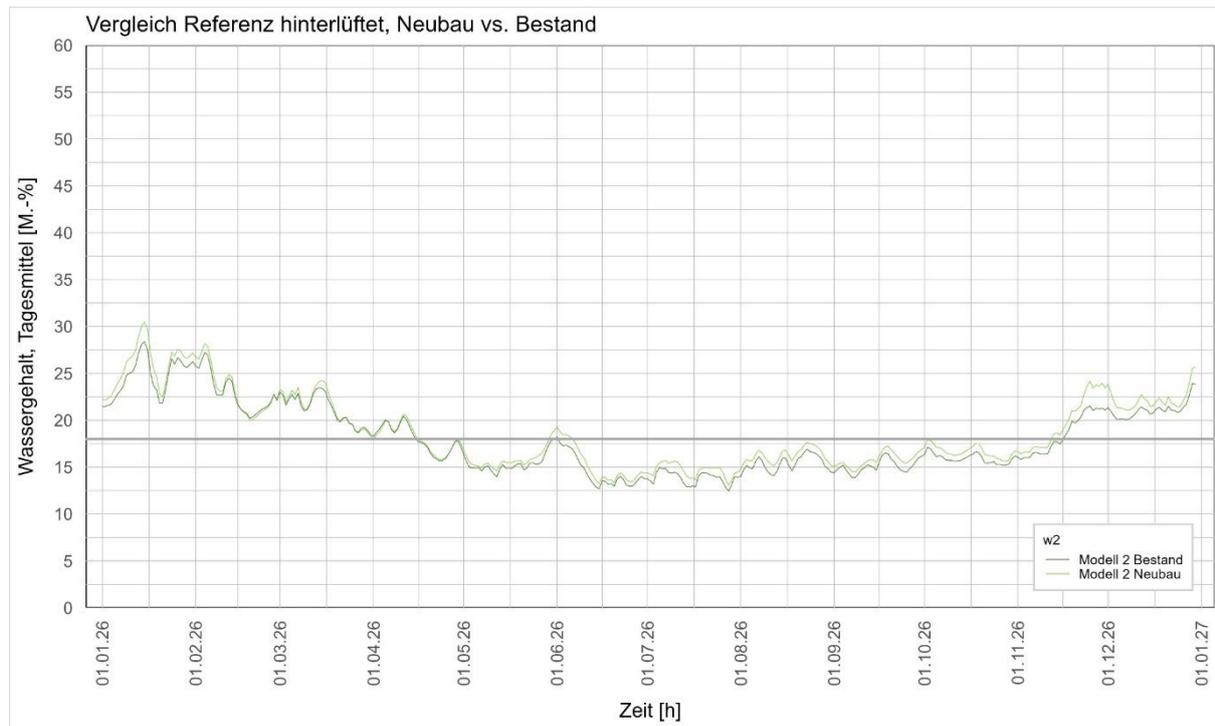
Bei Ausrichtung der Referenzfassade nach Nord-West ist die Feuchtigkeit um 3 M.-%. erhöht im Vergleich zu einer Ausrichtung nach Süd-West. Der maximale Wassergehalt wird in Modell 3 im Januar mit 38 M.-% erreicht und überschreitet somit den Grenzwert von 18 M.-% Wassergehalt (vgl. Abbildung 106). Dabei kommt es zu einer Feuchteakkumulation bis zu 22 M.-%. Modell 1 und 2 bleiben unter diesen Annahmen schadensfrei.

Abbildung 106 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante Ref im Bestand. Darstellung des Wassergehalts an Position 2 bei Orientierung nach Nord-West.



In Abbildung 107 sind vergleichend die Anwendungsszenarien Neubau und im Bestand Süd-West Orientierung dargestellt. In der Variante Neubau liegt der Wassergehalt mit etwa 0,5-1 M.-% über dem Wassergehalt der Variante im Bestand. Abweichungen von 2,5 M.-% treten vom 13.01.2026 bis zum 15.01.2026 und in der letzten Woche im November auf. Die Differenz bewirkt keine Änderung in der Bewertung der kritischen Zustände. Aus diesem Grund wird nur eine Variante betrachtet, außer es wird eine Notwendigkeit für eine Differenzierung erkannt.

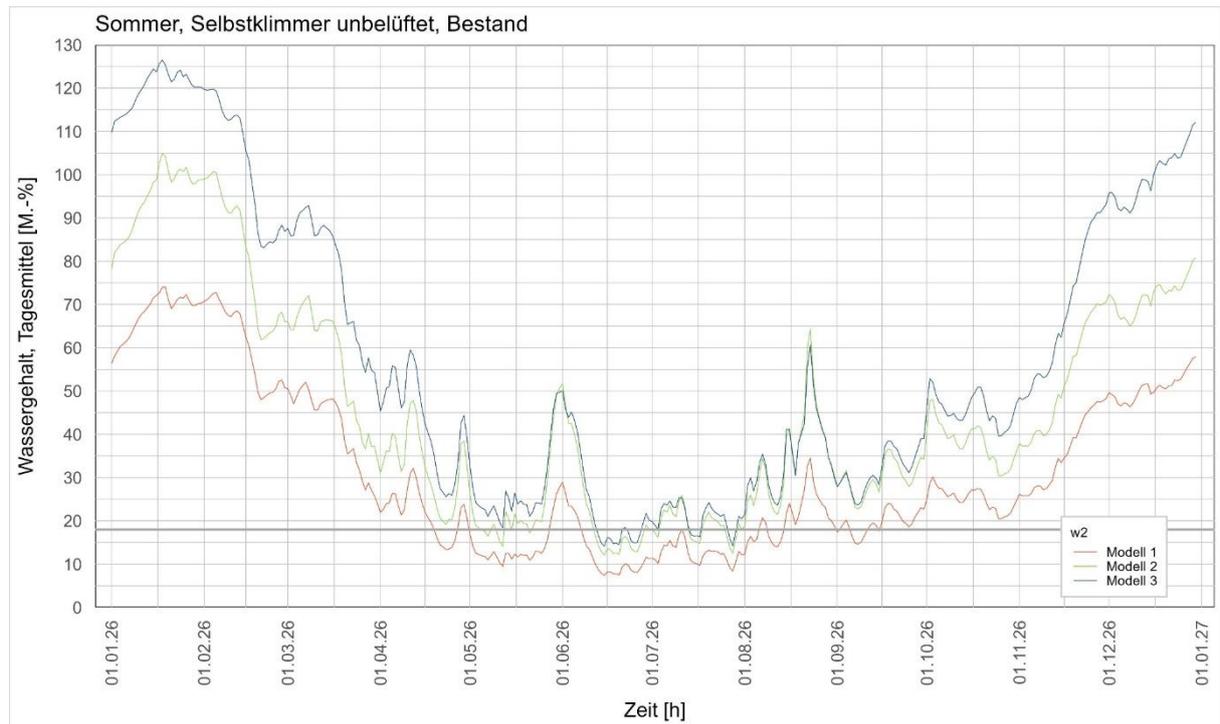
Abbildung 107 Vergleich des Wassergehalts in Position 2 der Anwendungsszenarien Neubau und Bestand der Fassade Ref, Modell 2.



Fassade oH

In Abbildung 108 ist der Wassergehalt w_2 der Fassade oH im Szenario Bestand dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Modelle 2 und 3 fast das gesamte Jahr den Grenzwert von 18 M.-% nach DIN 68800-2 [107] überschreiten. Eine Feuchteakkumulation von drei Monaten bis zu 20 M.-% ist nach DIN 68800-2 [107] und nach WTA Merkblatt 6-8 [55] akzeptabel, jedoch wird auch dieser Zeitraum überschritten. Modell 1 überschreitet zwischen Mitte April bis Mitte September diesen Grenzwert nicht, jedoch kommt es über die verbleibenden Monate zu einer Feuchteakkumulation von bis zu 75 M.-%. Das Austrocknungspotential dieser Fassade in den Sommermonaten ist somit gering, der Wassergehalt ist konstant über dem Grenzbereich angesiedelt. Im Winter steigt der Wassergehalt in Modell 3 auf etwa 125 M.-% und in Modell 2 auf 105 %. Da im Winter statt 23 g nur 12 g Feuchte durch Transpiration pro Tag entsteht [118, 130] stellt das strahlungsbasierte Modell 2 im Winter eine geeignetere Variante dar. Bei Temperaturen unter 0 °C und über 30 M.-% Wassergehalt besteht nach DIN 4108-3 [106] zusätzlich ein Risiko für Frostschäden.

Abbildung 108 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante oH im Bestand. Darstellung des Wassergehalts an Position 2 bei Orientierung nach Süd-West.

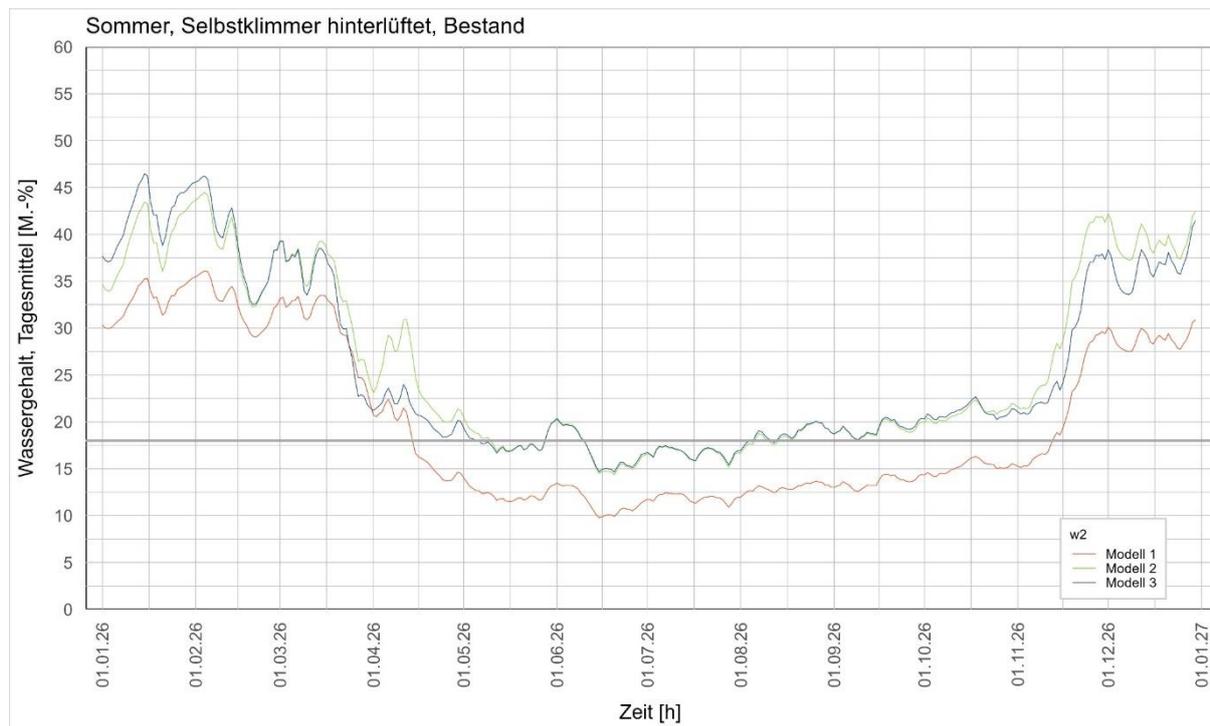


Fassade mH

Abbildung 109 zeigt die Fassade mH im Bestandsszenario. Der Grenzwert im Wassergehalt von 18 M.-% nach DIN 68800-2 [107] und maximal 20 M.-% für drei Monate nach WTA Merkblatt 6-8 [55] wird von Modell 2 und Modell 3 von Oktober bis Mitte April überschritten. Modell 2 erreicht an Position 2 einen Wassergehalt von maximal 44 M.-% und Modell 3 von maximal 46 M.-%. In den Monaten von Mai bis August trocknet die Fassade bis zu 15 M.-% aus und weist somit ein geringes Austrocknungspotential auf. In Modell 1 liegt der Wassergehalt mit bis maximal 35 M.-% für vier Monate von Mitte November bis Mitte April über den Grenzwerten. Somit ist die Fassade nach allen drei Simulationsmodellen als kritisch in Hinsicht auf Akkumulation von Feuchte zu betrachten.

Auch mit einer erhöhten Luftwechselzahl in der Hinterlüftung von 15 1/h wird gemäß Simulationen mit Modell 2 ein maximaler Wassergehalt von 29 M.-% an Position 2 erreicht und somit der Grenzwert überschritten.

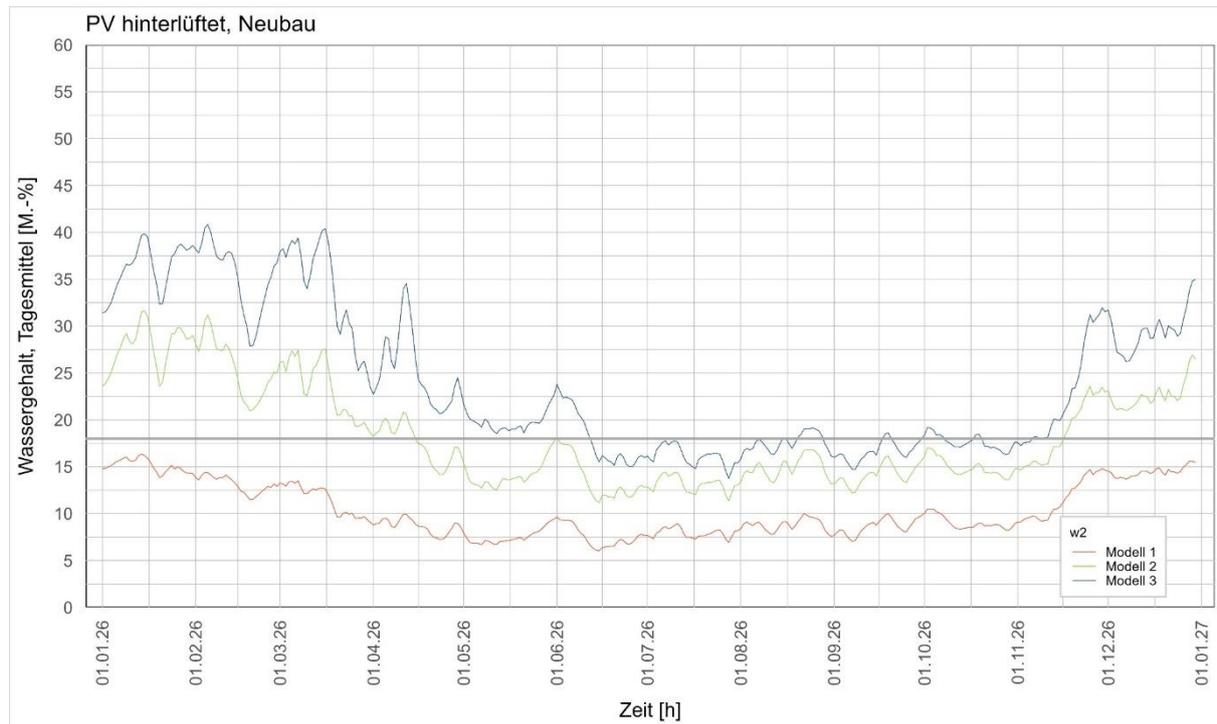
Abbildung 109 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante mH im Bestand. Darstellung des Wassergehalts an Position 2 bei Orientierung nach Süd-West.



Fassade PV

Die Variante PV zeigt in Abbildung 110 eine Überschreitung des Grenzwerts von 18 M.-% nach DIN 68800-2 [107] und WTA Merkblatt 6-8 [55] in Modell 3 zwischen Mitte November bis Mitte Juni bis maximal 43 M.-%. In Modell 2 werden zwischen Mitte November bis Mitte April Werte von bis zu 27,5 M.-% erreicht. Das Modell 1 überschreitet den Grenzwert zu keinem Zeitpunkt. Bei einer Erhöhung der Luftwechselzahl in der Hinterlüftung auf 15 1/h reduziert sich der maximale Wassergehalt gemäß Simulationen mit Modell 2 auf 15 M.-% im Januar und verbleibt somit unter dem Grenzwert. Wird die PV-Fassade mit Modell 3 simuliert, erreicht der Wassergehalt 28 M.-%. Gemäß Modell 1 und 2 verbleibt die PV-Fassade schadensfrei, während sie gemäß Modell 3 kritisch in Bezug auf Feuchteakkumulation zu bewerten ist. Da die Reduktion des Strahlungsabsorptionskoeffizienten auf 0,5 in Modell 3 zu groß ist, wird bei der abschließenden Bewertung der PV-Fassade auf die Simulationen gemäß Modell 2 zurückgegriffen. Im Vergleich mit der Referenzfassade ist die PV-Fassade feuchtechnisch als unkritischer einzustufen, da die erhöhte rückseitige Wärmeabgabe der PV-Module zu einer stärkeren Austrocknung der dahinterliegenden Konstruktion führt.

Abbildung 110 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante PV im Neubau. Darstellung des Wassergehalts an Position 2 bei Orientierung nach Süd-West.



Bauphysikalische Bewertung

Messtechnische Untersuchung

Als Ergebnis der messtechnischen Untersuchung kann gesagt werden, dass die einzelnen Konstruktionsvarianten zueinander klare Unterschiede im hygrothermischen Bauteilverhalten zeigen. Vor allem die Referenzfassade im Vergleich zur untersuchten Photovoltaikfassadenbekleidung und die begrünten Varianten stehen in der folgenden Auswertung im Fokus.

Die Begrünung an der Fassade hat in allen untersuchten Varianten einen Kühleffekt auf die Konstruktion, während gegenläufig die Werte der relativen Feuchte bei einer Fassade mit Begrünung statt Holzbekleidung ansteigen. Vergleicht man die Temperaturwerte mit und ohne Hinterlüftung sind die Ergebnisse so marginal, dass diese nicht zu berücksichtigen sind. Die Temperatur in der Dämmung Richtung außenliegender Beplankung liegt bei allen begrünten Fassaden um bis zu 1,5°C niedriger als bei der Referenzfassade. Der sommerliche Wärmeschutz ist bei beiden Fassaden eingehalten und die Ausführung einer Hinterlüftungsebene hat geringe Auswirkungen auf die Wärmeschutzfunktion der Außenwand. Jedoch kann hier eine Pufferungswirkung der Hinterlüftungsebene festgestellt werden.

Die Selbstklimmer-Fassade ohne Hinterlüftung zeigt eine höhere Feuchte in der Konstruktion als mit Hinterlüftungsebene. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Werten um die Messergebnisse eines Sommerzeitraums (ZR2) handelt und die Feuchtwerte in den Wintermonaten noch höher zu erwarten sind.

Der s_d -Wert des Aquapanel ist höher als der der Gipsfaserplatte und der Winddichtungsfolie in der Konstruktion der Referenzfassade, da ein Feuchteeintrag aus Schlagregen und Transpiration der Pflanzen an der Fassade verhindert werden soll. Dennoch sind die Feuchtwerte an Position Da durchschnittlich höher als in den Konstruktionen der anderen Fassadenvarianten.

Die Holzständerkonstruktion ist in allen betrachteten Zeiträumen als unbedenklich bezüglich des Feuchteschutzes einzustufen, da keine Konstruktion den Grenzwert von 20 M.-% erreicht.

Die Temperaturen der PV-Fassade weisen deutliche Unterschiede zur Referenzfassade auf. Die PV-Fassade kühlt langsamer aus. Dies wird durch die Messungen bei Nacht und das Einbeziehen der Daten bei geringen Windgeschwindigkeiten bestätigt. Die PV-Fassade erfährt einen erhöhten Wärmeeinfluss. Weiterhin ist der geringe Feuchtegehalt in der Dämmebene auf ein Austrocknen durch den Wärmeeintrag zurückzuführen. An der Innenseite der Dämmung verhalten sich die Messungen zur relativen Feuchte ähnlich. Im Vergleich zur PV-Fassade weisen die begrünten Varianten niedrigere Temperaturen, höhere Feuchtwerte und Schimmelpilzrisiken auf.

Es muss festgehalten werden, dass die Messungen am Mock-Up in unterschiedlichen Himmelsrichtungen und Höhen stattfanden. Hierdurch ist eine Vergleichbarkeit eingeschränkt möglich. Es muss anmerkt werden, dass die solare Einstrahlung auf die PV-Fassade aufgrund der genannten Gründe am höchsten war. Die Anordnung der Referenzfassade auf gleicher Höhe mit gleicher Orientierung wäre zum direkten Vergleich notwendig.

Um realistische Feuchte- und Temperaturdaten während des Winterzeitraums zu erfassen, wäre ein konstantes Innenraumklima von etwa 20 °C notwendig. Aufgrund von Verzögerungen in der Fertigstellung des Mock-Ups blieb die Konstruktion unbeheizt. Die durchschnittlichen Messdaten zeigen nur geringfügige Temperaturunterschiede zwischen Innen und Außen, es sei denn, es entstehen einzelne, durch solare Einstrahlung verursachte warme Oberflächentemperaturen von bis zu 35 °C.

Die existierenden Messdaten sind für einen Winterzeitraum nicht aussagekräftig. Ein Öffnen des Innenraumes und ein damit einhergehender Luftwechsel fand hier nur alle drei Wochen zum Messdatenauslesen statt. Es fand auch sonst kein regelmäßiger Luftwechsel im Innenraum statt. Die Feuchtigkeit im Innenraum kann daher nur über die Konstruktion abgeführt werden und trocknet nach außen hin ab. Im Gegensatz dazu erfolgt bei bewohnten Gebäuden dieser Feuchteabtransport wesentlich durch regelmäßiges Stoßlüftung. Konträr hierzu fehlen interne Feuchtequellen.

Simulationsbasierte Untersuchung

Die Modellierung und Simulation der greenTES Konstruktionsvarianten ist den den folgenden Limitationen unterworfen:

- Da das Mock-Up im Januar aufgebaut wurde und somit klimatisch unbekanntem Bedingungen ausgesetzt ist, müssen der Anfangswassergehalt und die Feuchteverteilung im WUFI-Modell approximiert werden. Fehler in den Anfangsbedingungen pendeln sich jedoch im Betrachtungszeitraum ein, für eine Validierung ist der Betrachtungszeitraum also ausreichend.
- Der Betrachtungszeitraum im Winter vom 10.03.2023 bis zum 19.03.2023 eignet sich nicht für eine Validierung, da die Anfangsbedingungen noch nicht eingependelt sind. Somit verbleibt das Modell für die Winterperiode unvalidiert. Die Unsicherheiten, Abweichungen und Fehler nehmen daher bei einer Betrachtung im Winter zu.
- Das Mock-Up ist nicht exakt Süd-West orientiert ist, wie es in der Simulation eingegeben wird. Dies verursacht eine zeitliche Abweichung der Bauteiltemperaturen von etwa einer Stunde im Tagespeak.
- Die Luftwechselzahl in der Hinterlüftung wurde lediglich an einzelnen Tagen mit Handmessungen durchgeführt. Es konnte kein Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Luftwechsel ganzjährig festgestellt werden.
- Bei wechselhaftem Wetter kommt es häufiger zu Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten und die Modellierung weist Defizite auf.
- Eine Feuchtepufferwirkung durch Begrünung kann nicht ausreichend abgebildet werden und das Modell trocknet insgesamt schneller, da auch die Hysterese nicht berücksichtigt wird.

Trotz dieser Einschränkungen kann basierend auf den Simulationen die folgende Bewertung getroffen werden:

Die Fassadenvarianten Ref und PV werden aus bauphysikalischer Sicht sowohl für eine Anwendung im Neubau als auch eine Anwendung im Bestand als unbedenklich eingestuft. Die Fassade Ref wird sowohl in Nord-West, als auch in Süd-West Orientierung analysiert. Im Vergleich der Bauweise Neubau und im Bestand wird festgestellt, dass der Wassergehalt der Variante Neubau etwa 1 M.-% bis maximal 2,5 M.-% feuchter ist. Dies wirkt sich nicht auf die abschließende Bewertung der Fassade aus.

Die Fassadenvariante oH ist aus bauphysikalischer Sicht nicht zu empfehlen. In der Fassade oH kommt es im Januar zu einer Feuchteakkumulation bis zu 105 M.-%. Hohe Wassergehalte führen in langer Sicht zu Materialdegradation der Zellulosedämmung und zum Verlust des Tragverhalten zum Beispiel durch Rissbildung pendelndes Quellen und Schwinden bei Holz [131, 132]. Nach DIN 4108-3 [106] besteht ebenfalls ein Risiko für Frostschäden.

Die Fassadenvariante mH ist aus bauphysikalischer Sicht eingeschränkt zu empfehlen. In mH werden im Zeitraum von Anfang Oktober bis Anfang Mai die Grenzwerte nicht eingehalten. Dabei wird bereits eine Überschreitung der Holzfeuchte von 18 M.-% bis zu 20 M.-% über maximal drei Monate berücksichtigt. In Modell 3 erreicht mH etwa 46 M.-% und in Modell 2 etwa 42 M.-%. Diese Fassadenvariante ist also trotz Annahmen in Bezug auf den Luftwechsel sehr nah am Grenzbereich angesiedelt. Bevor eine abschließende Aussage getroffen werden kann, muss das Modell anhand von Messdaten im Winter auch für die Winterperiode validiert und die Simulationen erneut durchgeführt werden.

Brandschutz

Allgemeines sowie methodische Vorgehensweise

Im Rahmen des Projektes wurden zum Nachweis der brandschutztechnischen Sicherheit der greenTES-Module Brandversuche durchgeführt. Die Ausführung der Versuche wird im Folgenden beschrieben. Die Prüfberichte der drei Brandversuche sind in den Anhängen A.4 Prüfbericht Durchwärmungsversuch bis A.6 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 2 zu finden.

Zunächst wird der kleinmaßstäbliche Durchwärmungsversuch im Versuchsofen mit einer Abmessung von 3 m x 3 m nach DIN EN 1363-1 beschrieben. Im Anschluss folgen die beiden realmaßstäblichen Fassadenbrandversuche in Anlehnung an DIN 4102-20.

Durchwärmungsversuch

Untersuchungsziel

Über einen kleinmaßstäblichen Brandversuch soll das Brandverhalten der greenTES-Module hinsichtlich des Wärmedurchgangs und der Schutzwirkung der Bekleidungsanlagen untersucht werden.

In Anlehnung an die MHolzbauRL wird für den Abschluss der brennbaren Außenwandkonstruktion hinter der brennbaren Fassade eine durchgehende nichtbrennbare Bekleidung gefordert. Nicht alle innerhalb des vorliegenden Projektes betrachteten Bekleidungen können mit Hilfe der MHolzbauRL nachgewiesen werden (Vgl. Anhang). Somit soll die Schutzwirkung dieser Bekleidungen in Abhängigkeit ihrer Stärke, Rohdichte und Wassergehalt nachgewiesen werden. Hierzu wird die Brandschutzwirkung hinsichtlich Isolation und Rissverhalten der Plattenwerkstoffe bei unterschiedlichen Dicken verglichen.

Zudem werden verschiedene Dämmstoffe betrachtet, um den Einfluss der Brennbarkeit der Dämmstoffe sowie deren Einfluss auf das Versagen der Bekleidungsanlagen zu untersuchen.

Prüfkriterien und-grundsätze zur Durchführung

Nach DIN EN 1995-1-2 (2023), Abs. 5.4.1, wird die Abbrandgrenze an Holzbauteilen mit der 300°C-Isotherme angenommen. Nach DIN EN 13381-7 ist t_{ch} die Zeit, bei der die angezeigte Temperatur eines an der Oberfläche des Holzbauteils oder an einer festgelegten Stelle im Inneren eines geschützten Holzbauteils angebrachten Thermoelements 300 °C erreicht. Für die Zellulosedämmung wird eine Entzündungstemperatur nach [133] bei 225 °C als Grenzwert angenommen.

Nach DIN 4102-2 muss bei feuerhemmenden Bauteilen die Standsicherheit sowie der Raumabschluss über mindestens 30 Minuten gewährleistet sein. Dies gilt auch für nichttragende Bauteile unter Eigengewicht.

Prüfkörperaufbau

Der Prüfkörper ist, wie in Abbildung 111 bis Abbildung 112 zu erkennen, eine Holztafelwand mit acht ausgedämmten Gefachen.

Die gewählten Bekleidungsmaterialien der Holztafelwand umfassen Platten unterschiedlicher Hersteller, teilweise mit Zulassung für den Außenbereich. Die genaue Anordnung der Platten ist in Abbildung 111 dokumentiert.

Die Gefache wurden gemäß dem Aufbau der greenTES-Elemente mit Zellulose-Einblasdämmstoff gefüllt. Für die Versuche wurde eine Standardeinblas-Dichte von 60 kg/m³ gewählt. Eine abweichende, geringere Dämmstoffdichte wurde nicht geprüft.

Um eine Vergleichbarkeit mit den Anforderungen der MHolzBauRL unter 3.3 zu den zu prüfenden Gefachen herzustellen, wurde das erste Gefach mit Mineralwolle (Schmelzpunkt ≥ 1.000 °C) gedämmt und mit einer Gipsfaserplatte von 18 mm Dicke verschlossen.

In Tabelle 27 und Tabelle 28 sind die Materialkennwerte der Bekleidungen sowie der Dämmstoffe zusammengefasst.

Tabelle 27: Materialkennwerte der Beplankung der Holztafelwand im Durchwärmungsversuch

Plattenbezeichnung	Plattenstärke	Rohdichte	Baustoffklasse	Europäisch technische Bewertung
Fermacell Gipsfaserplatte	18 mm	1000 – 1250 kg/m ³	A2-s1, d0	ETA-03/0050
Fermacell Gipsfaserplatte	15 mm	1000 – 1250 kg/m ³	A2-s1, d0	ETA-03/0050
Fermacell Gipsfaserplatte	12,5 mm	1000 – 1250 kg/m ³	A2-s1, d0	ETA-03/0050
Siniat Duripanel	19 mm	≥ 1000 kg/m ³	A2-s1, d0	Nichtzutreffend
Siniat Duripanel	16 mm	≥ 1000 kg/m ³	A2-s1, d0	Nichtzutreffend
Knauf Aquapanel	12,5 mm	1150 \pm 50 kg/m ³	A1	ETA-07/0173
Fermacell Powerpanel HD	15 mm	950 \pm 100 kg/m ³	A1	ETA-13/0609

Tabelle 28: Materialkennwerte der Dämmstoffe in den Gefachen im Durchwärmungsversuch

Dämmstoffbezeichnung	Rohdichte	Baustoffklasse	Europäisch technische Bewertung
Mineralwolle Rockwool Fillrock RG	45 – 95 kg/m ³	A1	ETA-18/1023
Isocell Zellulose-Einblasdämmstoff	ca. 60 kg/m ³	B-s2, d0	ETA-06/0076

Abbildung 111: Ansicht des Prüfkörpers mit vertikaler Positionierung der Thermolemente innenseitig der Beplankungen

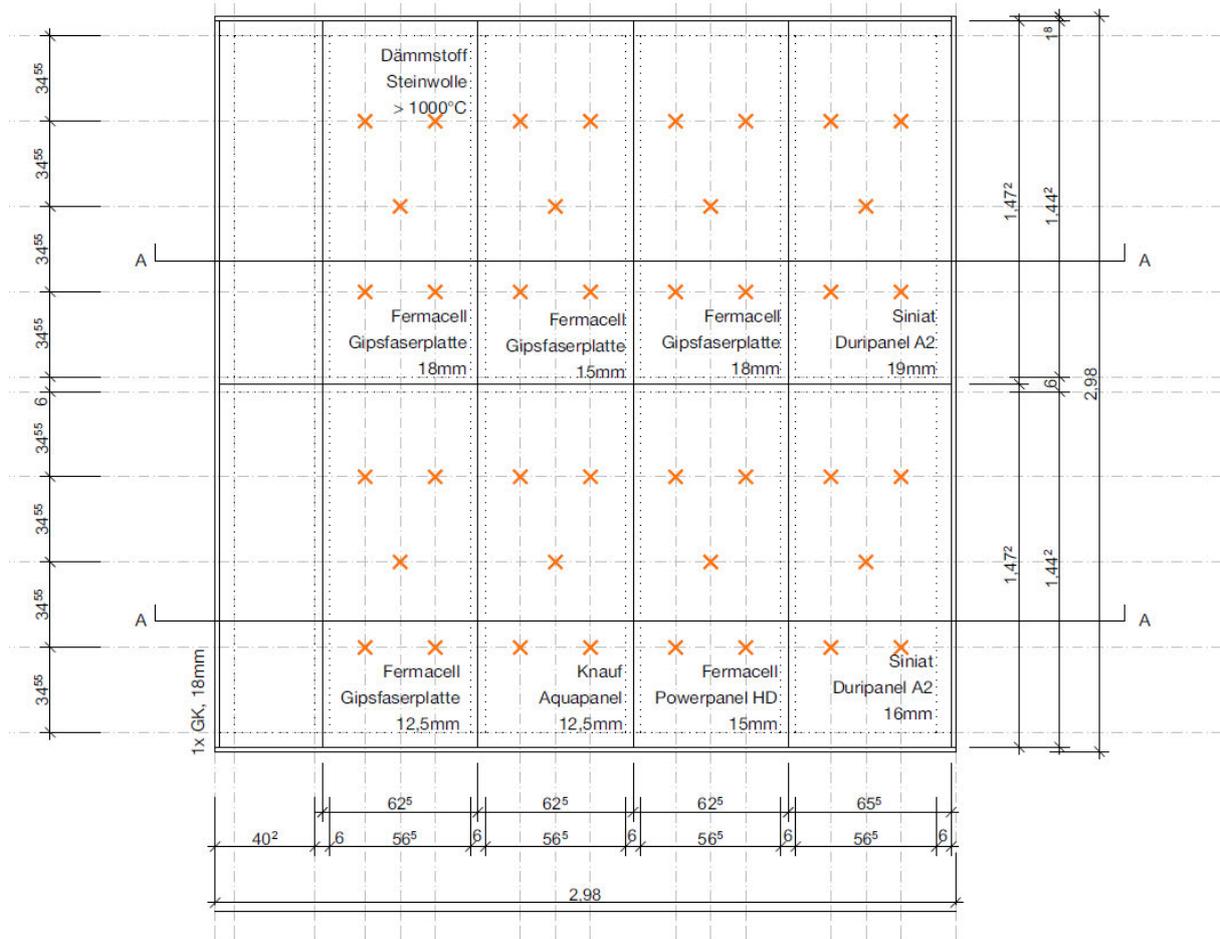
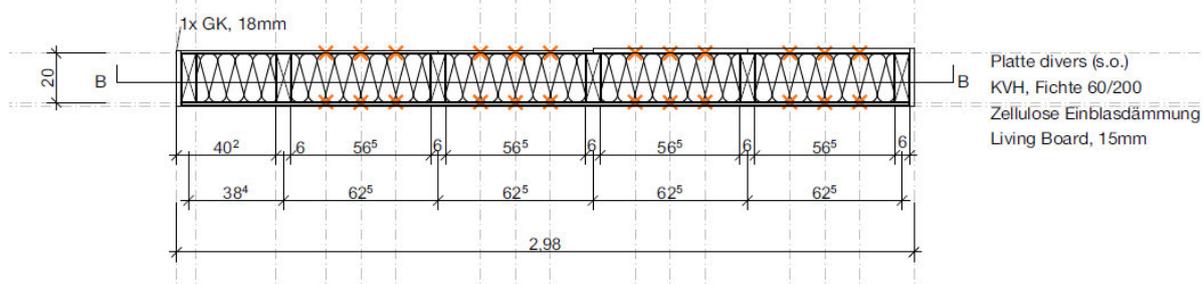


Abbildung 112: Schnitt A-A durch den Prüfkörper mit horizontaler Positionierung der Thermolemente an der Innenseite der Platten



Messtellenanordnung

Der Versuchsofen entspricht den Anforderungen für eine Prüfung nach DIN 1363-1. Die Brandraumgröße beträgt 3,0 m x 3,0 m x 4,0 m (Breite x Höhe x Tiefe). An den Seitenwänden – nahe der zu prüfenden Holztafelwand – sind vier Ölbrenner angeordnet. Hierdurch wird im Versuch die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach DIN EN 1363-1 aufgebracht. Rauchgase werden über die Raumecken abgesogen, wodurch der Druck im Brandraum reguliert werden kann. Für die Ergebnisse wurden während des Versuchs die Temperatur und der Ofendruck aufgezeichnet. Weiterhin wurden mit der Wärmebildkamera thermographische Aufnahmen während des Versuches festgehalten. (Vgl. A.4 Prüfbericht Durchwärmungsversuch)

Als nichttragende Außenwände oder nichttragende Teile tragender Außenwände sind die greenTES-Elemente nach § 28 Abs. 5 Satz 2 MBO1 aus brennbaren Baustoffen zulässig, wenn sie als raumabschließende Bauteile feuerhemmend sind. Nach den MVV TB ist ein Bauteil feuerhemmend, wenn die Standsicherheit (MVV TB A 2.1.3.2.4) sowie der Raumabschluss (MVV TB A 2.1.3.3.4) bei Brandeinwirkung nach der ETK gemäß DIN 4102-2:1977-09, Abschnitt 6.2.4, über mindestens 30 Minuten gewährleistet ist.

Ziel des Versuchs ist es zu prüfen, ab welchem Zeitpunkt die geforderte Schutzwirkung der Platten als brandschutztechnische Bekleidung nachlässt. Hierfür wurde innenseitig im Gefach die Temperatur über die Bauteiltiefe gemessen. Die Entzündungstemperatur der Zellulosedämmung wurde nach [133] bei 225 °C als Grenzwert angenommen. Als zweiter Grenzwert gilt die 300°C-Isotherme nach DIN EN 1995-1-2 (2023), Abs. 5.4.1, welche als Abbrandgrenze für Holzbauteile angenommen wird. Diese wird zusätzlich herangezogen, um neben dem Glimmen bzw. Brennen der Gefachdämmung die Schutzwirkung der Platten auf die brennbaren Konstruktionsbauteile bewerten zu können.

Ein vorzeitiger Abbruch war im Falle eines Durchbrands durch die Konstruktion nach DIN EN 13381-7 geplant. Da jedoch kein Durchbrand in den ersten 30 min stattfand, wurde der Versuch auf 45 Minuten verlängert.

Als Ofenthermoelemente wurden entsprechend DIN EN 1363-1 Platten-Thermometer (zu sehen in Abbildung 115) gewählt. Für die Prüfung wurden glasfaserisolierte 800 °C Leitungen des Typ K (Abbildung 113b) verwendet. Die freien Enden der Leitungen wurden abisoliert und an den Spitzen verdrillt und punktgeschweißt.

In Abbildung 113 ist die Umsetzung der Kabelführung im Wandelemente zu sehen. Da die Gefache der Holztafelwand mittels der Lanzeneinblasdämmung ausgeflockt wurden, wurden die Thermoelemente zusätzlich durch Klammern fixiert. Die fünf Messpunkte der brandzugewandten Beplankung sind je Gefach im Mittelpunkt und den Viertelpunkten der Diagonalen angeordnet, siehe Markierungen in Abbildung 111 bis Abbildung 112. Auf der brandabgewandten Beplankung wurden analog dazu drei Thermoelemente angebracht. Die Messstellen wurde, wie in Abbildung 113 zu sehen, bei beiden Bekleidungen innerhalb des Bauteils und somit in der Dämmebene angebracht.

Abbildung 113: Einbau der Thermoelemente in den Prüfkörper

a) Position an den Gipswerkstoffplatten



c) Führung der Thermoelemente je Gefach

b) Durchführung und Kennzeichnung



d) Fixierung der Kabelführung



Abbildung 114: Messstellenplan

Brandzugewandte Seite

Dämmstoff Zellulose	Dämmstoff Steinwolle > 1000°C X 35 X 36 Gefach 1 X 37	Dämmstoff Zellulose X 40 X 41 Gefach 2 X 42	Dämmstoff Zellulose X 45 X 46 Gefach 3 X 47	Dämmstoff Zellulose X 50 X 51 Gefach 4 X 52
	X 38 X 39 Fermacell Gipsfaserplatte 18mm	X 43 X 44 Fermacell Gipsfaserplatte 15mm	X 48 X 49 Fermacell Gipsfaserplatte 18mm	X 53 X 54 Siniat Duripanel A2 19mm
Dämmstoff Zellulose	Dämmstoff Zellulose X 55 X 56 Gefach 5 X 57	Dämmstoff Zellulose X 60 X 61 Gefach 6 X 62	Dämmstoff Zellulose X 65 X 66 Gefach 7 X 67	Dämmstoff Zellulose X 70 X 71 Gefach 8 X 72
	X 58 X 59 Fermacell Gipsfaserplatte 12,5mm	X 63 X 64 Knauf Aquapanel 12,5mm	X 68 X 69 Fermacell Powerpanel HD 15mm	X 73 X 74 Siniat Duripanel A2 16mm

Brandabgewandte Seite

Dämmstoff Zellulose	Dämmstoff Steinwolle > 1000°C X 11 X 14 Gefach 1 X 12	Dämmstoff Zellulose X 14 X 17 Gefach 2 X 15	Dämmstoff Zellulose X 17 X 18 Gefach 3 X 18	Dämmstoff Zellulose X 20 X 21 Gefach 4 X 21
	X 13 X Fermacell Gipsfaserplatte 18mm	X 16 X Fermacell Gipsfaserplatte 15mm	X 19 X Fermacell Gipsfaserplatte 18mm	X 22 X Siniat Duripanel A2 19mm
Dämmstoff Zellulose	Dämmstoff Zellulose X 23 X Gefach 5 X 24	Dämmstoff Zellulose X 26 X Gefach 6 X 27	Dämmstoff Zellulose X 29 X Gefach 7 X 30	Dämmstoff Zellulose X 32 X Gefach 8 X 33
	X 25 X Fermacell Gipsfaserplatte 12,5mm	X 28 X Knauf Aquapanel 12,5mm	X 31 X Fermacell Powerpanel HD 15mm	X 34 X Siniat Duripanel A2 16mm

Abbildung 115: Eingebauter Prüfkörper im Prüfofen von innen (links) und von außen (rechts)



Ergebnisse und Auswertung Durchwärmungsversuch

Der Brandversuch wurde bis zum Durchbrand der Wand an der brandabgewandten Seite in Gefach 8 nach der 42. Minute durchgeführt. Der Verlauf der ETK ist in Abbildung 116 zu sehen. Der rote Graph zeigt die anvisierte ETK, die schwarz-gestrichelte Linie den Bereich der zulässigen Abweichung. Die Temperaturmesspunkte des Brandraumes sind im Anhang A.4 Prüfbericht Durchwärmungsversuch zu finden. Die Ofenthermoelemente 91 und 92 zeigen bis zur zehnten Versuchsminute maßgeblich höhere Werte als die restlichen. Es muss folglich berücksichtigt werden, dass die Temperaturen bis zur zehnten Minute im oberen Bereich des Ofens punktuell höher als vorgesehen waren. Auswirkungen diesbezüglich wurden in den weiteren Auswertungen berücksichtigt. In Abbildung 117 zeigt die Darstellung über das Flächenintegral, dass die Messungen an Plate 94 bis zur zehnten Minute im unteren Bereich des Ofens unterschritten wurden. Die Temperaturbeanspruchung fand bei den unteren verglichen mit den oberen Platten zeitverzögert statt.

Ab der zehnten Versuchsminute verläuft die Brandraumtemperatur nach DIN EN 13381-4. Die Umgebungstemperatur im Messlabor außerhalb des Brandraumes lag konstant bei knapp 20 °C.

Abbildung 116: ETK und Brandraumtemperatur

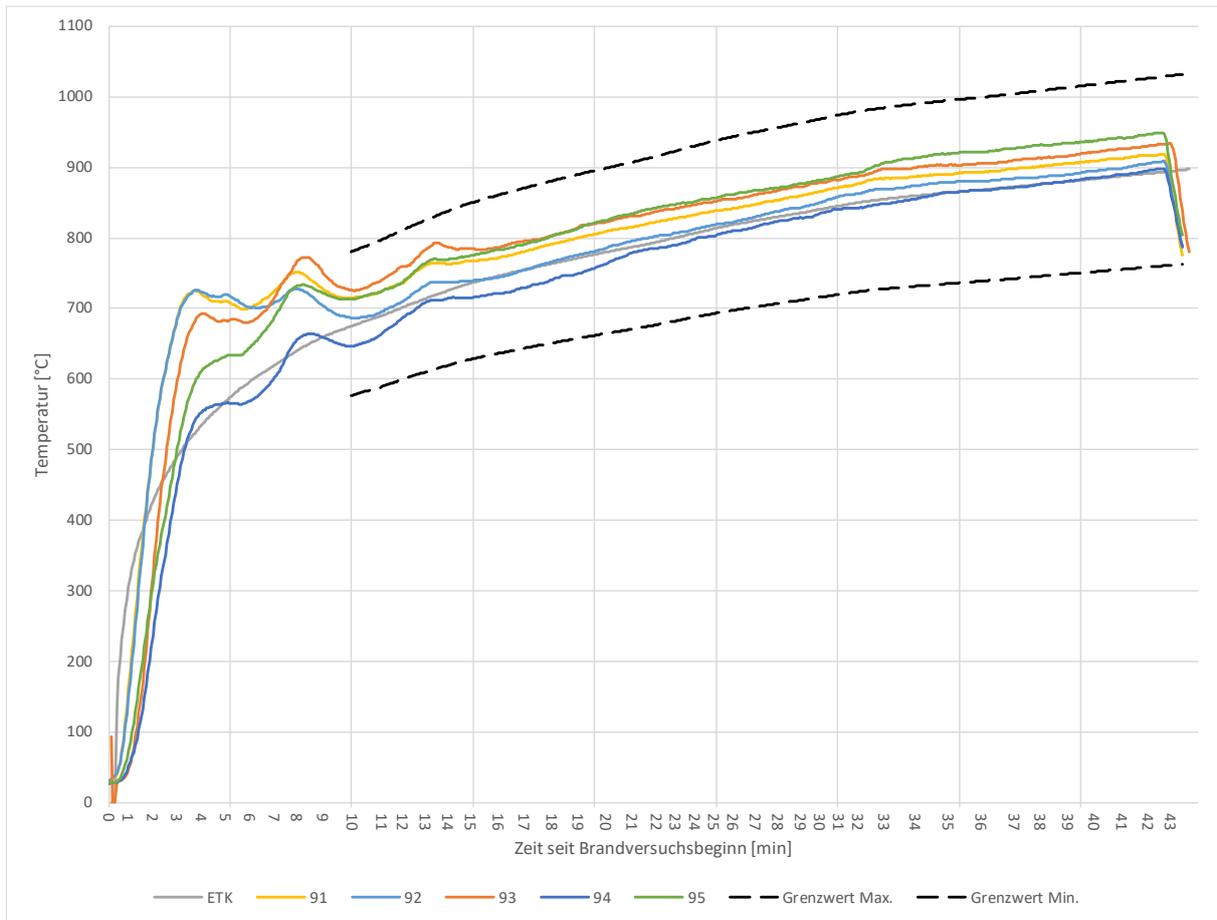
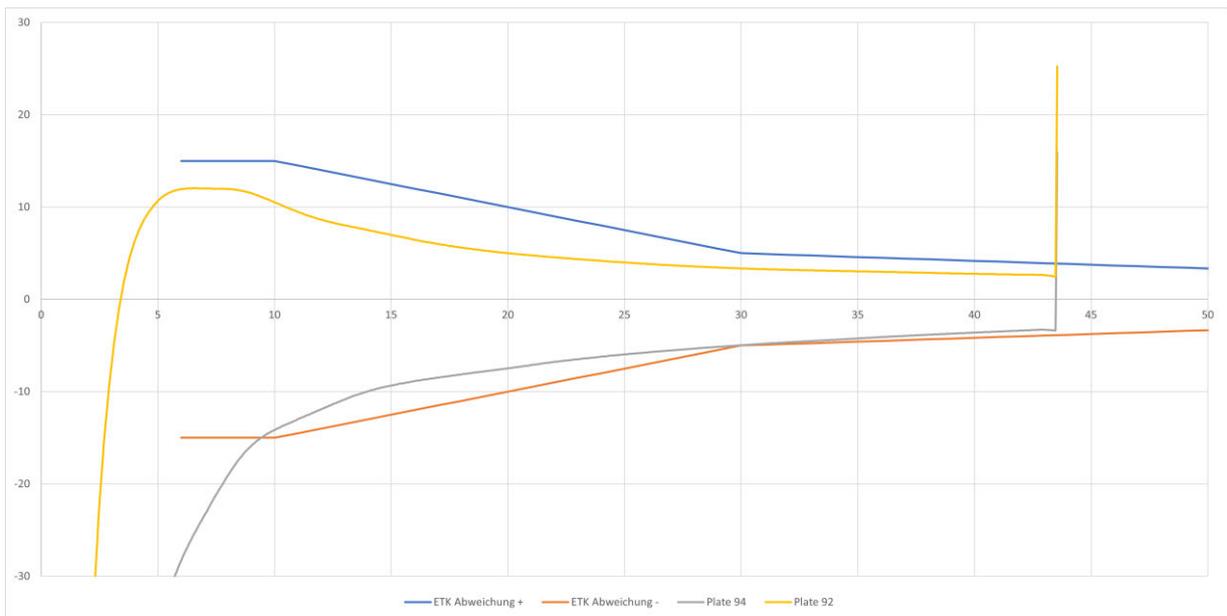


Abbildung 117: Flächenintegral der Brandraumtemperatur



Der Ablauf der Brandversuches ist in Tabelle 29 chronologisch abgebildet. Es zeichnet sich ab, dass die Gefache 6, 7, anschließend zeitgleich 5 und 8 an der brandzugewandten Seite als erstes 225 °C erreichen. Alle vier Gefache befinden sich im unteren Bereich, wo neben der dünnsten Gipsfaserplatte mit 12,5 mm drei zementbasierte Platten angeordnet wurden.

Tabelle 29: Beobachtungsprotokoll des Durchwärmungsversuches

Zeit seit Versuchsbeginn	Beobachtungen
0 min.	Start des Versuchs um 10:30 Uhr
1 min.	Abbruch (Messprogramm Fehlermeldung) 10:31 Uhr
-	Neustart 10:40 Uhr
0 min.	Start mit Brenner 1 bis 4
10 min.	Gefach 6 – brandzugewandte Seite 300 °C Kriterium erreicht
13 min.	Gefach 7 – brandzugewandte Seite 300 °C Kriterium erreicht
17 min.	Gefach 5 – brandzugewandte Seite 300 °C Kriterium erreicht Gefach 8 – brandzugewandte Seite 300 °C Kriterium erreicht
19 min.	Gefach 2 – brandzugewandte Seite 300 °C Kriterium erreicht
27 min.	Gefach 1 – brandzugewandte Seite 300 °C Kriterium erreicht
30 min.	Gefach 3 – brandzugewandte Seite 300 °C Kriterium erreicht Gefach 4 – brandzugewandte Seite 300 °C Kriterium erreicht
40 min.	Gefach 8 – Durchbrand auf brandabgewandter Seite
42 min.	Brandversuch beendet
43 min.	Thermoelemente abgeschnitten

Um den Brandverlauf im Detail zu analysieren, sind im Folgenden die Temperaturverläufe der acht Gefache dargestellt.

Abbildung 118: Temperaturverlauf Gefach 1, 18 mm, Fermacell Gipsfaserplatte + Steinwolle-Dämmstoff

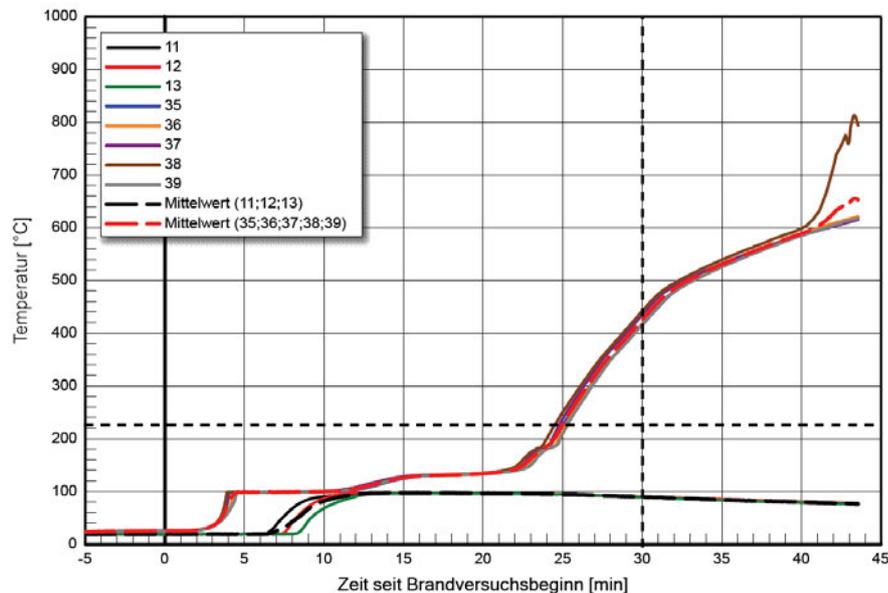
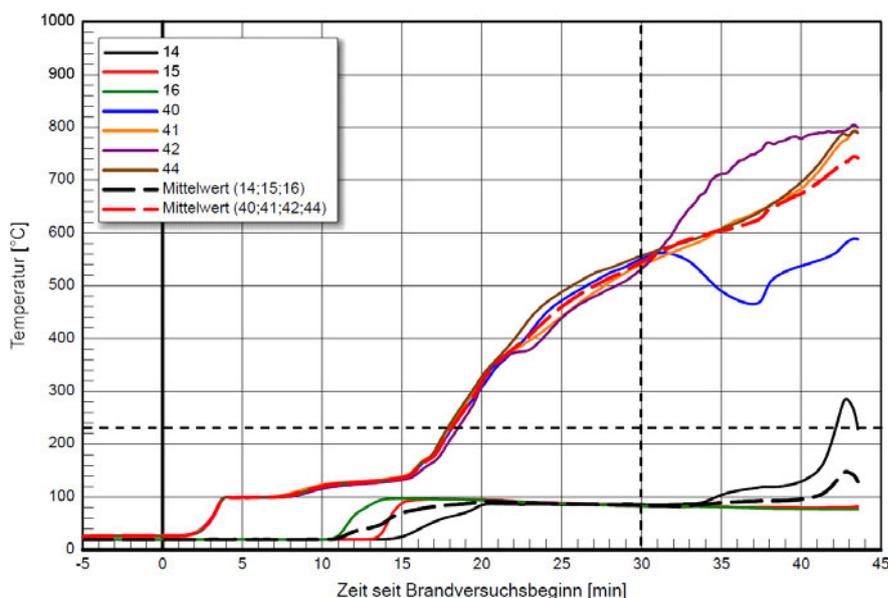
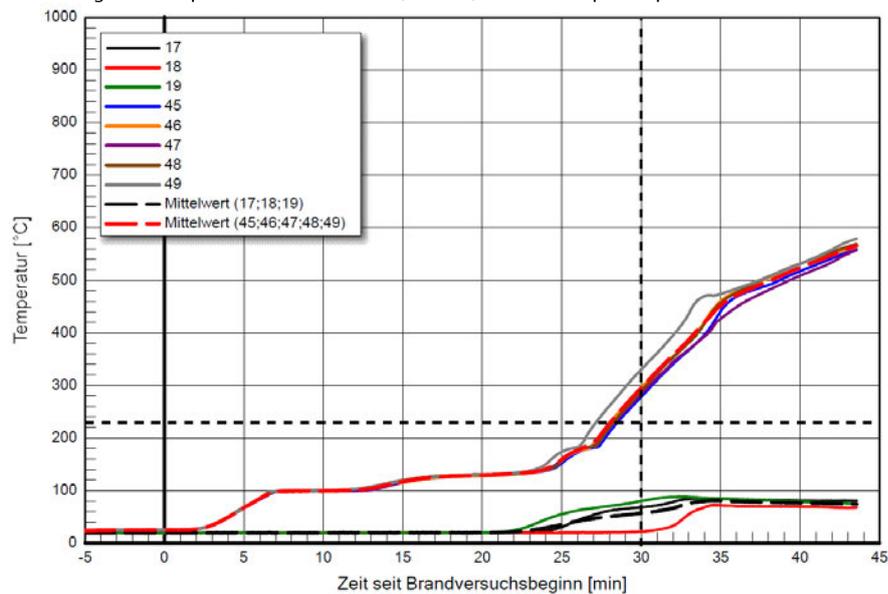


Abbildung 119: Temperaturverlauf Gefach 2, 15 mm, Fermacell Gipsfaserplatte + Zellulose-Dämmstoff



Deutlich zu erkennen ist, dass von allen acht Bekleidungen nur Gefach 3 und 4 in Abbildung 120 und Abbildung 121 die Entzündungstemperatur hinter dem Plattenwerkstoff von 300 °C nach 30 min erreichen. Alle anderen Bekleidungen erreichen den Punkt früher. Auffällig ist, dass die Temperaturen in Gefach 1 (Abbildung 118) trotz gleicher Bekleidung früher steigen als bei Gefach 3 (Abbildung 120). Dies ist auf den verbauten Dämmstoff zurückzuführen. Die Steinwollendämmung wird als Matte in das Gefach gelegt. Bei zu wenig Kompression entstehen Lufträume, durch welche verdampftes Wasser durch den Hohlraum transportiert werden kann. Die Dämmwirkung sinkt. Die dicht eingeblasene Dämmung aus Zellulose zeigt bis zum Ende des Versuches keine Abweichungen. Für eine abschließende und vergleichende Bewertung der beiden Dämmstoffe ist eine umfangreichere Versuchsreihe notwendig, bei der auch Abweichungen durch fehlerhaften Einbau berücksichtigt werden können.

Abbildung 120: Temperaturverlauf Gefach 3, 18 mm, Fermacell Gipsfaserplatte + Zellulose-Dämmstoff



Durch den Vergleich von Gefach 2 in Abbildung 119 und Gefach 3 in Abbildung 120 kann festgehalten werden, dass die Temperaturen auf der brandzugewandten Seite hinter der Gipsfaserplatte mit 18 mm niedriger bleiben als bei der mit 15 mm. Bei der 15 mm Beplankung wird die 225 °C-Grenze bereits ab Minute 18 erreicht, bei der 18 mm Platte erst ab Minute 27. Dies wirkt sich auf die Temperaturmessung auf der brandabgewandten Seite aus: Die brandabgewandte Messtelle erreicht bei der dünneren Gipsfaserplatte ab der elften Minute 100 °C. Bei der dickeren Gipsfaserplatte werden die 100 °C bis zum Versuchsende nicht erreicht. Ab der 32. Minute kommt es bei Gefach 2 zu einem Abfallen der brandzugewandten Seite.

Die mit der Plattenstärke zunehmende Schutzfunktion von Gipsfaserplatten kommt durch die Zusammensetzung zustande. Gipswerkstoffplatten werden aus Papierfasern, Gips und Wasser ohne Bindemittel durch Pressung zu einer Platte verarbeitet. Hier ist durch die Zusammensetzung ein hoher Wassergehalt in der Platte gegeben. Im Gegensatz dazu sind die Hauptbestandteile der zementgebundenen Platten Leichtzuschläge, welche mit Zement und Armierung gebunden werden. Durch den geringeren Wassergehalt kann bei den zementgebundenen Platten der Temperaturanstieg durch Verdampfen des Wassers nicht gepuffert werden. Die Temperatur im Gefach steigt schneller an. Bestätigt wird dies durch die Temperaturverläufe der Gefache 4, 6, 7 und 8, die mit einer zementgebundenen Platte beplankt waren. Hier fällt auf, dass die Temperatur nach Erreichen der 100 °C konstant bis teilweise proportional steigt. Bei allen mit Gipsfaserplatten beplankten Gefachen tritt nach der 100 °C Grenze ein Abflachen der Temperaturkurve auf. Bei der 12,5 mm Platte bewegt sich die Temperatur für vier Minuten bei 100 °C und steigt anschließend weitere sechs Minuten flach an. Für die 15 mm Platte bleibt die Temperatur durch den Effekt der Gipsplatte circa 12 min. abgeflacht und bei der 18 mm Platte mit beiden Dämmstoffen bei 18 min. In Tabelle 30 ist ein Vergleich über das Erreichen der Temperaturgrenzwerte in allen Gefachen an der brandzugewandten Seite in tabellarischer Form gegeben. Hierdurch kann der Einfluss von Zement- bzw. Gipsanteil in den Beplankungen zu den Schutzzeiten zugeordnet werden. Für alle gipshaltigen Platten gilt, dass hier ab dem Erreichen der 100 °C Grenze ein Kühleffekt durch das gebundene Wasser eintritt. Die dünnste Platte erreicht hier ab der 15. Minute die kritische Temperatur für die Zellulosedämmung. Die Durchwärmung aller zementgebundener Platten ist für den dahinterliegenden biogenen Dämmstoff als kritisch zu bewerten. Auch in Gefach 4 (Siniat Duripanel 19 mm – in Abbildung 121) eine kritische Temperatur ab Minute 25 für die Schutzwirkung der Platte erreicht. Ab der 40. Minute kommt es aufgrund eines Abfallens der innenseitigen Beplankung zu einem steilen Anstieg der Temperaturmessungen.

Tabelle 30: Vergleich des Erreichens der Temperaturgrenzwerte in den Gefachen an der brandzugewandter Seite

Temp. Messung an brandzugewandter Seite	Gefach 1	Gefach 2	Gefach 3	Gefach 4	Gefach 5	Gefach 6	Gefach 7	Gefach 8
GF: Gipsfaser ZP: Zementgeb. Platte MW: Mineralwolle Z: Zellulosedämmung	18 mm GF, MW	15 mm GF, Z	18 mm GF, Z	19 mm ZP, Z	12,5 mm GF, Z	12,5 mm ZP, Z	15 mm ZP, Z	16 mm ZP, Z
100 °C	4 min.	3 min.	6 min.	10 min.	3 min.	2 min.	4 min.	5 min.
225 °C	25 min.	18 min.	27 min.	25 min.	15 min.	8 min.	11 min.	15 min.
300 °C	26 min.	20 min.	30 min.	30 min.	16 min.	10 min.	13 min.	16 min.

Abbildung 121: Temperaturverlauf Gefach 4, 19 mm, Siniat Duripanel A2 + Zellulose-Dämmstoff

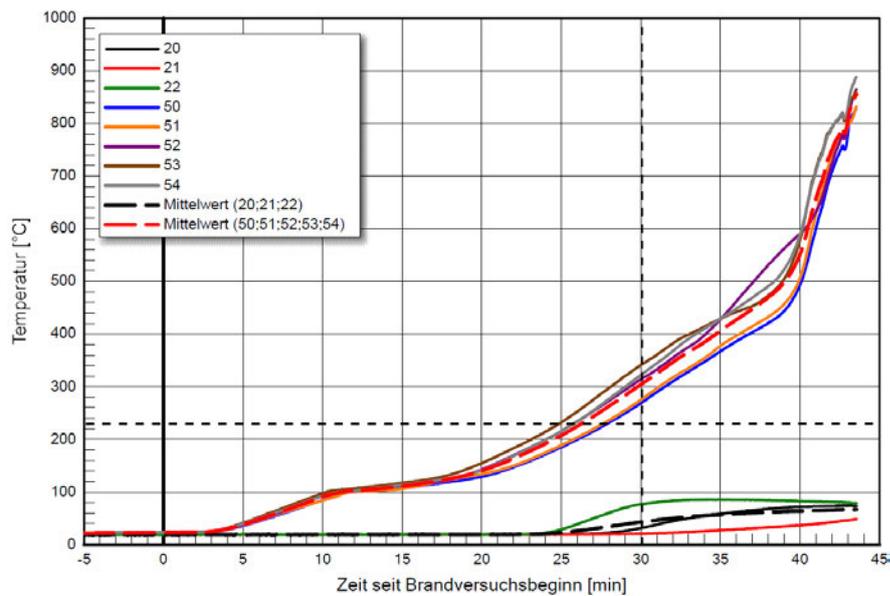


Abbildung 122: Temperaturverlauf Gefach 5, 12,5 mm, Fermacell Gipsfaserplatte + Zellulose-Dämmstoff

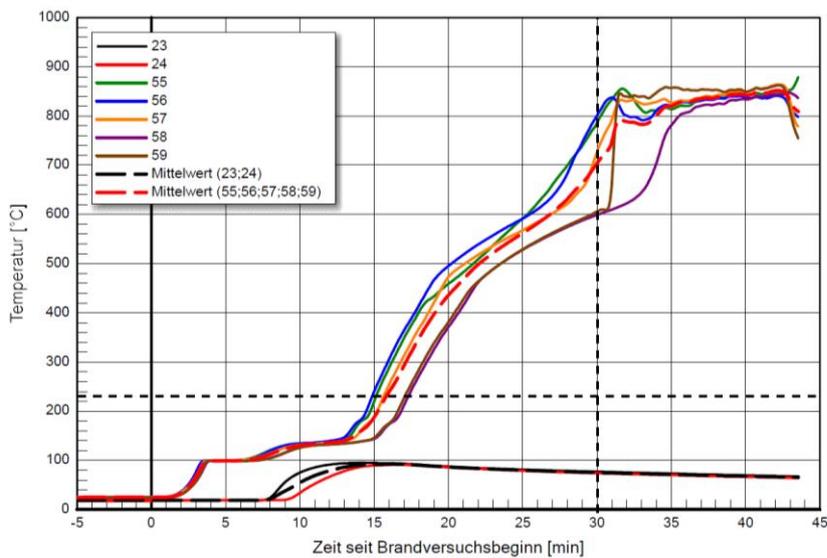
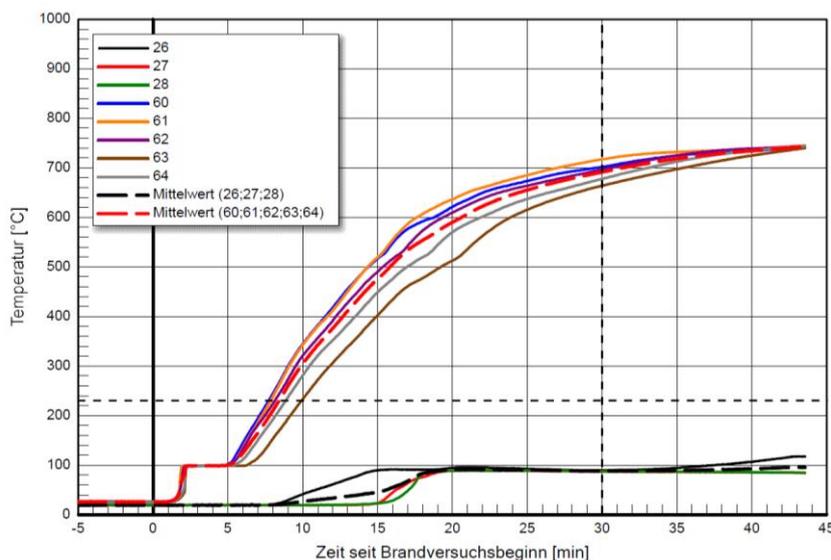


Abbildung 123: Temperaturverlauf Gefach 6, 12,5 mm, Knauf Aquapanel + Zellulose-Dämmstoff



Vergleicht man die Schutzwirkungen der Beplankungen im unteren Bereich des Versuchskörpers mit den vorherigen Untersuchungen, lässt sich in den Abbildung 122 - Abbildung 125 erkennen, dass die Schutzzeit deutlich kürzer ist. Die 225 °C-Grenze wird bei den dickeren Platten zwischen zehn und zwölf Minuten später erreicht. Hier muss angemerkt werden, dass die Temperaturen im Prüfofen im unteren Bereich vor allem zu Beginn des Versuches zu gering waren. Es kann von einer höheren Temperaturbeanspruchung der oberen als der unteren Platten ausgegangen werden. Die höhere Schutzwirkung der dickeren Platten kann demnach als markanter angenommen werden.

Abbildung 124: Temperaturverlauf Gefach 7, 15 mm, HD Fermacell Powerpanel + Zellulose-Dämmstoff

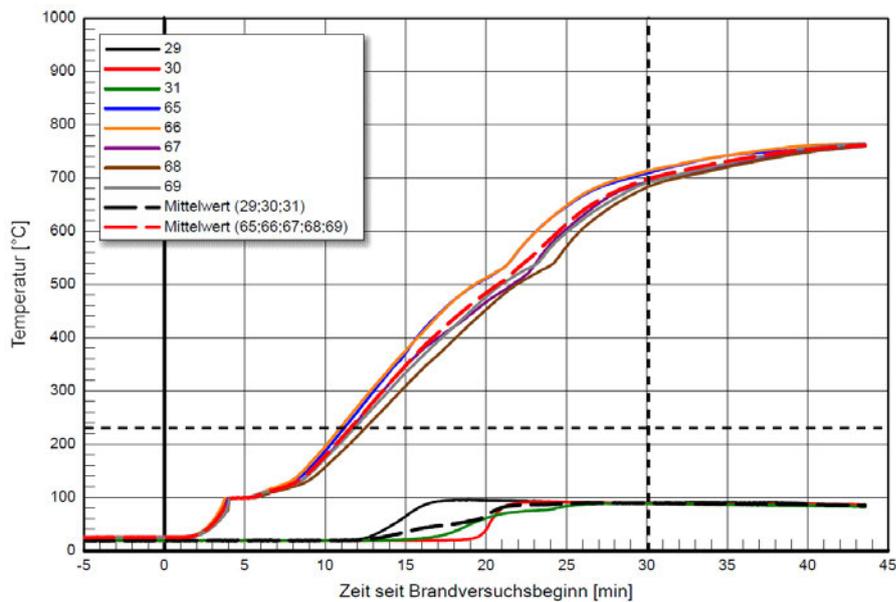
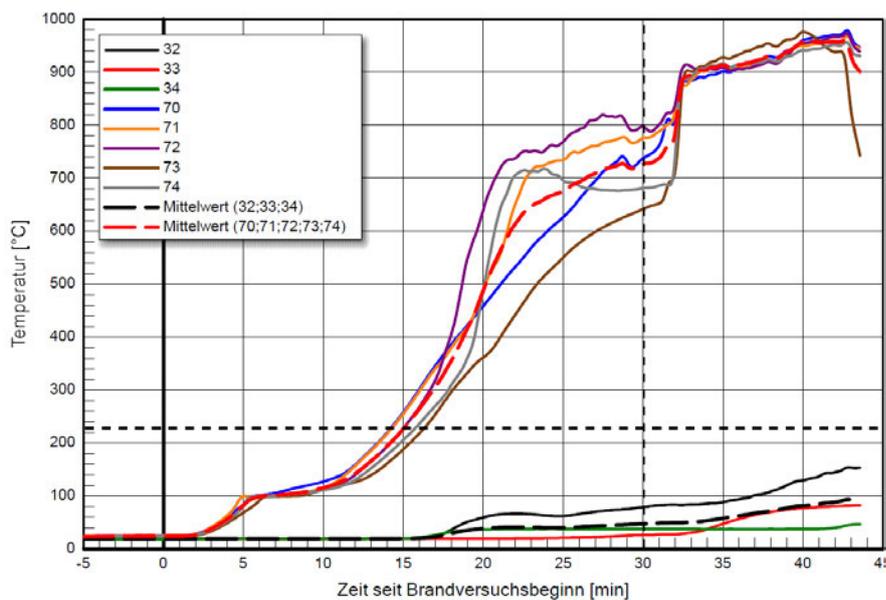


Abbildung 125: Temperaturverlauf Gefach 8, 16 mm, Siniat Duripanel A2 + Zellulose-Dämmstoff



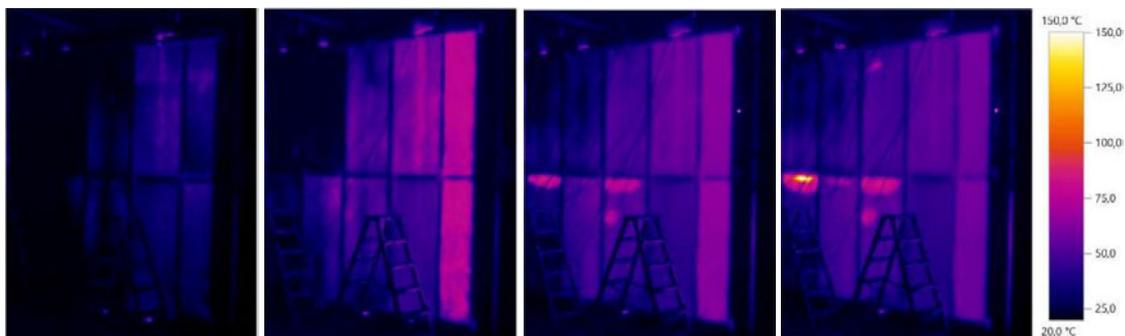
In den thermographischen Aufnahmen in Abbildung 127 ist zu erkennen, dass sich die brandabgewandten Seiten der einzelnen Gefache unterschiedlich stark erwärmen. Vom Ausgangsbild bei Minute 0 zu Minute 15 ist eine Temperaturerhöhung hinter dem Gefach mit Steinwolle zu erkennen. Ab Minute 25 zeichnen sich in Gefach 6 und 8 an der Oberseite hohe Temperaturen ab. Hier ist davon auszugehen, dass die Schutzwirkung der Platten nachgelassen haben, indem sie nach der geforderten Schutzzeit abgefallen sind. Bestätigt wird dies in Abbildung 125, in welcher ist der Temperaturverlauf von Gefach 8 zu sehen ist. Ab der 20. Minute schwanken die Ergebnisse der Temperaturmessungen je Sensor um 300 K. Hier fand nach der 42. Minute ein Durchbrand der Holzwerkstoffplatte statt. Der Durchbrand ist von außen in Abbildung 126 zu erkennen. Die Brandstelle läuft linear oberhalb der Dämmung, wodurch darauf zu schließen ist, dass erst die Beplankung und anschließend die Zellosedämmung nicht mehr ihre Funktionen im Gefach erfüllt haben. Dies ist durch Rissbildung bzw. Herausfallen der Dämmung aus der Wand begründbar. Da die Prüfstelle nach dem

abgeschlossenen Versuch den Ofen verriegelt und keine Einsicht in den Ofen möglich ist, kann die genaue Ursache hierfür nicht benannt werden. Über das Rissverhalten kann insgesamt keine Aussage getroffen werden.

Abbildung 126: Durchbrand in Gefach 8



Abbildung 127: Thermographische Aufnahmen mit der Wärmebildkamera, von links nach rechts: Minute 0, 15, 25, 35



Die Schutzzeit kann auf Basis der oben genannten Ergebnisse bei den Platten an Gefach 3 und 4 für 30 Minuten angenommen werden. Hier sind die Bekleidungen Fermacell Gipsfaserplatte mit 18 mm und das Siniat Duripanel A2 19 mm bei Zellulose als Dämmstoff angebracht. Ab der 27. Minute erreicht auch das Gefach mit der 18 mm Gipsfaserplatte die 225 °C-Grenze für die Entzündungstemperatur von Zellulose. Die Schutzwirkung der Bekleidungen für die Zellulosedämmung ist bei beiden Platten bis zur 25. bzw. 27. Minute gegeben. Danach ist ein Entzünden der Dämmung zu erwarten.

Für das Siniat Duripanel A2 bleibt jedoch zu beachten, dass es im Mittel bewertet wird. Bei genauerer Betrachtung zeigen die unteren Thermoelemente geringfügig höhere Temperaturen als die oberen. Dies ist in diesem Bereich durch die Position der Brennereinlässe im Ofen zu begründen.

Alle anderen Platten durchwärmen sich deutlich schneller. Eine Übersicht über die Dauer der Schutzfunktion der Bauteilaufbauten ist in Tabelle 31 gegeben. Die zementgebundenen Platten schneiden bei der Bewertung im Vergleich zu Gipswerkstoffplatten schlechter ab. Erst ab einer Plattenstärke von 19 mm gleichen sich die Schutzwirkungen an.

Tabelle 31: Übersicht über die Schutzzeit der Platten (Zellen der zementgebundenen Platten in grau, die der Gipswerkstoffplatten in weiß hinterlegt)

Gefach	Plattenbezeichnung	Erreichen 300 °C nach	Erreichen 225 °C nach	Erreichen 100 °C an brandabgewandter Seite nach
Gefach 1	Fermacell Gipsfaser 18 mm, MW	26 min.	25 min.	8 min.
Gefach 2	Fermacell Gipsfaser 15 mm	20 min.	18 min.	11 min.
Gefach 3	Fermacell Gipsfaser 18 mm	30 min.	27 min.	25 min.
Gefach 4	Siniat Duripanel A2 19 mm	30 min.	25 min.	17 min.
Gefach 5	Fermacell Gipsfaser 12,5 mm	16 min.	15 min.	12 min.
Gefach 6	Knauf Aquapanel 12,5 mm	10 min.	8 min.	12 min.
Gefach 7	Fermacell Powerpanel 15 mm	13 min.	11 min.	17 min.
Gefach 8	Siniat Duripanel 16 mm	16 min.	15 min.	20 min.

Großbrandversuche

Untersuchungsziel Großversuche

Innerhalb der Großbrandversuche wurde das Verhalten der greenTES-Elemente mit Photovoltaikbekleidung sowohl in Anlehnung an DIN 4102-20 geprüft als auch im Vergleich zu baurechtlich konformen Holzfassaden betrachtet.

Die Ergebnisse zu Brandversuchen mit begrünten Fassaden werden durch das Forschungsprojekt *FireSafe Green - Untersuchung der brandschutztechnischen Anwendbarkeit von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden* abgedeckt. [3] Hier wird das Brandverhalten von begrünten Fassaden unter Berücksichtigung verschiedener Systeme und Pflanzenarten und der daraus folgenden Brandweiterleitung über die Fassaden untersucht. Es soll der flächendeckende Einsatz von Fassadenbegrünung unter Berücksichtigung des aktuellen Sicherheitsniveaus geprüft werden. [134] Die Ergebnisse sind auf die greenTES-Elemente und -Begrünungssysteme übertragbar.

Nachfolgende Ergebnisse sollen bezüglich der Photovoltaik durch Großversuche nachgewiesen werden:

- Erfüllung der Schutzziele des Brandschutzes nach MBO, § 14: Entstehung eines Brandes und Ausbreitung von Feuer und Rauch, Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten
- Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Fassadenarten
- Bestätigung der gewählten Tiefe der Hinterlüftungsebene in Verbindung mit den Photovoltaikmodulen
- Feuerwiderstandsfähigkeit der Befestigung der Photovoltaikmodule
- Bestätigung der Schutzwirkung der angewendeten Brandsperren

Der Brandversuch 2 fand am 12.08.2023 und der Brandversuch 1 am 17.10.2023 statt. Zur Beantwortung der untersuchten Forschungsfragen wird im Nachfolgenden die Reihenfolge nicht chronologisch, sondern inhaltlich aufbauend betrachtet.

Methodische Vorgehensweise

Für das Forschungsprojekt wurden zwei unterschiedliche Großbrand-/Realbrandversuche in Garching am Gelände der TUM Werkfeuerwehr geplant und durchgeführt. Innerhalb derer wurde das Verhalten der Photovoltaikfassaden sowohl in Anlehnung an DIN 4102-20 geprüft als auch im Vergleich zu baurechtlich konformen Holzfassaden betrachtet werden. Im Folgenden wird die methodische Vorgehensweise für die Planung der einzelnen Prüfkörperbestandteile beschrieben.

Holztafelbauwand

Die Holztafelbauwand wird mit einer Hinterlüftungsebene nach MHolzBauRL ausgeführt. Die nichtbrennbare Bekleidung ist eine 18 mm Gipsfaserplatte (Baustoffklasse A2-s1, d0). Die Dämmung der Prüfkörper wurde ausgelassen, da andernfalls eine Installation der Sensoren erschwert gewesen wäre. Während der Versuchsdurchführung konnte somit ein nicht als realistisch zu bewertender, hoher Wärmeabfluss auf der Rückseite der Prüfkörper stattfinden. Es ist anzunehmen, dass höhere Temperaturen während des Versuchs im Bauteil aufgetreten wären, wenn eine Dämmung installiert worden wäre.

Die Holztafelkonstruktion wurde aus Konstruktionsvollholz (Fichte) gefertigt, wobei die Ständer, Schwellen und Riegel eine Stärke von 200 mm und eine Breite von 60 mm aufweisen. Die Gesamthöhe der Prüfkörper ist jeweils 7,25 m. Weitere Maßangaben sind den Prüfberichten im Anhang A.5 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 1 und A.6 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 2 zu entnehmen.

Holzfassade

Die Holzfassade aus Brandversuch 2 umfasst eine vertikale Nut-Feder-Schalung (Dicke 25 mm), versehen mit einer Hinterlüftungsebene von 50 mm.

Photovoltaik

Hinsichtlich der Ausbildung der Photovoltaikfassade wurden für beide Versuche PV-Module des Herstellers Avancis GmbH gewählt. Das Dünnschichtmodul Typ Skala von Avancis inklusive der Befestigungsklemmen ist in der allgemeinen Bauartgenehmigung als normalentflammbar nach DIN 4102-B2 zugelassen. [68]

In Übereinstimmung mit dem Hersteller wurde das reale Verhalten der Photovoltaik-Module im Maßstab für Versuche analysiert. Gemäß Berichten und Erfahrungen des Herstellers ist ein Versagen der Klebepunkte des Photovoltaikmoduls und somit ein vollständiges Abfallen des Moduls zunächst nicht zu erwarten. Das entscheidende Versagen wird als Reißen oder Splintern beschrieben, begleitet von teilweisem Abfallen von Teilen mit weniger als einem Kilogramm.

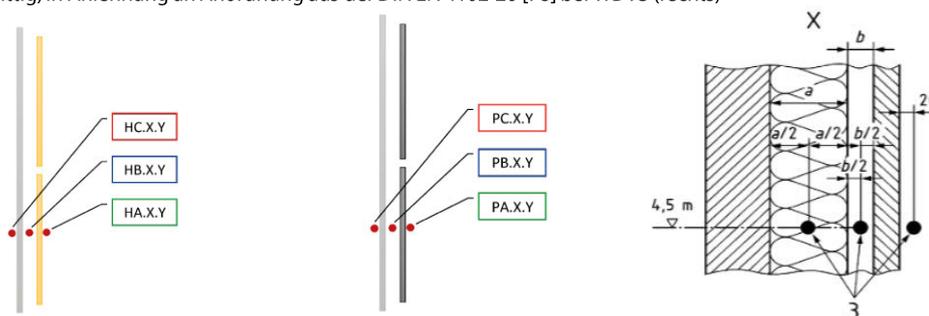
Die Module werden mithilfe einer entsprechenden Unterkonstruktion aus Aluminiumprofilen befestigt und weisen Abmessungen von 665 x 1590 x 60 mm auf. Die PV-Module bestehen aus zwei miteinander verklebten Glasscheiben, die an den sogenannten Backrails (0,7 mm Stahlblech) angebracht sind. Das Deckglas und das beschichtete Substratglas sind über eine Zwischenschicht miteinander verbunden. Die Verbindung zwischen der Unterkonstruktion und den Backrails erfolgt durch sogenannte SMART-Klemmen, die in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung der Module in Anhang A.5 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 1 detailliert beschrieben sind. Das Gesamtgewicht eines Moduls beträgt 17,0 kg [135, 136].

Messstellen

Die Messinstrumentalisierung der Versuche erfolgt für beide Versuche in Anlehnung an DIN 4102-20. Das Raster für die Messstellen wurde mit 0,5 m x 0,5 m festgelegt. In Abbildung 128 ist die Positionierung und Benennung der Messstellen in der Bauteiltiefe dargestellt. [78] Es werden Messstellen in Anlehnung an DIN 4102-20 an der äußersten Fassade, mittig in der Hinterlüftung und an der Rückseite der Bekleidungsfläche befestigt. Hierdurch können nicht nur Rückschlüsse auf die Brandausbreitung, sondern auch den Effekt in der Hinterlüftungsebene gezogen werden.

Die Datenaufzeichnung erfolgte mit HP-Data Acquisition 3852 A. Auf der brandzugewandten Seite, in der Mitte des Hinterlüftungsspaltens sowie 20 mm vor der Fassade wurden Mantel-Thermoelemente mit 3 mm Dicke (Stecker Typ K) nach DIN EN 60584-1 eingebracht. [137] An der brandabgewandten Seite befanden sich Scheibenthermoelemente nach DIN EN 1363-1 [138], um die Oberflächentemperaturen auf der Rückseite der Brandschutzbauplatte (Gipsfaserplatte) zu messen. Im Bereich der Brandsperren bzw. kurz unter- und oberhalb wurden die Messstellen verdichtet angesetzt.

Abbildung 128: Messstelleninstrumentalisierung beider Großbrandversuche nach DIN EN 4102-20 in der Holzfassade (links), in der PV-Fassade (mittig) in Anlehnung an Anordnung aus der DIN EN 4102-20 [78] bei WDVS (rechts)



Brandsperrern

Die Brandsperrern wurden gemäß MHolzBauRL geschossweise an der Fassade befestigt. Abhängig von der Fassadenbekleidungstiefe wurden verzinkte Stahlbleche mit 1,5 mm (Versuch 2) bzw. 2,0 mm (Versuch 1) Stärke verbaut.

Konditionierung

Die Holzkrippen wurden nach DIN 4102-20 gefertigt und 83 Tage (Versuch 1) bzw. 17 Tage (Versuch 2) in einer Klimakammer konditioniert. Die Probekörper selbst konnten aufgrund der Abmessungen nicht konditioniert werden.

Umgebungsbedingungen

Die Umgebungstemperatur wurde in beiden Versuchsdurchführungen einen Meter vor dem Versuchsstand auf einer Höhe von einem Meter über dem Prüfraumboden gemessen. Der Versuchsstart erfolgte zwei Minuten nach der Zündung der Holzkrippe ($t = 0$ s). Im Rahmen des ersten Versuchs wurde der Lüfter zu Beginn der dritten Prüfminute aktiviert ($t = 120$ s).

Gemäß den Vorgaben der genormten Holzkrippe nach DIN 4102-20 beträgt die festgesetzte Beflammungsdauer 20 Minuten ab Versuchsbeginn, woraufhin das Glutfeld dieser Holzkrippe nach Ablauf der festgelegten Zeit gelöscht wurde. Nach Ablöschen der Primärflamme wird das Abkühl- und Selbstlöschverhalten der Fassade untersucht. Nach dem Erlöschen des Glutfeldes wurde eine zusätzliche Beobachtungszeit von mindestens 40 Minuten eingehalten. Die Wirkungsweise der Löscharbeiten der Feuerwehr wird beobachtet und festgehalten. Die Prüfung wurde abgeschlossen, sobald weder visuell noch durch Temperaturmessungen Anzeichen von Bränden, Glut oder Schwelbrand, unter Berücksichtigung des definierten Grenzwerts von 50 °C, feststellbar waren.

Versuch 1

Untersuchungsziel

Im ersten Großbrandversuch, welcher in Abbildung 129 dargestellt ist, wird untersucht, inwieweit sich die Photovoltaikfassade zu anderen Fassadenbrandversuchen mit WDVS bzw. geprüften Holzkonstruktionen ebenfalls in Anlehnung an DIN 4102-20 verhält. Die beiden TES-Elemente wurden in Anlehnung an DIN 4102-20 über Eck gebaut.

Die Brandlast der Krippe ist nach DIN EN 4102-20 dimensioniert. Die Flammhöhe der Krippe reicht damit mit dem Plume über die erste Brandsperre.

Fokussiert wird bei diesem Versuch neben dem Brandverhalten der einzelnen Photovoltaikmodule die Brandausbreitung an der Fassade. Da der Versuch mit der hinterlüfteten Fassade durch Brandsperren nach MHolzBauRL aufgebaut wird, wird die Schutzwirkung der Brandsperren sowie die Brandausbreitung über die Fassade beobachtet und über die Messungen ausgewertet. So können Rückschlüsse auf die Schutzwirkung der Brandsperren abhängig ihrer Ausbildung getroffen werden. Für die Ausbildung der Brandsperre wird bei den Photovoltaikmodulen von einer geschlossenen Fassade ausgegangen. Der Abstand der PV-Module zueinander beträgt montagebedingt circa 10 mm.

Prüfkörperaufbau

In Abbildung 129 ist der Aufbau des Prüfkörpers dokumentiert. Die Fassadenbekleidung des langen Schenkels besteht aus elf, die des kurzen Schenkels aus acht einzelnen Photovoltaikmodulen. Die Fläche der langen Fläche weist Abmessungen von 2,65 x 7,20 m (Breite x Höhe) auf. Im langen Schenkel wurde die Brandkammer platziert. Alle PV-Elemente wurden auf mit einer entsprechenden Aluminium-Unterkonstruktion befestigt. Die Abmessungen der kurzen Seite beträgt 1,10 x 7,20 m (Breite x Höhe).

Der Probekörper wurde über ein Baugerüst fixiert. Die Holzfeuchte des Probekörpers betrug zum Prüfzeitpunkt etwa 9,0 M.-% und damit nach Eurocode 5, Tabelle 4.2 im zulässigen Bereich für SC1 der Holzfeuchte. [139] Die nichtbrennbare Bekleidung (Gipsfaserplatten; Dicke 18 mm) wurde flächig auf die Tragkonstruktion in Holztafelbauweise mit Heftklammern KL 114/45 im Abstand von etwa 50 mm montiert. Die Holztafelkonstruktion wurde durchgängig mit einer nichtbrennbaren Bekleidung – hier Gipsfaserplatten der Dicke 18 mm versehen. Die Brandsperren wurden entsprechend MHolzBauRL angebracht.

Abbildung 129: Aufbau und Messtellenplan des Großbrandversuches 1

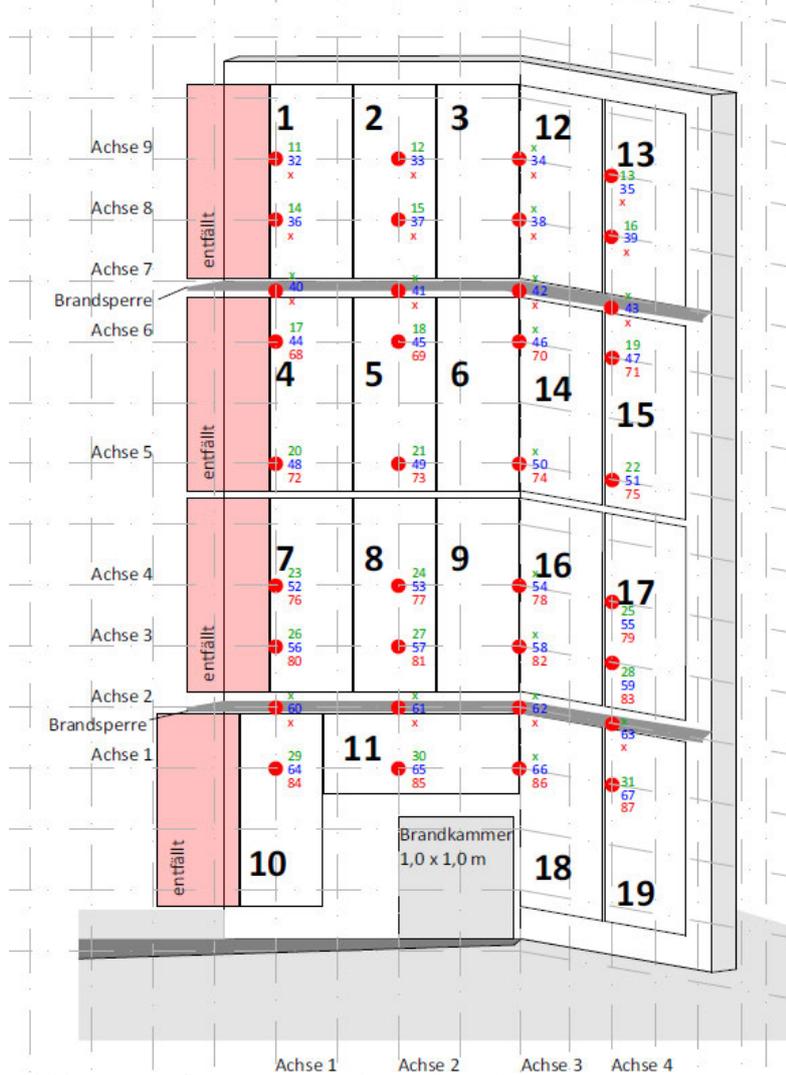


Abbildung 130: Prüfkörper vor Beginn des Brandversuches

1. Holzkrippe in Brandkammer



4. Bemaßung

2. Horizontale Brandsperre



5. Gesamter Probekörper

3. Anordnung der Brandsperren



6. Kurzer Schenkel



Tabelle 32: Material- und Umgebungskennwerte zu Beginn des Versuchs

Bezeichnung	Kennwert
Uhrzeit	14:30 Uhr
Umgebungstemperatur	10,0 °C
Luftdruck	963 hPa
Luftfeuchte	68,9 % r. F.
Feuchte Holzkrippen	6,9 M.-%
Feuchte Holztafelwand	9,0 M.-%
Feuchte Gipsfaserplatte	9,8 M.-%

Versuchsablauf

Der Versuchsablauf des ersten Brandversuches ist in Tabelle 33 chronologisch als Beobachtungsprotokoll festgehalten. Die Umgebungstemperatur während des Versuches lag bei konstanten 9,0 °C. Witterungsbedingte Einflüsse sind vor und während des Versuches nicht aufgetreten.

Tabelle 33: Beobachtungsprotokoll des 1. Brandversuches

Zeit seit Brandversuchsbeginn	Probekörper	Beobachtung
- 2 min		Entzünden der Holzkrippe
0		Beginn der Messung
2 min		Lüfter zugeschaltet

Zeit seit Brandversuchsbeginn	Probekörper	Beobachtung
5 min	Langer Schenkel	Waagrechtes PV-Modul oberhalb der Holzkrippe gesprungen und kleinteilig brennend abgefallen
7 min	Langer Schenkel	Abfall des waagrechten Moduls
15 min	Kurzer Schenkel	Vertikales PV-Modul unterste Reihe rechts neben Brandkammer gesprungen
20 min		Krippe abgelöscht
60 min		Versuch beendet

In Abbildung 131 ist ein Auszug des Brandversuchs von der zweiten bis zur 17. Minute zu sehen. Die detailliertere Ausführung ist im Prüfbericht in Anhang A.6 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 2 zu finden. Es lässt sich erkennen, dass die Brandentstehungsphase hier vergleichbar mit Ergebnissen aus Versuchen nach DIN 4102-20 [78] ablief. Die Primärflamme reicht über die erste Brandsperre. In der Hinterlüftungsebene breiten sich darüber hinaus kein Brand durch die erste wirksame Brandsperre aus. Nach der 17. Minute geschieht im Brandversuch keine weitere Brandausbreitung.

Abbildung 131: Prüfkörper während des Brandversuches (von links nach rechts: Minute 2, 3, 9, 10, 17)

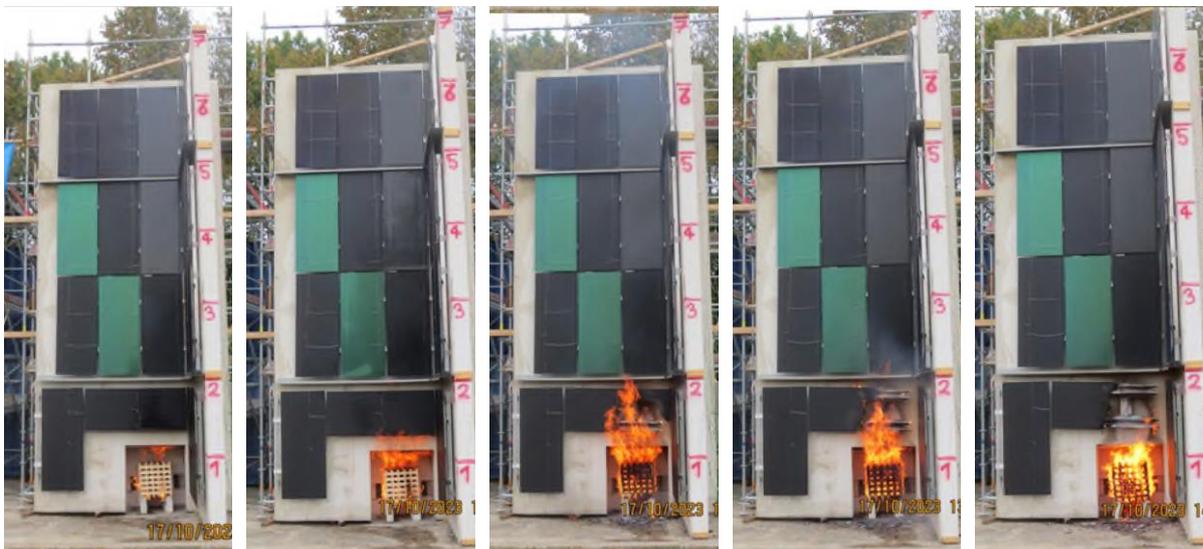


Abbildung 132: Brandeinwirkung auf das PV-Modul in der Stützflamme, Brand in der Zwischenschicht (links) und über die Brandsperre (rechts)



Abbildung 133: Schäden an der Fassade nach Brandversuch, Horizontales Modul (links und Mitte), Modul rechts der Brandkammer (rechts)



Abbildung 134: Herabgefallene Teile und Splitter der PV-Module

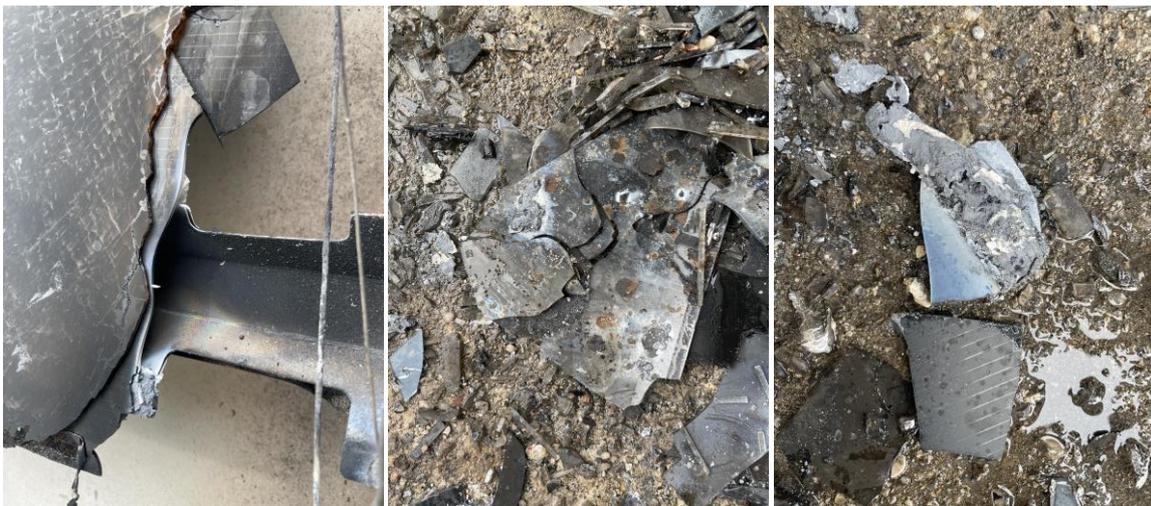
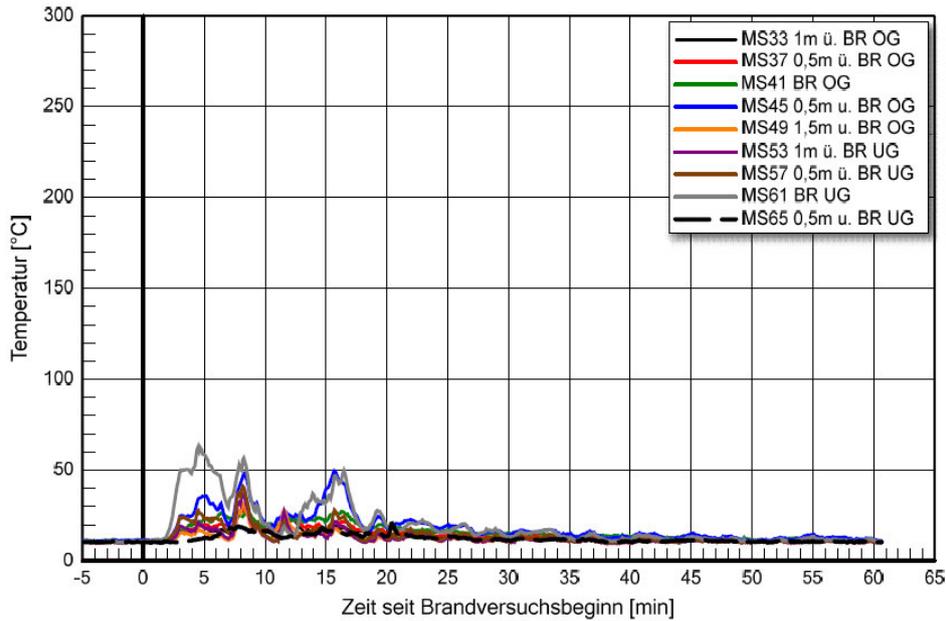
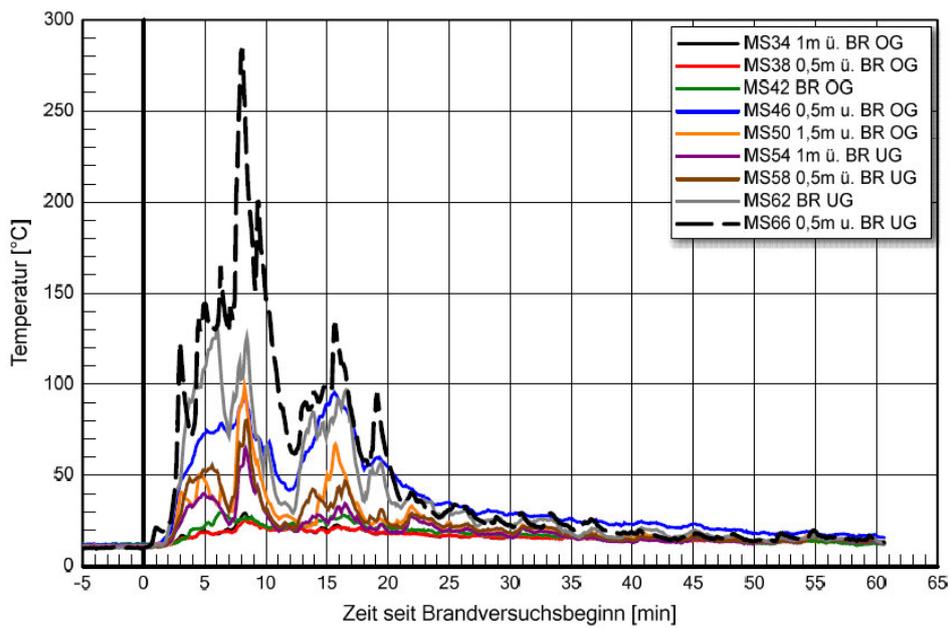


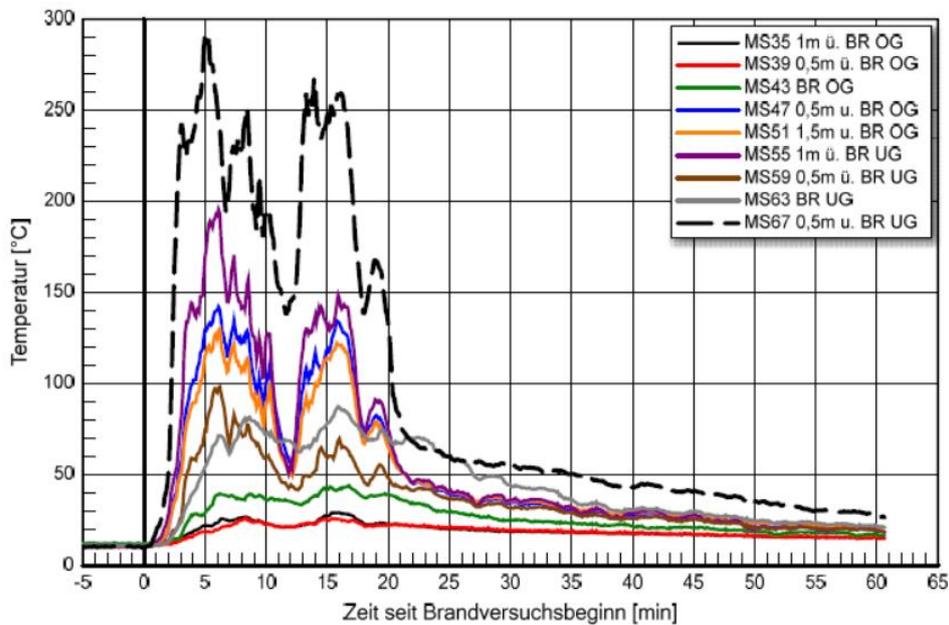
Abbildung 135: Temperaturverläufe im Hinterlüftungsspalt an Achse 1-4



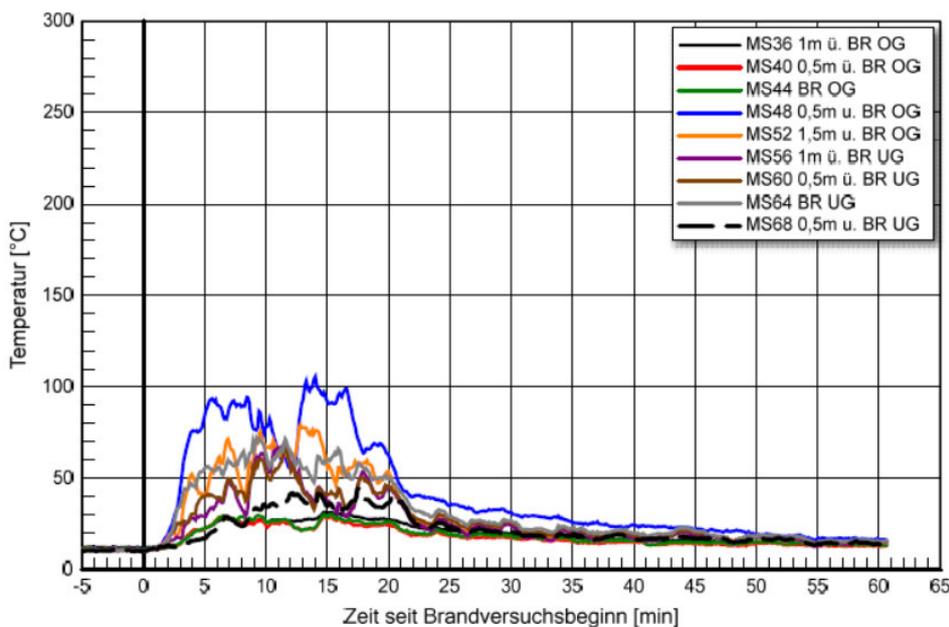
Achse 1



Achse 2



Achse 3



Achse 4

In Abbildung 133 (rechts) ist zu erkennen, dass an den Modulen zunächst die hintere Substratscheibe bricht. An Modul 18 hat sich punktuell die Verbindung gelöst und die Scheibe dahinter ist gerissen. Die Temperatureinwirkung war hier bis zum Ende des Versuchs nicht hoch genug, als dass die Deckscheibe sowie die Verklebung nachgelassen hätten. Das horizontale Modul 11 hingegen, welches direkt über der Brandkammer positioniert ist, zersplittert in der Vollbrandphase im Bereich der Primärflamme und fällt in Teilen ab (Abbildung 132, Tabelle 33). Aus Abbildung 135 kann in den Diagrammen zum Temperaturverlauf abgelesen werden, dass das horizontale Modul zwischen Minute 5 und 7 bei einer Temperatureinwirkung von bis zu 270 °C gesprungen und abgefallen ist. Die Sensoren mit der höchsten Temperatur waren hier Nummer 66 und 67 in der Hinterlüftungsebene. Beide befinden sich noch unterhalb der Brandsperre am horizontalen Modul. Nach dem Abfallen sinkt die Temperatur, welche sich aus der Hinterlüftung ins Freie bewegt. Der

Anstieg danach ist durch das Weiterbrennen der Holzkrippe bis zur 20. Minute zu begründen. Danach sinken mit Verlöschen der Krippe die Temperaturen. Eine weitere Brandausbreitung ist nicht zu beobachten. Generell sind die gemessenen Temperaturen an Achse 3 – vergleiche die Sensoren 47, 51, 55 und 67 – am höchsten. Dies lässt sich durch die Ausbildung der Ecke und damit einhergehender thermodynamischer Effekte erklären. Die weiteren Messungen sind im Anhang A.5 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 1 zu finden.

Abbildung 132 zeigt, dass die Schicht zwischen den Glasscheiben brennbar ist. Fallen die Scheiben als Splitter ab, brennen diese aufgrund der Zwischenschicht am Boden sowie noch an der Fassade mehrere Minuten weiter.

Aufgrund der nicht vorhandenen Brandweiterleitung in der Vollbrandphase ist in der Ablösch- und Beobachtungsphase kein aktiver Einsatz der Feuerwehr notwendig gewesen.

Die in Abbildung 134 gezeigten Glasbruchstücke sind ausschließlich dem horizontalen Modul zuzuordnen. Diese Bruchstücke sind deutlich leichter als 1 kg und haben eine maximale Größe von 10 cm². Die oberen Module weisen, abgesehen von geschmolzenen Kabelummantelungen, im Wesentlichen keine signifikanten Schäden auf.

Interpretation Versuch 1

Der durchgeführte Brandversuch, orientiert an DIN 4102-20, ergab folgende Ergebnisse:

Der erste Brandversuch mit PV-Modulen in Bauart der Klasse B2 - normalentflammbar verlief wie erwartet: Es traten kleinteilige abfallende oder abtropfende Teile auf, es gab weder in der Hinterlüftungsebene noch an der PV-Fassade eine Brandausbreitung, und wirksame Löscharbeiten wären wirksam gewesen bzw. ist ein Selbstverlöschen aufgetreten. Eine Rauchbildung aus Bauteilen der Fassade hat nicht stattgefunden.

Ein Splintern der Module trat zu Beginn der Vollbrandphase auf. Die PV-Module splintern bereits ab einer Temperatur von 250 – 270 °C. Der Kamineffekt wurde durch eine geringfügige Rauchausbreitung in der Hinterlüftungsebene nachgewiesen. Die PV-Module bilden damit eine ausreichend geschlossene Fassade, um einen Sogeffekt zu erzeugen. Daher lässt sich ableiten, dass ein Vergleich mit Versuchen in Hinterlüftungsszenarien, beispielsweise in Verbindung mit Holzfassaden, möglich ist.

Da keine Brandausbreitung über die erste wirksame Brandsperre zu sehen war, kann die Funktion der Brandsperre diesbezüglich nur begrenzt bewertet werden. Ein brennendes Abfallen war nur geringfügig zu erkennen. Die Module oberhalb der Brandsperre wurden nicht direkt beflammt und kaum beschädigt. Die Glasflächen splitterten in kleine Teile, wobei der Bereich herabfallender Teile auf etwa 1,5 m um die Fassade begrenzt war. Ein Einsatz der Feuerwehr und ein Rettungsweg im Bereich der Fassade ist als unkritisch einzustufen. Die Unterkonstruktion war nach Bewertung anhand des ersten Versuchs zur Verankerung der Fassadenbekleidung ausreichend und nach dem Versuch intakt.

Die Art des Versuches mit Blick auf das verhältnismäßig geringe Einwirkungsszenario nach DIN 4102-20 [78] ließ keinen Aufschluss über eine Brandausbreitung und den Einfluss der Normalentflammbarkeit der Module zu.

Versuch 2

Methodik/Untersuchungsziel

Die konzeptuelle Planung des Großbrandversuches 2 ist in Abbildung 136 dargestellt. Hier ist das Ziel, eine bauordnungsrechtlich konform ausgeführte Holzfassade aus brennbaren Baustoffen, entsprechend der MHolzBauRL mit einer Photovoltaikfassade zu vergleichen, welche zusätzlich mit Maßnahmen zur Behinderung der Brandausbreitung in Anlehnung an die MHolzBauRL versehen wird. Analog zum ersten Versuch wird für die Ausbildung der Brandsperre bei den PV-Modulen von einer geschlossenen Fassade ausgegangen.

In diesem Großbrandversuch wird speziell das Verhalten der Module an der Klebepunktbefestigung untersucht. Dies geschieht durch Beobachtung des Abfallens der Schichten in kleinteiliger bzw. großteiliger

Form, des Zeitpunkts des Versagens sowie der Versagensart als Splittern, Reißen, Abplatzen, etc. der jeweiligen Schichten. Da sich im ersten Versuch durch eine geringe Brandlast nur wenig Brandausbreitung ergeben hat, soll im hier folgenden Versuch von einer höheren Brandlast ausgegangen werden.

Prüfkörperaufbau

Der Prüfkörper setzt sich aus zwei greenTES-Elementen jeweils mit einer Photovoltaikfassade sowie einer Holzfassade zusammen. Die Holztafelkonstruktion ist wie bei Brandversuch 1 mit einer 18 mm Gipsfaserplatte beplankt. Auf die nichtbrennbare Bekleidung wurde bei Prüfkörper 1 (PK1) eine normalentflammbare, hinterlüftete Holzkonstruktion, bei Prüfkörper 2 (PK2) eine hinterlüftete Aluminiumunterkonstruktion mit PV-Modulen montiert. Als Fassadenbekleidung ist bei PK1 eine vertikale Nut-Feder-Schalung angebracht, da diese als kritischer Fall für das Brandverhalten betrachtet wird [140]. Die Bauteilfeuchten zu Beginn des Brandversuchs sind dem Anhang A.6 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 2 zu entnehmen. Hier sind keine Auffälligkeiten, welche Auswirkungen auf den Brandversuch haben könnten, festzustellen.

Die Brandlast ist über sechs Holzkrippen dimensioniert, dessen Flammhöhe so ausgelegt wird, dass die erste Brandsperre durch das Plume überschritten wird. Dadurch ist ein Vergleich beider Fassaden anhand deren Brandbeaufschlagung möglich. Die Brandlast steht vor dem Prüfkörper und simuliert so das Szenario eines Sockelbrandes. Dies könnte bei einem realen Brandfall durch die Entzündung einer Brandlast neben einem Gebäude, z.B. einer Hecke, Mülltonnen, etc. ausgelöst werden.

Die Thermoelemente sind in Anlehnung an DIN EN 4102-20 wie in Großversuch 1 positioniert. Es wird die Temperatur oberhalb der horizontalen Brandsperren sowie die Auswirkung auf die einzelnen Bauteile gemessen. DIN EN 4102-20 entsprechend werden die Holzkrippen zwanzig Minuten nach Versuchsbeginn gelöscht. Anschließend können hierdurch Schlüsse auf das Selbstlöschverhalten beider Fassaden gezogen werden.

Abbildung 136: Aufbau des Großbrandversuches 2

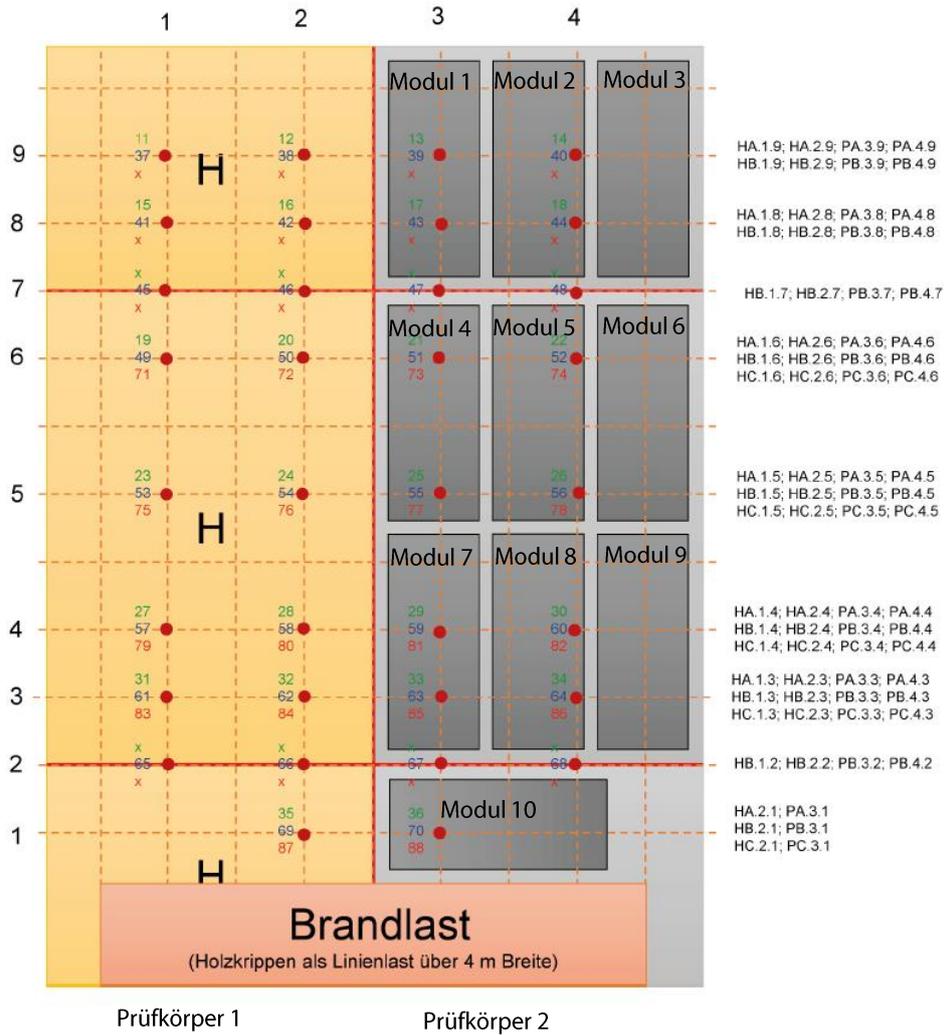


Abbildung 137: Prüfkörper vor Beginn des Brandversuches

1. Gesamter Prüfkörper



2. Horizontale Brandsperre



3. Anordnung der Holzkippen



4. Hinterlüftung Holzfassade



5. Hinterlüftung PV-Fassade



6. Unterkonstruktion PV



Tabelle 34: Material- und Umgebungskennwerte zu Beginn des Versuches

Bezeichnung	Kennwert
Uhrzeit	15:45 Uhr
Umgebungstemperatur	32,1 °C
Luftdruck	965 hPa
Luftfeuchte	41,0% r. F.
Feuchte Holzkippen	10,3 M.-%

Bezeichnung	Kennwert
Feuchte Holztafelwand	10,2 M.-%
Feuchte Gipsfaserplatte	10,3 M.-%

Versuchsablauf

Der Versuchsablauf des zweiten Brandversuches ist in Tabelle 35 chronologisch als Beobachtungsprotokoll festgehalten. Die Umgebungstemperatur während des Versuches lag bei konstanten 32,0 °C. Der Versuch lief ab Beginn des Entzündens der Krippen 70 min. lang. Danach wurden beide Fassaden für rund fünf Minuten gelöscht. Hier erwies sich laut der Einsatzkräfte der TUM Werkfeuerwehr (siehe Strategischer Prüfbericht im Anhang A.7 Einsatztaktische Stellungnahme der TUM Werkfeuerwehr) die Löscharbeit der PV-Fassade als nicht außergewöhnlich. Durch die Geschlossenheit der PV-Fassade konnte der Löschrstrahl jedoch erschwert in die Hinterlüftungsebene eindringen. Die Holzfassade wurde, soweit erforderlich, unter Anwendung eines Einreißhakens der Feuerwehr geöffnet, um Zugang zur Hinterlüftungsebene zu erhalten und den Brand zu kontrollieren.

Tabelle 35: Beobachtungsprotokoll des 2. Brandversuches

Zeit seit Brandversuchsbeginn	Probekörper	Beobachtung
0 min		Entzündung der Krippen/Beginn der Messung
3:30 – 7:30 min		Ausfall des Messprogramms, keine Daten vorhanden
4 min	PK2	1. PV-Modul abgefallen
6:20 min	PK2	2. PV-Modul abgefallen
9:30 min	PK2	3. PV-Modul abgefallen
20 min		Ablöschen der Holzrippen
23 min	PK1	Brandausbreitung an Holzfassade
53 min	PK1	Brandausbreitung über zweite Brandsperre
Ab 70 min		Ablösch- und Beobachtungsphase

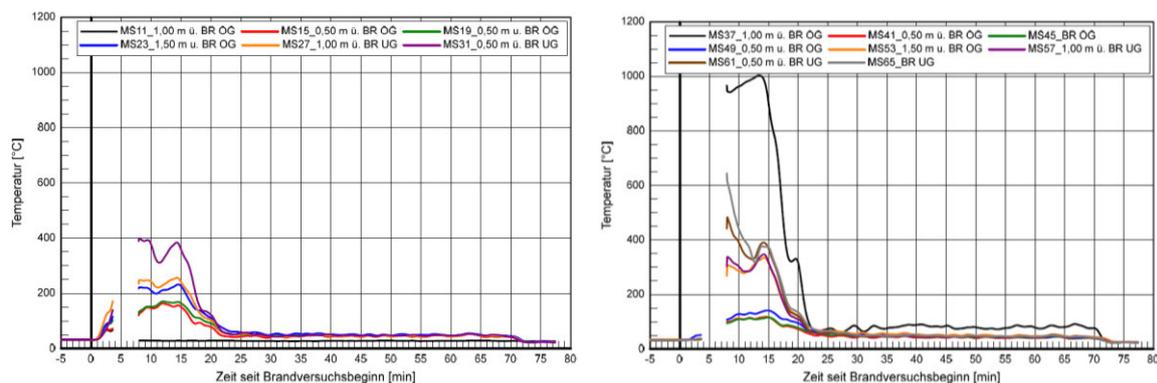
In Abbildung 138 ist ein Auszug der markantesten Ereignisse im Brandversuch von der 2. bis zur 17. Minute zu sehen. Die detailliertere Ausführung ist im Prüfbericht im Anhang A.6 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 2 zu finden. Aufgrund des Ausfalls des Messprogramms sind keine Daten über den Zeitraum von 3:30 – 7:30 min vorhanden. Es lässt sich erkennen, dass die Brandentstehungsphase des Versuchs anders als nach DIN 4102-20 ablief, da die Primärflamme eineinhalb Meter über die erste Brandsperre reichte. Nach der Vollbrandphase sind drei von zehn PV-Modulen abgefallen (Abbildung 138, rechts). Diese lagen im Bereich der Primärflamme: Das horizontale PV-Modul (Nr. 10 in Abbildung 136) unterhalb der ersten Brandsperre ist nach der 4. Minute als ganze Scheibe abgefallen. Am zweiten Modul (Nr. 7 in Abbildung 136) lösten sich nach der 6. Minute beide

Scheiben von den Backrails, welche – im Gegensatz zu den Scheiben – bis nach der Beobachtungsphase an der Unterkonstruktion am Prüfkörper blieben. Das gleiche ereignete sich nach der 9. Minute am nebenliegenden PV-Modul (Nr. 8 in Abbildung 136). Das Abfallen der Module ist in Abbildung 142 zu sehen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Glasscheiben den überwiegenden Teil des Gesamtgewichts der PV-Module ausmachen. Die Module 4 und 9 in Abbildung 136 zeigten das aus dem ersten Brandversuch typische Zersplittern der Deckglasscheibe (siehe Abbildung 146). Hier wiegen die abfallenden Splitter weniger als 1,0 kg. In Abbildung 138 ist rechts der Prüfkörper in Minute 17 zu erkennen. Auf der Seite der PV-Module sind im Bereich der Primärflamme wie oben beschrieben die Module als Ganzes abgefallen. Die Holzfassade zeigt in der Hinterlüftungsebene über beiden horizontalen Brandsperren schwelende Bereiche.

Abbildung 138: Prüfkörper während des Brandversuches (von links nach rechts: Minute 2, 3, 4, 10, 17)



Abbildung 139: Temperaturverläufe in Achse 1 (Holzfassade), Ebene A vor der Fassade (links), Ebene B in der Hinterlüftung (rechts)

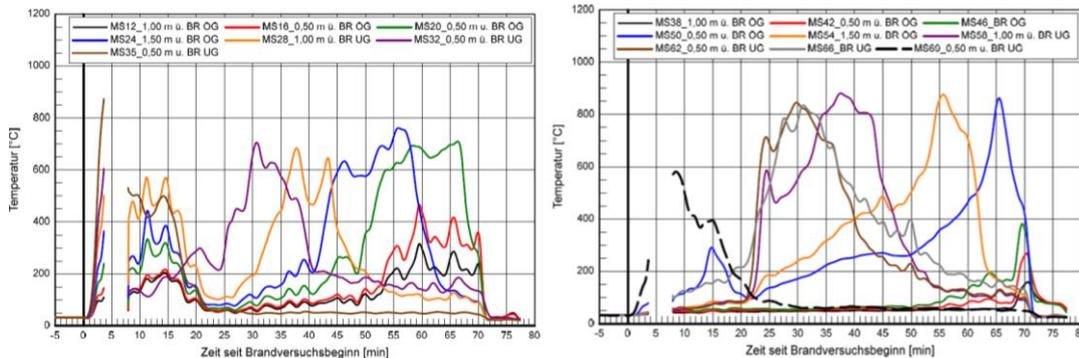


In Abbildung 139 sind die Temperaturverläufe an der vertikalen Achse 1 in Ebene A und B zu sehen. Achse 1 läuft durch die Holzfassade, die Ebenen sind vor der Fassade und in der Hinterlüftungsebene. Hier ist ein typisches Verhalten für eine hinterlüftete Holzfassade zu sehen. Je näher die Sensoren an der unten positionierten Brandlast liegen, desto höhere Temperatureinwirkung erfährt die Fassade an derjenigen Stelle. Aufgrund der Position der Achse am linken Rand der Brandlast, sind vorne an der Fassade geringere Werte aufgetreten: Links der Achse ist keine Brandlast positioniert, weswegen sich die Plumespitze mittig des Aufbaus positioniert. In der Hinterlüftung hingegen traten durch einen einsetzenden Kamineffekt höhere Temperaturen auf.

Dies wird durch Abbildung 140 bestätigt, in welcher die Messwerte in Achse 2 (direkt über der Brandlast) zu sehen sind. Der zunächst hohe Anstieg von Messstelle 32 und 35 ist durch die untere Position am Prüfkörper nahe der Brandlast begründet. Ab Minute 20 sinken alle Temperaturmessungen aufgrund des Ablöschens. Die Messstellen 20 und 24 zeigen einen Temperaturanstieg von 200 °C bei Minute 40 und bei Minute 55 auf knapp 750 °C. Dies ist durch eine Brandausbreitung bis unter die zweite Brandsperre zu erklären. Die Messstellen in der Hinterlüftungsebene Nummer 50 und 54, welche in diesem Bereich rund 50 K heißer sind, verhalten sich parallel dazu. Ab Minute 67 steigen die Ergebnisse der Messstellen oberhalb der zweiten Brandsperre um bis zu

220 K. Der Brandüberschlag hierzu ist in Abbildung 144 (drittes Bild) zu sehen. Durch die klare Gliederung der Temperaturanstiege je Bereich zwischen den horizontalen Brandsperren, kann eine Wirksamkeit dieser bestätigt werden.

Abbildung 140: Temperaturverläufe in Achse 2 (Holzfassade), Ebene A vor der Fassade (links), Ebene B in der Hinterlüftung (rechts)



In Abbildung 141 ist der Temperaturverlauf über die vertikale Achse 3 für die Ebene A vor der Photovoltaik und in Ebene B in der Hinterlüftung dargestellt. Zu Beginn der Messungen steigen die Temperaturen durch die Brandlast bis zur 10. Minute auf bis zu 920 °C. Vor der Photovoltaik verlaufen Kurven parallel. Die Abstufungen der Werte sind der vertikalen Anordnung der Messstellen zuzuordnen: Je höher die Messstelle, desto geringere Temperaturen. Ein Abfall ab der 20. Minute ist wieder durch das Ablöschen zu begründen. Im Bereich der Datenlücke ist Modul 7 in Minute 4:30 gebrochen und in Minute 6:20 abgefallen. Durch das Abfallen der Scheibe ist an Messstelle 70 in Minute 8 bei Wiederaufnahme der Messung ein deutlicher Temperaturfall von mindestens 230 K festzuhalten. In Abbildung 142 (Mitte) ist der Moment festgehalten, zu welchem der Kleber nachlässt und die Scheiben im Ganzen abrutschen.

Alle nachfolgenden Anstiege sind durch eine Wechselwirkung der Fassaden zu begründen. In Abhängigkeit zu Achse 2 steigen die Temperaturen an Achse 3 vor der Fassade, obwohl hier ab Minute 20 kein Primär- oder Sekundärbrand zu erkennen war (Abbildung 138, ganz rechts). Dies ist durch einen Windeinfall zu begründen. Vor der Fassade stehen die Temperaturmessungen in inverser Korrelation zueinander, in der Hinterlüftungsebene steigen ebenfalls durch Windeinflüsse die Messergebnisse von Messstelle 51 und 55 beeinflusst vom Sekundärbrand an der Holzfassade (vgl. Messstelle 50 und 54 in Abbildung 140).

Abbildung 141: Temperaturverläufe in Achse 3 (Photovoltaikfassade), Ebene A vor der Fassade (links), Ebene B in der Hinterlüftung (rechts)

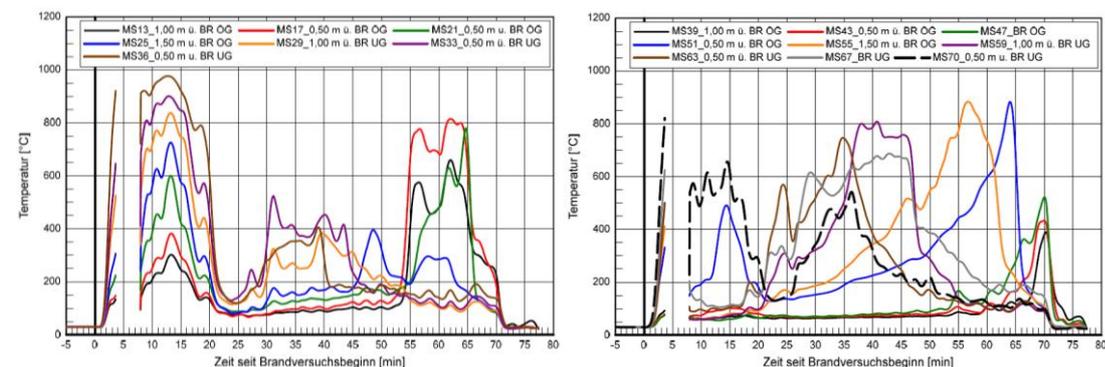


Abbildung 142: Abfallen der Module Modul 10 (links), Modul 7 (Mitte), Modul 8 (rechts)



Abbildung 143: Temperaturverläufe in Achse 4 (Photovoltaikfassade), Ebene A vor der Fassade (links), Ebene B in der Hinterlüftung (rechts)

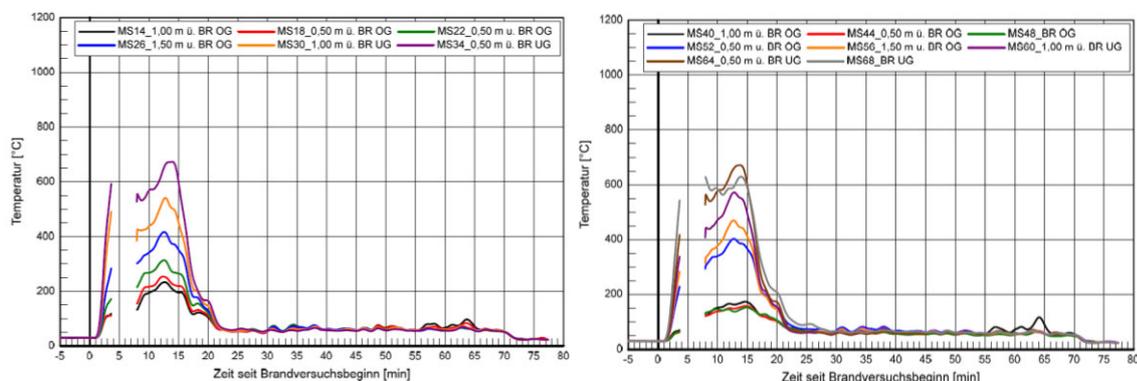


Abbildung 143 zeigt für die untersuchten PV-Module einen typischen, aus den Erkenntnissen des ersten Versuchs erwarteten, Kurvenverlauf. Nach Beginn des Brandversuches steigen die Temperaturmessungen vor allem an den Messstellen 52, 56, 60, 64 und 68 an. Auch hier ergibt sich die maximale Temperatur aus der Anordnung der Messstellen in der Höhe über der Brandlast.

Ab der 11. Minute steigen die Temperaturen an den Messstellen 30 und 34 sowie 60 und 64: Diese befinden sich vor und hinter dem PV-Modul 8. Das Brennen des Modul 8 und 9 ab Minute 6 und das Abfallen von Modul 8 in Minute 9:30 (vgl. Abbildung 142, rechts) ist durch den Ausfall der Messungen in diesem Bereich in den Diagrammen kaum zu erkennen. Die leicht steigenden Temperaturen nach Abfallen des Moduls 8 sind dadurch zu begründen, dass danach Temperatureinwirkungen aus dem Bereich um Achse 3 ohne Abschirmung an die Konstruktion, dementsprechend die Sensoren gelangen.

Nach Minute 15 sinken die Temperaturen, sobald weniger Brandlast durch die Krippen vorhanden ist. Die PV-Module selbst zeigen keine Brandausbreitung. Ab dem Ablöschen der Krippen bleiben die Verläufe konstant niedrig.

Abbildung 144: Brandeinwirkung auf das PV-Modul in der Primärflamme



Abbildung 144 zeigt, dass in der Hinterlüftungsebene auf der PV-Seite nach Abfallen der Module keine Brandweiterleitung stattfindet. Während sich der Brand über die Holzfassade ab Minute 67 bis über die zweite Brandsperre ausbreitet, bleibt bei der PV-Fassade der Brandbereich auf die Bereiche zwischen den Brandsperren begrenzt. Eine Wirksamkeit der Brandsperren kann hierdurch bestätigt werden. Durch die brennbare Zwischenschicht der Module ist nach dem Abplatzen der hinteren Substratschicht eine Brandausbreitung zu beobachten. Eine begrenzte Brandweiterleitung nach Platzen der Module ist hier zu identifizieren (vgl. Abbildung 142). Es ist festzustellen, dass Rauchentwicklung bei der Holzfassade, im Gegensatz zur PV-Fassade, auftritt (Abbildung 144).

Bei der Photovoltaikanlage ist nach der 24. Minute ein Selbstlöschverhalten erkennbar.

Die Abbildung 145 bis Abbildung 147 zeigen die Prüfkörper in der Beobachtungsphase nach der Löschphase. Hier zeigt sich, dass die Löscharbeiten wirksam waren, jedoch wie bereits oben beschrieben laut Feuerwehr in der Hinterlüftungsebene der PV-Fassade erschwert waren. Es wurde zusätzlich seitlich hinter die PV-Module gelöscht, was in einem realen Brandszenario bei einer bauwerksintegrierten PV-Fassade mit Abschluss der Bauteilseiten nicht möglich wäre:

„Die Löscharbeit in der hinterlüfteten Ebene erwies sich aufgrund der stumpf gestoßenen Verbindungen der PV-Module als komplex, da der Löschwasserstrahl zwar die Module, nicht jedoch die dahinterliegende Konstruktion erreichte. Eine seitliche Zuführung von Löschmitteln war jedoch möglich.“ Dr.-Ing. Claudius Hammann, Werksfeuerwehr TU München (vgl. Strategischer Prüfbericht im Anhang A.7 Einsatztaktische Stellungnahme der TUM Werkfeuerwehr).

Das Bruchverhalten der PV-Module variiert in Abhängigkeit von der Temperaturbelastung: Außerhalb der Primärflamme zerbrechen die Scheiben in kleinere Teile. Sobald der Klebepunkt zwischen den Stahlprofilen und den Glasscheiben direkter Brandbeanspruchung ausgesetzt ist, fallen die Scheiben als Ganzes ab. Je nach Rangierfläche der Feuerwehr muss aufgrund der Größe und des Gewichts ein Sicherheitsabstand gewährleistet sein. Rettungswege sollten ebenfalls nicht im Bereich unterhalb der Fassade verlaufen. Nach dem Löschvorgang ist keine Brandweiterleitung bis zum Ende der Beobachtungsphase erkennbar.

In Abbildung 147 sind die am Boden liegenden Module mit den Klebestreifen sowie abgefallene Backrails des horizontalen Moduls zu erkennen.

Abbildung 145: Prüfkörper vor dem Ablöschen in Minute 19 (links) und nach dem Ablöschen in der Beobachtungsphase (rechts)



Abbildung 146: Schäden an der PV-Fassade nach dem Brandversuch



Abbildung 147: Bereich um den Prüfkörper nach dem Brandversuch



Brandschutztechnische Bewertung

Nach Durchführung der Brandversuche kann folgendes Fazit gezogen werden:

Der Durchwärmungsversuch sowie die Großbrandversuche konnten bestätigen, dass der Aufbau der Holztafelbauwand durch die verwendete Beplankung (18 mm Gipswerkstoffplatte) als unkritisch einzustufen ist.

Die Versuchsdurchführung in Großbrandversuch 1 konnte nicht ausreichend Ergebnisse für das Verhalten der PV-Fassade zeigen. Dadurch, dass keine direkte Brandweiterleitung zwischen den Modulen oder über die nichtbrennbaren Baustoffe der Hinterlüftung vorlag, ist die Brandlast nach DIN 4102-20 zu gering angesetzt, um erweitert die Schutzziele über die Anforderungen nach Norm hinaus zu prüfen. Das Brandverhalten ist nicht vergleichbar mit dem Brandfall bei EPS-Wärmedämmverbundsystemen. Denn dort ist – im Gegensatz zu PV-Fassaden – von keiner Splitterbildung auszugehen. Ein Schwelbrand wie bei WDVS-Systemen oder Holzkonstruktionen tritt bei Photovoltaikfassaden nicht auf. In der Beobachtungsphase konnten bezüglich der Photovoltaikfassaden kein negatives Verhalten festgestellt werden.

Großbrandversuch 2 zeigte, dass bei einer höheren als nach Norm vorgegebenen Primärflamme nicht nur die Module selbst brannten, sondern auch durch die Hinterlüftung ein Kamineffekt auftrat. Durch die vorgesehenen horizontalen Brandsperren in Versuch 2 wurde bei beiden Prüfkörpern eine Brandweiterleitung gehemmt. Wirksame Löscharbeiten waren bei beiden Fassaden möglich. Die Holzfassade war durch ein typisches Brandverhalten besser einschätzbar als die PV-Fassade, wo ein Löschen in der Hinterlüftung erschwert war. Brennbar Materialien sind in der Hinterlüftungsebene daher zu vermeiden. Das Löschen der Holzfassade war aufgrund der Brandausbreitung in der Hinterlüftungsebene langwieriger; eine Brandausbreitung der PV war nicht gegeben. Das Abfallen der PV-Scheiben bei höheren Temperatureinwirkungen kann als potenzielle Gefahr für die Feuerwehr im Löscheinsatz, aber auch für Personen bei Selbstrettung angesehen werden. Rettungswege sollten aufgrund dessen nicht entlang der Fassade verlaufen. Bei geringeren Brandlasten ist durch das kleinteilige Absplittern eine geringere Gefährdung für Personen gegeben.

Als Schutzziel für die Fassade ist für Standardgebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 definiert, dass Außenwandbekleidungen schwerentflammbar sein müssen und nicht brennend abfallen dürfen. Um PV-Module als Außenwandbekleidung im Einzelfall zu untersuchen, können Brandversuche für Photovoltaikfassaden umgesetzt werden. Es ist mit den oben beschriebenen Versuchsergebnissen absehbar, dass die Vorkehrungen aus der M-Holz-Bau-RL teilweise für hinterlüftete Photovoltaikfassaden anwendbar sind. Versuch 2 hat gegenüber Versuch 1 gezeigt, dass mit der Veränderung dieser beiden Faktoren und damit der Abweichung der Normbrandlast ein deutlich größeres Gefahrenpotential einhergeht. Die Möglichkeit eines Sockelbrandes mit dem Ausmaß der hier geprüften Brandlast ist für heutige Brandgeschehnisse, als realistisch zu betrachten. Weitere Untersuchungen sind hierzu notwendig.

Bei Holzfassaden liegt eine durch Erfahrungswerte der Feuerwehr gegebene Abschätzbarkeit des Brandverhaltens vor. Sekundärbrände konnten, wie in Versuch 2 gesehen, von der Feuerwehr gut eingeschätzt und mittels standardmäßiger Ausrüstung gelöscht werden. Die PV-Fassade weist zwar deutlich weniger Brandausbreitung auf, konnte aber in Versuch 2 aufgrund von großflächigen, herabfallenden Bauteilen und einer schlechteren Löscharbeit hinter der Fassade zeigen, dass auch hier Hürden vorliegen, welche durch zusätzliche Maßnahmen zu lösen sind. Die einsatztechnische Stellungnahme der Werkfeuerwehr der TU München zu den durchgeführten Großbrandversuchen ist im Anhang A.7 Einsatztaktische Stellungnahme der TUM Werkfeuerwehr zu finden. Zusammenfassend kann hier gesagt werden, dass die im Einsatz verwendeten Feuerwehrgeräte dem technischen Standard entsprachen, wobei ein normgerechtes Löschfahrzeug mit entsprechender Ausstattung genutzt wurde. Die Herausforderungen bei der Brandbekämpfung in der hinterlüfteten Ebene, bedingt durch stumpf gestoßene Verbindungen der PV-Module, wurden identifiziert. Die Schwierigkeit besteht darin, dass der Löschwasserstrahl zwar die Module, jedoch nicht die dahinterliegende Konstruktion erreichte. Nichtbrennbare Baustoffe sind für den Hinterlüftungsspalt zu

empfehlen. Ein Ausdämmen ist zum Entgegenwirken des Kamineffekts vorteilhaft. Die Beobachtungen der Einsatzkräfte legten nahe, dass die Rauchentwicklung mit typischen Bränden vergleichbar war.

Die Bestimmung eines sicheren Abstands ist abhängig von der jeweiligen Gebäudehöhe. Für die Installation der PV-Anlage sind die Mindestanforderungen an den DC-Bereich einer PV-Anlage im Falle einer Brandbekämpfung oder technische Hilfeleistung nach VDE-AR-2100-712 zu beachten. Bei der Brandbekämpfung liegt bei aktivem Zustand der PV-Module eine konstante Spannung am Generator vor, bei welchem für die Feuerwehr Sicherheitsvorkehrungen beim Löschen von elektrischen Anlagen nach VDE 0132 gelten. Sicherheitsabstände von ein bis fünf Meter müssen je nach Löschrohr eingehalten werden können. [77]

Herabfallende Teile sind je nach möglichem Sicherheitsbereich als Gefahr einzuordnen, jedoch aufgrund der Sicherheitsabstände der Feuerwehr in der Regel bereits eingehalten. Fluchtwege bei Selbstrettung verlaufen typischerweise nicht unterhalb der Fassade, müssen aber hierbei berücksichtigt werden. Durch geringe Brandausbreitung der PV-Module ist das Brandverhalten als unkritisch zu bewerten, kann nach den Ergebnissen des zweiten Versuchs durch den Aufbau nach MHolzBauRL unterstützt werden.

Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Fassadenbekleidungen – ein Szenario, dass bei der Sanierung mit greenTES-Elementen wahrscheinlich ist – sind möglich. Durch vertikale und horizontale Begrenzungen nach den obigen Ergebnissen können diese eingedämmt werden.

Ausblick Brandschutz

Weitere brandschutztechnische Untersuchungen zu PV-Fassaden auf Basis der obengenannten Ergebnisse werden zu neuen Erkenntnissen führen, um eine Vereinfachung von Genehmigungs- und Zulassungsverfahren bauwerksintegrierter PV zu ermöglichen. Eine Veränderung der Parameter, wie die Variation der Tiefe und der Materialität des Hinterlüftungsspalt oder zusätzliche Maßnahmen wie Brandsperren, können die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen und neue Anwendungsregeln für den Einsatz von PV an Gebäuden generieren.

Weiterhin wurde bisher auch die Verkabelung, die Kabelführung und dabei notwendige Durchführungen nicht berücksichtigt. Weitere Brandversuche könnten ermitteln, welchen Einfluss der Anschluss - inklusive der Bauteildurchbrüche und notwendiger Schottungen - der PV-Module auf die Fassade hat und ob eine potenzielle Brandweiterleitung durch Maßnahmen wie in der MHolzBauRL unterbunden werden kann.

Neben den untersuchten Dünnschichtmodulen sind weitere Produkte für bauwerksintegrierte Photovoltaik auf dem Markt. Die hier anhand der Brandversuche untersuchten Module sind exemplarisch. Eine größere Bandbreite verschiedener Modulaufbauten sowie der Hinterlüftungsebene kann zu neuen Erkenntnissen führen.

Das aktive Betreiben einer Photovoltaikanlage führt durch die Umwandlung der solaren Einstrahlung in Strom dazu, dass Energie von der Fassade um dem Hinterlüftungsbereich abgeführt wird. Wenn die Photovoltaikanlage lediglich passiv an der Fassade montiert ist, entstehen höhere Temperaturen. Interessant wäre der Vergleich des Einflusses dieser beiden Szenarien in einem Brandfall.

Da unterschiedliche Fassadenbekleidungen Wechselwirkungen zueinander aufweisen, sind hierfür noch weitere Untersuchungen notwendig. Dabei sollten auch Fassaden mit Begrünung berücksichtigt werden. Erste Aussagen zum Brandverhalten begrünter Fassaden liefert das oben genannte Forschungsprojekt *FireSafe Green* [3].

Workflow & Planungsprozesse (Benedikt Glas)

Holzbaugerechter Planungsprozess

Im vorgefertigten Holzbau unterscheiden sich die Planungsabläufe gegenüber einer konventionellen Bauweise deutlich. Die Vorfertigung zeichnet sich vor allem durch die Produktion von Bauelementen in der Werkstatt aus. Entgegen dem konventionellen Bauen vor Ort wird beim vorgefertigten Bauen die Herstellung in die Produktionshalle verlegt. Die Baustelle wird zum Ort der Montage, an dem die Elemente zusammengefügt werden. Daher ist die Prämisse der Vorfertigung und die speziellen Eigenschaften des Baustoffs Holz die wesentlichen Unterschiede zwischen der Planung eines Holzbaus und der eines konventionellen Massivbaus.

Die Vorfertigung ist eine Voraussetzung für Wirtschaftlichkeit und Qualitätssteigerung beim Bauen. Sie erfordert jedoch, früher als beim konventionellen Bauen, eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Bauprozess. Elementierung, Montageablauf und Transportlogistik müssen bedacht werden, denn sie haben Auswirkungen auf die Gestaltung sowie die Konstruktion und Materialauswahl. Änderungen haben mit fortschreitendem Planungsprozess zunehmend Einfluss auf Termine, Qualität und Kosten. Die Vielschichtigkeit des Holztafelbaus, auf dem die Entwicklung des TES-Elements beruht, bewirkt, dass sämtliche Bauteile immer integral mit allen Schichten betrachtet werden müssen: Vor allem Brandschutz und Schallschutz in den Innenbauteilen, aber auch Feuchte- und Wärmeschutz in der Hülle werden fast immer von Rohbau und Ausbau gemeinsam geleistet. Daher müssen auch alle Schichten zusammen konzipiert werden. Das konventionelle, schrittweise und baubegleitende Planen von Rohbau, Fassade und Ausbau funktioniert im Holzbau nicht. Dieser Logik folgend, müssen die im Elementaufbau zu integrierenden Komponenten wie PV- und Begrünungssysteme, ebenfalls früh im Planungsprozess mitgedacht werden.

Für Architekten und Fachplaner ist daher die frühzeitige Auswahl des PV- oder Begrünungssystems von Bedeutung. Im Zuge der Festlegung der Außenwandstärke muss das gewählte System feststehen, da unterschiedliche Komponenten der Befestigung differenzierte Aufbauten bei der Montage in der Bekleidungsebene nach sich ziehen und damit die Stärke des Wandaufbaus verändern können. Spätestens im Zuge der Leistungsphase Entwurfsplanung (LP 3 nach HOAI) müssen die Rahmenbedingungen des PV- und Begrünungssystem feststehen, nicht zuletzt auch wegen eines einheitlichen Fugenbildes in der Fassadenabwicklung. Die Fassadenentwicklung ist ebenfalls Teil der Entwurfsplanung und erfordert Kenntnis über Abmessungen der PV-Module oder der Rinnenlänge bei Begrünungssystemen. Die Abmessungen haben Einfluss auf die Elementteilung und der Lage der Elementstöße im Fassadenbild. Änderungen in der Bekleidungsebene sind zwar leichter möglich als in der Konstruktionsebene, aber nach Festlegung der Fertigungsplanung und der Schnittstellen der Gewerke ist eine Änderung mit großem Aufwand verbunden.

Die Schnittstellendefinition der ausführenden Gewerke ist durch die Trennung von Installation und Konstruktion des Holzbaus festgelegt. Die Strategie wird durch die Entwicklung des Versorgungselements als Sonderelement definiert. Durch das Sonderelement wird ermöglicht, dass der Holzbau den konstruktiven Hohlraum für die Schachtausbildung schafft. Das Schachtelement kann entweder mit den Installationen durch das ausführende Installationsgewerk im Werk des Holzbauers bestückt werden oder der Holzbauunternehmer legt Leerrohre zur späteren Bestückung in den Schacht vor dem Verschließen ein. In jedem Fall kann das Schachtelement im regulären Prozessablauf mit den anderen Elementen mit produziert werden.

Durch Integration der PV- und Begrünungsmodule in der Ebene der Außenbekleidung, also vor der Abdichtungsebene, ist die Konstruktionsebene vor Auswirkungen von Undichtigkeiten geschützt. Produktionsabläufe zur Vorfertigung des TES-Systems müssen aufgrund des Sonderelements für die Installationen nicht geändert werden. Der Workflow kann beibehalten werden. Sowohl die Bewässerung für die Bepflanzung als auch die Kabel für die Integration von Photovoltaikmodulen können in den Prozessablauf integriert werden.

Workflow der Vorfertigung mit Integration von PV- und Begrünungssystemen

Im Rahmen des greenTES-Forschungsprojekts wurden die Auswirkungen zur Integration von PV-Modulen und Begrünungssystemen auf den Vorfertigungsprozess anhand der Prozessabläufe im Werk der Firma Gump & Maier GmbH, Binswangen untersucht. Die Fertigung der greenTES-Elemente erfolgt gemäß den Standards des Holztafelbaus in einer modernen Fertigungshalle, wie in Abbildung 148 zu sehen.

Abbildung 148 Montagehalle Gump & Maier GmbH (Quelle: www.konstruktiver-holzbau.de)



Im Folgenden wird der Workflow des Fertigungsprozesses sowie die Taktungszeiten und der Produktionsablauf für die Elemente erläutert. Wie bereits im Kapitel **Konstruktive Entwicklung** beschrieben, ist eine Erfassung und Analyse der Substanz des zu sanierenden Gebäudes erforderlich. Dies erfolgt durch Begehungen vor Ort und eine Analyse der vorhandenen Planungsunterlagen. Eine Vermessung des Gebäudes ermöglicht die Übertragung aller relevanten Daten in ein 3D-Modell.

Nach Erfassung aller Daten erfolgt die Planung der Elemente unter Berücksichtigung der Sanierungsziele in enger Abstimmung mit den Bauherren. Dies beinhaltet die Festlegung des angestrebten Gebäudestandards, die Prüfung der bauphysikalischen Eigenschaften, die Lokalisierung der Technikräume für die Bewässerungsanschlüsse, die Evaluierung alternativer Bewässerungsmöglichkeiten, die Integration von Photovoltaikmodulen, die Festlegung der zu begrünenden Fassadenflächen, die Auswahl geeigneter Begrünungssysteme und Pflanzen sowie die Planung der Bewässerungsmethoden.

Die Planung der greenTES-Elemente erfolgt mithilfe von CAD-Software, wobei das bereits erstellte 3D-Modell des Gebäudes berücksichtigt wird. Dabei werden auch Öffnungen wie Türen und Fenster in die Planung integriert, um eine präzise und maßgeschneiderte Fertigung zu gewährleisten.

Workflow Vorfertigung

Im ersten Schritt der Vorfertigung erfolgt der Abbund des Ständerwerks, der Rähm, Schwelle sowie der Riegel für Fenster und Öffnungen mittels einer vollautomatischen Abbundanlage. Für diese Bestandteile wird in der Regel Konstruktionsvollholz verwendet. Durch moderne Abbundanlagen ist es weiter möglich Bohrungen für das spätere Eindrehen von Verbindungsmitteln bereits in diesem Schritt vorzunehmen bzw. vorzubohren. Dies ermöglicht eine Präzise und kostengünstige Vorfertigung der Bestandteile, welche in den weiteren Schritten nun noch zusammengefügt werden müssen. In diesem Schritt muss bereits auf die entsprechende Anordnung der Begrünungssysteme eingegangen werden und Ständer innerhalb der Konstruktion dementsprechend angeordnet und vorgesehen werden. Im Falle der Verwendung von trogebundenen Begrünungssystemen ist dies besonders relevant. Durch den Abstand der trogebundenen Begrünungssysteme, sprich als vorgehängtes Element an der Fassade und die damit einhergehende Hebelwirkung des Systems, ist eine

Befestigung der Tragkonsolen auf den in der Tragkonstruktion vorgesehenen Ständern notwendig, um ein späteres Nachgeben zu vermeiden.

Im zweiten Schritt werden alle vorgefertigten Bestandteile aus Schritt 1 auf einen Montagetisch gelegt und miteinander verbunden. Das Rastermaß für die Abstände der Ständer innerhalb der Konstruktion beträgt hierbei 62,50 cm, was als übliches Rastermaß im Holztafelbau Verwendung findet. Die Auswahl der Verbindungsmittel kann hier variieren. Verbindungen mit Winkelverbindern sind genauso möglich wie Verbindungen mit Schrauben. Weiter können auch zimmermannsmäßige Verbindungen hergestellt und verwendet werden. Meist werden Verbindungen im Holztafelbau jedoch stumpf gestoßen. Alternative Verbindungen wie Schwalbenschwanzverbindungen sind jedoch durch moderne Fertigungsverfahren und Frästechniken ebenfalls kostengünstig und einfach herzustellen.

Als dritter Schritt erfolgt die einseitige Beplankung der bereits verschraubten Tragkonstruktion. Je nach Anforderung an die Beplankung sowie Auswahl des Materials, erfolgt die Verbindung von Beplankung sowie Ständerwerk mittels Druckluftnagelgeräten. Dies ermöglicht eine schnelle und dauerhafte Verbindung mittels Klammern oder Nägeln. Stellen an denen Klammern oder Nägel eingebracht werden sollen, werden bei modernen Fertigungsanlagen mittels Laser dargestellt um die ausreichend Verbindungsmittel einzubringen, Fehler zu vermeiden sowie vorher bemessene Abstände zwischen den Verbindungsmitteln einzuhalten.

Der vierte Schritt unterscheidet sich im Montageablauf je nach Materialauswahl der Dämmstoffe. Im Zuge des Forschungsprojekts wurde der dargestellte Ablauf adaptiert und auf die Anforderung durch die Implementierung von PV- und Begrünungssystemen angepasst.

Für die weitere Entwicklung wurde als Basis für die Dämmebene Zellulosedämmung zu verwendet, welche unter Druck zwischen die Ständer der Holztafelbaukonstruktion eingeblasen wird. Somit erfolgt im vierten Schritt der Herstellung der Elemente die zweite Beplankung. Um diese aufzubringen, wird die Konstruktion, welche bis zu diesem Schritt einseitig beplankt, ist mittels Schmetterlingswender oder Kran versetzt und auf die bereits beplankte Seite gelegt. Im darauffolgenden Schritt wird die Beplankung auf der gegenüberliegenden Seite angebracht und ebenfalls mittels Nägel oder klammern fixiert. Innerhalb der Beplankung sind entweder bereits runde Aussparungen für das Einblasen der Zellulosedämmung vorgesehen, oder werden nach Befestigung der Beplankung ausgeschnitten. Die hierfür notwendigen Öffnungen zum Einblasen des Dämmstoffs müssen hierfür einen Durchmesser zwischen 100 mm und 200 mm aufweisen. Im darauffolgenden Schritt wird mittels Einblasschlauch oder Einblaslanze der Zellulosedämmstoff in die Gefache eingeblasen. Um die Zellulosefasern innerhalb der Konstruktion ausreichen zu verdichten, geschieht das Einblasen unter hohem Druck. Die Gipsfaserplatten, welche auch im greenTES-Forschungsprojekt für die zweite Beplankung verwendet wurden, müssen hierbei durch eine Behelfskonstruktion gesichert werden, um ein Brechen der Platten zu vermeiden. Sobald alle Gefache durch das Einblasen der Zellulosefaser gefüllt sind, werden die für das Einblasen notwendige Öffnungen verschlossen und abgedichtet, um Kondensatbildung oder ein Eindringen von Wasser in die Dämmebene zu verhindern.

Im darauffolgenden fünften Schritt wird die außenseitige Beplankung die Abdichtungsebene mit einer Windbremse versehen, um das Eindringen von Feuchtigkeit in die Konstruktion, wie es beispielsweise durch Schlagregen geschehen kann, zu vermeiden. Durch das Aufbringen einer Windbremse ist es weiterhin möglich, Wasser, welches sich in den Bauteilen ansammeln kann, mittels Diffusion an die Außenluft abzugeben.

Da für das greenTES-Forschungsprojekt verschiedene Fassadentypen getestet wurden, gibt es je nach verwendeter Konstruktion unterschiedliche Arbeitsschritte. Jedoch eint die meisten der Konstruktionen, dass im darauffolgenden sechsten Arbeitsschritt eine Horizontallattung zur Hinterlüftung der Fassade angebracht wird. Lediglich beim Seil- und troggebundenen Fassadensysteme erfolgt vor der Verschraubung der Horizontallattung noch die Montage der Stahlkonsolen, in welche später die Tröge eingehängt werden. An den Fassadenmodulen mit Photovoltaik erfolgt anstatt der Montage einer Horizontallattung aus Holz die Montage der Modultragprofile aus Aluminium, um im späteren Montageablauf die Photovoltaikmodule

einzuhängen und zu fixieren. Bei der abschließenden Montage der Photovoltaikmodule kann projektspezifisch entschieden werden, ob die Module bauseits montiert werden, oder ob eine Montage ab Werk erfolgen soll.

Vorgefertigte Elemente mit Seil- und Trogsystem werden nach Montage der tragenden Stahlkonsolen mit einer Horizontallattung versehen, um im Anschluss die Fassadenverkleidung aufzubringen. Ob nun die Tröge bereits ab Werk in die dafür vorgesehenen Stahlkonsolen eingehängt werden, kann für jedes Projekt individuell entschieden werden. Faktoren, die dies beeinflussen können, sind Anfahrtswege zur Baustelle sowie die Größe der gewählten Tröge.

Für die Rinnensysteme ist keine Fassadenbekleidung notwendig, da die Systeme selbst die Fassade vollflächig mit Blech bekleiden. Es erfolgt die Montage der Rinnen auf die im fünften Arbeitsschritt vorgefertigten Horizontallattungen, womit die Vorfertigung der Gesamtkonstruktion abgeschlossen ist.

Workflow Montage

Vor Beginn der Montage der vorgefertigten Module sind bauseits zunächst Vorbereitungen zu treffen, um eine präzise und sichere Befestigung der Module an der ausgewählten Fassade zu gewährleisten.

In den frühen Planungsphasen einer Sanierung ist zunächst zu entscheiden, wie die vorgefertigten Holztafelbauelemente im Sockelbereich angebracht werden sollen. Es existieren verschiedene Varianten:

- 1. Variante: Vor der Montage der greenTES-Fassadenmodule wird der Sockelbereich um die Dicke des Moduls durch ein Betonfundament erweitert. Anschließend können die gelieferten Elemente auf dieser erweiterten Fläche platziert werden.
- 2. Variante: Vor dem Start der Montage der greenTES-Fassadenelemente erfolgt die Anbringung einer Stahlkonsole an die bestehende Gebäudewand. Diese wird mit geeigneten Scherlastankern so befestigt, dass eine Übertragung der Lasten in die Bestandswand ermöglicht wird.

In den darauffolgenden Schritten wird geschossweise eine Bauchbinde an der Bestandswand installiert, um Horizontallasten durch Windsog und Winddruck aufnehmen zu können und ein Versagen der Konstruktion zu verhindern. Es folgt die Anbringung einer Ausgleichsschicht aus Mineralwolle, um auf Unebenheiten an der Fassade reagieren zu können. Nach Abschluss dieser vorbereitenden Schritte kann mit der Anlieferung und Montage der vorgefertigten greenTES-Fassadenelemente begonnen werden.

Im ersten Montageschritt erfolgt die Befestigung der Elemente im Erdgeschoss, sowohl im Sockelbereich als auch am Stoß zwischen Erdgeschoss und erstem Obergeschoss. Die folgenden Schritte wiederholen sich, wobei die darüberliegenden Elemente eingefädelt und verschraubt werden. Für den Anschluss der Begrünungssysteme wird im weiteren Verlauf der Montage das vorgefertigte Schachtelement an der dafür vorgesehenen Stelle eingesetzt.

Nach der Montage aller Elemente am Bestandsgebäude erfolgt im letzten Schritt das Einheben der Trogelemente oder Photovoltaikmodule in die dafür vorgesehenen Konsolen oder Führungsschienen. Trogelemente und Rinnensysteme werden anschließend mit den vorinstallierten Leitungssystemen im Schacht sowie untereinander verbunden, um die Bewässerung bzw. Entwässerung der Systeme sicherzustellen. Auch Photovoltaiksysteme müssen nach der Montage an den Elementen mit den vorgesehenen Leitungen innerhalb des Schachtes verbunden werden.

Für die Montage der greenTES-Elemente ist die Verwendung eines Arbeitsgerüsts oder einer Arbeitsbühne empfehlenswert. Die darüberliegenden Elemente werden schrittweise auf die darunterliegenden Elemente gesetzt und ebenfalls an der Bauchbinde, die sich bereits an der Bestandswand befindet, verschraubt.

In Tabelle 36 werden die Montagezeiten der Vorfertigung sowie Montagezeiten der bauseitigen Montage dargestellt.

Tabelle 36 Montage- und Vorfertigungszeiten; Quelle: Gump & Maier GmbH

Montage- und Vorfertigungszeiten* ¹			
Vorfertigung:	min/m ²	m ² Fläche	min
Abbund Konstruktionsvollholz	6 min/m ²	100 m ²	600 min
Vorfertigung gesamte Holzrahmenbauwand	8 min/m ²	100 m ²	800 min
Montage Fenster im Werk	65 min/m ²	30 m ²	1950 min
Bauseitige Montage:	Arbeitszeit / m ²	m ² Fläche	min
Aufbringen Ausgleichsdämmung auf Bestandswand	5 min/m ²	100 m ²	500 min
Montieren der Bauchbinden an Bestandswand	18 min/m ²	100 m ²	1800 min
Montage greenTES-Elemente	15 min/m ²	100 m ²	1500 min
Montage- und Vorfertigungszeit gesamt	52 min/m²	500 m²	5200 min
* ¹ ohne Arbeitsvorbereitung und Projektleitung			

Übertragbarkeit auf den Neubau

Die Integration der PV- und Begrünungssysteme findet innerhalb Bekleidungsebene im Schichtenaufbau der Holztafelbauelemente, also in der äußeren Schutzschicht außerhalb der Abdichtungsebene statt. In dieser Ebene ist der Aufbau unabhängig vom weiteren Wandaufbau und kann ähnlich der Fassadenbekleidung frei gewählt werden.

Die gewonnen Erkenntnisse aus dem Fassadenaufbau für die Integration von PV- und Begrünungssystemen (vgl. Kapitel **Konstruktive Entwicklung**) können direkt auf den Neubau übertragen werden. Das für die Leitungsführung der Installationen entwickelte Schachtelement dient als Grundlage für die Adaption im Neubau.

Beim Transfer in die Planung von Neubauprojekten sind planungsrechtliche Rahmenbedingungen zu beachten, die im Vergleich zu einer energetischen Sanierung nicht abgedeckt wären [141].

Lebenszyklusanalyse

Im Rahmen einer Masterarbeit an der Technischen Universität München wurde eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt, um die Auswirkungen einer Sanierung mittels greenTES-Elementen auf die Klimaneutralität eines Bestandsgebäudes zu untersuchen. Die greenTES-Elemente, die sowohl Begrünungssysteme als auch Photovoltaiksysteme integrieren, wurden simuliert, um deren potenzielle Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität zu bewerten.

Die Ergebnisse dieser Simulation legen nahe, dass eine alleinige Sanierung mittels greenTES-Elementen nicht ausreicht, um eine vollständige Klimaneutralität des Gebäudes zu erreichen. Es wurde festgestellt, dass im Zuge von Sanierungsmaßnahmen auch eine Umstellung von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energiequellen erforderlich ist, um das angestrebte Ziel einer klimaneutralen Sanierung zu realisieren. Die Integration von Photovoltaiksystemen allein kann lediglich dazu beitragen, den Energiebedarf des Gebäudes zu reduzieren, sofern fossile Energiequellen weiterhin genutzt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei Sanierungsmaßnahmen ist die Auswahl von langlebigen Materialien, die aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Idealerweise sollte bereits bei der ursprünglichen Errichtung des Bestandsgebäudes auf eine nachhaltige Materialauswahl geachtet worden sein, um die CO₂-Emissionen von Anfang an so gering wie möglich zu halten.

Die vorliegende Studie unterstreicht somit die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Ansatzes bei Sanierungsprojekten, der nicht nur bauliche Maßnahmen, sondern auch eine nachhaltige Energieversorgung und Materialauswahl berücksichtigt, um langfristig eine positive Umweltauswirkung zu erzielen. [142]

Zusammenfassung & Diskussion

Das Forschungsprojekt greenTES zeigt, dass Fassadenbegrünung und gebäudeintegrierte Photovoltaik mit einem hohen Vorfertigungsgrad in Holzbaulemente integriert werden können, sofern verschiedene Aspekte hinsichtlich Systemauswahl, Baukonstruktion, Bauphysik und Brandschutz beachtet werden.

Systemauswahl

Im Sinne eines resilienten Gesamtsystems wurde bei der Auswahl der zu integrierenden Begrünungssysteme insbesondere auf wartungsarme Begrünungssysteme mit geringem Wasserverbrauch und geringen CO₂-Emissionen über die gesamte Lebensdauer geachtet. Daher wurde die Kombination der TES Energy Facade mit klassischen Selbstklimmerpflanzen untersucht, ebenso wie konstruktiv einfach gehaltene fassadengebundene Systeme mit Pflanzrinnen und -trögen. Die Pflanzenauswahl beinhaltet Pflanzen mit variierendem, abwechslungsreichem Erscheinungsbild, um eine hohe gestalterische Qualität zu erzeugen.

Auch bei der Definition der zu untersuchenden Photovoltaiksysteme wurde neben dem Energieertrag insbesondere auf einen hohen architektonischen Anspruch geachtet. Somit wurde die konstruktive Integration für kristalline Module mit mechanischer Befestigung sowie für Dünnschichtmodule mit rückseitig geklebten Backrails untersucht. Beide Modulvarianten sind dabei als Glas-Glas-System ausgeführt.

Konstruktion & Mock-Up

Für die gewählten Begrünungs- und Photovoltaiksysteme wurden anschließend basierend auf der TES Energy Facade die Wandaufbauten festgelegt und die relevanten Konstruktionsdetails entwickelt. Die Führung der elektrischen Kabel der Photovoltaikfassaden sowie der Wasserleitungen für die Bewässerung der fassadengebundenen Begrünungssysteme erfolgt dabei anhand eines Schachtsystems als Sonderelement. Leerrohre innerhalb des vertikalen Schachts ermöglichen eine klare Schnittstellendefinition der ausführenden Gewerke, eine einfache Zugänglichkeit im Falle notwendiger Wartungsarbeiten sowie eine unkomplizierte spätere Anpassung der Fassadengestaltung. Das Schachtelement kann entweder mit den Installationen durch das ausführende Installationsgewerk im Werk des Holzbauers bestückt werden oder der Holzbauunternehmer legt Leerrohre zur späteren Bestückung in den Schacht vor dem Verschließen ein. In jedem Fall kann das Schachtelement im regulären Prozessablauf mit den anderen Elementen mit produziert werden. Durch Integration der PV- und Begrünungsmodule in der Ebene der Außenbekleidung, also vor der Abdichtungsebene, ist die Konstruktionsebene vor Auswirkungen von Undichtigkeiten geschützt. Produktionsabläufe zur Vorfertigung des TES-Systems müssen aufgrund des Sonderelements für die Installationen nicht geändert werden. Im Bereich der Elementstöße wird auf etablierte Methoden im Holzbau zurückgegriffen: Vertikal werden die Stöße zwischen einzelnen greenTES-Elementen durch stumpfes Aufeinandersetzen der Elemente realisiert, während sie horizontal durch Verbindung einer geteilten Schwelle zusammengesetzt werden. Ob die Pflanztröge und auch die Photovoltaikmodule bereits im Werk oder vor Ort auf der Baustelle montiert werden, kann dabei projektspezifisch entschieden werden.

Anhand eines zweigeschossigen Mock-Ups mit quadratischem Grundriss konnten alle greenTES-Konstruktionsvarianten anhand eines Mock-Ups erprobt sowie hygrothermische Messungen durchgeführt werden. Gleichzeitig diente die Erstellung des Mock-Ups der Analyse des Workflows und der Planungsprozesse.

Bauphysik

Sowohl Fassadenbegrünung als auch Photovoltaikmodule beeinflussen die Holzkonstruktion hygrothermisch. Diese Einflüsse wurden sowohl messtechnisch am Mock-Up als auch simulationsbasiert untersucht. Die

hygrothermischen Sensoren wurden dafür an den feuchtetechnisch kritischsten Stellen im Mock-Up installiert. Als Referenz dienen Messungen und Simulationen einer Referenzfassade mit einer Holzbekleidung.

Dabei wurde festgestellt, dass die PV-Fassade durch den hohen Wärmeeinfluss höhere Temperaturen und einen erhöhten Austrocknungsgrad an der äußeren Position der Dämmebene aufweist. An der zur Innenwand liegenden Position in der Dämmung sind ebenfalls höhere Temperaturen zu messen, jedoch nur geringfügig. Das Innenraumklima wird durch außenliegende Photovoltaikmodule bei ausreichender Dämmstärke also nicht beeinflusst. Ebenso wie die Referenzfassade können die Photovoltaikfassaden als unkritisch hinsichtlich Schimmelpilzbildung und Tauwasserausfall in der Konstruktion eingestuft werden.

Die begrünten Konstruktionsvarianten zeigen niedrigere Temperaturwerte und gleichzeitig höhere Feuchtwerte als die Referenzfassade. Insbesondere die Selbstklimmer-Fassade ohne Hinterlüftung weist eine höhere Feuchte in der Konstruktion auf. Die Materialfeuchte der Zellulosedämmung ist mit 18,50 M.-% und die relative Feuchte in der Dämmung mit maximal 93,4 % an dieser Konstruktion erhöht. Hier sollten weitere Untersuchungen angestellt werden, um ein Aufweichen der Wand zu vermeiden, da auffällig ist, dass es sich bei den Werten um die Messergebnisse eines Sommerzeitraums handelt und die Feuchtwerte in den Wintermonaten noch höher zu erwarten sind.

Insgesamt ist kritisch anzumerken, dass weiterführende messtechnische Untersuchungen bei den begrünten Fassadenvarianten über einen längeren Zeitraum von mindestens einem Jahr inklusive einer beheizten Winterperiode notwendig sind, um eine Bewertung des winterlichen Wärmeschutzes vornehmen zu können und die tatsächliche Resilienz der Konstruktionsvarianten gegenüber Feuchteintrag bestimmen zu können. Aus der hohen Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen in einem Winterszenario und dem daraus resultierenden Feuchtetransport nach außen kann es zu Kondensation und Tauwasserausbildung in der Konstruktion kommen. Dieser zusätzliche Feuchteintrag sollte über weitere Messergebnisse am Versuchsstand ermittelt und anhand der Grenzwerte überprüft werden. Idealerweise sollte der Innenraum in einer weiteren Ausbaustufe auch gekühlt werden können, um nicht nur Mindest-, sondern auch Höchsttemperaturen vorgeben zu können. Mithilfe dieser Messdaten können auch die Simulationsmodelle abschließend validiert werden und hygrothermische Simulationen für verschiedenen Anwendungsszenarien durchgeführt werden.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen PV und Begrünung ist außerdem, dass PV-Fassaden reproduzierbar hergestellt werden können, während die Begrünung aufgrund der Wachstumsphasen keine vollständige Bedeckung des Wandaufbaus zu allen Zeiten garantieren kann. Daher sollten begrünte bzw. zu begrünende Fassaden immer sowohl mit als auch ohne grüne Bedeckung untersucht werden, um die Funktionsfähigkeit auch bei Ausfall der Begrünung oder noch nicht vollständiger Bedeckung beurteilen zu können. Hierfür ist auch eine weiterführende Erforschung einer feuchtetechnisch sinnvollen Außenbeplankung notwendig.

Brandschutz

Die durchgeführten Brandversuche zeigen, dass bei den greenTES-Fassaden durch Ausbilden einer nahezu geschlossenen Hinterlüftungsebene mit PV-Modulen ein Kamineffekt auftritt. Durch horizontale Brandsperren wird eine Brandweiterleitung gehemmt. Eine Herausforderung bei dem Brand einer greenTES-Fassade mit Photovoltaik ist, dass ein Löschen in der Hinterlüftung erschwert ist und das Abfallen der PV-Scheiben bei höheren als nach Norm vorgegebenen Temperatureinwirkungen als potenzielle Gefahr für die Feuerwehr im Löscheinsatz, aber auch für Personen bei Selbstrettung angesehen werden kann. Bei geringerer nach Norm dimensionierter Brandlast ist durch kleinteiliges Absplittern keine Gefahr für Personen gegeben. Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Fassadenbekleidungen – ein Szenario, dass bei der Sanierung mit greenTES-Elementen möglich ist – sind möglich. Durch vertikale und horizontale Begrenzungen nach den obigen Ergebnissen können diese eingedämmt werden.

Falls die untersuchten PV-Module in Außenwandbekleidungen eingebaut werden, muss eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung vorliegen, da keine technische Baubestimmung wie Anhang 5 für

Wärmedämmverbundsysteme oder Anhang 6 zu hinterlüfteten Außenwandbekleidungen mit schwerentflammenden Baustoffen anwendbar sind.

Da die erfolgten Großbrandversuche ohne Dämmebene im Prüfkörper durchgeführt wurden, kann hier keine Aussage zum Raumabschluss im Brandfall getroffen werden. Weiterhin wurden die PV-Module für die Versuche ohne Verkabelung montiert. Eine gegebenenfalls auftretende Brandweiterleitung aufgrund der Kabelführung konnte also nicht untersucht werden.

Baupraktische Anschlussfähigkeit

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die greenTES Konstruktionen umfangreich entwickelt und analysiert. Es werden die Konstruktionsdetails der Baupraxis zur Verfügung gestellt, sodass jede*r Interessierte darauf zugreifen kann und die Forschungsergebnisse anwenden kann. Lediglich von der begrünten Variante ohne Hinterlüftung wird aus hygrothermischen Gründen strikt abgeraten. Bei der direkt begrünten Variante mit Hinterlüftung sollten vor Anwendung weitere hygrothermische Untersuchungen durchgeführt werden.

Kritisch zu betrachten in Hinsicht auf die baupraktische Anschlussfähigkeit sind jedoch die hohen Kosten sowie insbesondere auch der große Wandaufbau, welcher durch die organische Zellulosedämmung in Kombination mit den weiteren Fassadensystemen Photovoltaik und Begrünung entsteht. Hierdurch kann es zu Herausforderungen hinsichtlich einer ausreichenden Belichtung der Innenräume sowie zu baurechtlichen Komplikationen, insbesondere im innerstädtischen Bereich, kommen.

Fazit & Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts greenTES wurden zwei verschiedene Photovoltaiksysteme sowie drei Begrünungssysteme in vorgefertigte Holzbaukonstruktionen integriert. Dafür wurden konstruktive Detaillösungen für die Befestigung der Systeme sowie für die Integration der Bewässerungs- und Stromleitungen entwickelt. Die Führung der Strom- sowie Wasserleitungen erfolgt dabei anhand eines Versorgungsschachts als Sonderelement. Die praktische Umsetzung jeder greenTES-Konstruktionen wurde anhand eines Mock-Ups getestet. Das Mock-Up liefert zudem Messdaten zur hygrothermischen Evaluierung der Fassade sowie zur Validierung von hygrothermischen Modellen. Anhand eines Durchwärmungsversuchs im Ofen sowie zwei Großbrandversuchen wurde die Photovoltaikfassade mit Dünnschichtmodulen zudem brandschutztechnisch untersucht.

Dennoch verbleibt offener Forschungsbedarf bei den greenTES-Fassaden: Der kurze Zeitraum der messtechnischen Untersuchungen umfasst die hygrothermisch kritische Winterperiode bislang nicht. Für eine vollumfängliche Validierung der Simulationsmodelle und eine hygrothermische Bewertung der greenTES Konstruktionen sind daher weitere Messdaten notwendig. Auch für eine vollständige brandschutztechnische Bewertung sind weitere Versuche der PV-Anlage inklusive Kabelführung und mit einer Dämmebene im Prüfkörper notwendig. Zudem wurden bei den Großbrandversuchen ausschließlich die als kritischer erachteten Dünnschichtmodule mit rückseitig geklebter Befestigung untersucht. Eine Evaluierung des Brandverhaltens von mechanisch befestigten Photovoltaikmodulen verbleibt bislang offen. Hinzu kommt, dass die Konstruktionen bislang lediglich an einem Mock-Up untersucht und die fassadengebundenen Begrünungen hier ohne Bewässerungssystem ausgeführt wurden. Die entwickelte Schachtlösung zur Führung der Wasser- und Stromleitungen wurde in der Praxis noch nicht umgesetzt. Für weitere konstruktive und prozesstechnische Untersuchungen ist die Anwendung der greenTES Fassaden an einem realen Bauprojekt notwendig.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Elisabeth Fassbender (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Christine Hani (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM)

Benedikt Glas (Forschungsbereich Holz- und biogene Technologien, Fachhochschule Salzburg)

Elisabeth Suttner (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM)

Dr.-Ing. Claudia Hemmerle (bayklif Juniorforschungsgruppenleiterin, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

FH-Prof. M.Eng. Dipl.Ing Manfred Stieglmeier (Forschungsbereich Holz- und biogene Technologien, Fachhochschule Salzburg)

Dr.-Ing. Thomas Engel (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM)

Serena Keller (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Hanna Wirth (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Tabea Horn (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Weitere Mitwirkende

Dr. Ernest Berghofer (Forschungslabor für Haustechnik, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Jochen Mecus (Forschungslabor für Haustechnik, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Projektpartner

Gumpp & Maier GmbH: Alexander Gumpp und René Schröttle

Lattke Architekten: Frank Lattke

AVANCIS GmbH: Augustin Rohr, Stefan Grünsteidl und Kristian Herath

GES Gebäudeenergiesysteme GmbH: Joachim Höhne

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen: Prof. Dr.-Ing. Nicole Pfoser

Weitere Fördermittelgeber

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF)

Cluster-Initiative Forst und Holz Bayern

Solarenergieförderverein Bayern e.V. (SeV)

Landesbetrieb Wald und Holz Nordrheinwestfalen

Kurzbiographien



Elisabeth Fassbender, M.Sc.

Frau Fassbender studierte Architektur an der RWTH Aachen (Bachelor) und schloss anschließend das Masterstudium Energieeffizientes und Nachhaltiges Bauen an der TU München ab. Seit 2018 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen.



Christine Hani, M.Sc.

Vor der Tätigkeit am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion arbeitete Christine Hani in der Abteilung für Ökologie im Baureferat der Landeshauptstadt München. Ihr Studium absolvierte sie im Energieeffizienten und Nachhaltigen Bauen an der TU München. Seit 2021 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion an der TU München.



Benedikt Glas, B.Eng.

Herr Glas studierte Energieeffizientes Planen und Bauen an der Hochschule Augsburg (Bachelor) und arbeitete anschließend in der Gebäudesanierung in süddeutschen Raum. Seinen Master absolvierte Benedikt Glas an der FH Salzburg im Bereich Holztechnologie und Holzbau. Seit 2022 ist Herr Glas wissenschaftlicher Mitarbeiter an der FH Salzburg.



Elisabeth Suttner, M.Sc.

Nach ihrem Bauingenieurstudium an der TU München begann Elisabeth Suttner ihre berufliche Laufbahn als Bauingenieurin im Ingenieurbüro FIRE & TIMBER.ING GmbH mit Schwerpunkt auf Brandschutz im Holzbau. Gleichzeitig arbeitet sie sich als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion an der TU München, wo sie sich intensiv auf Forschung im Bereich Brandschutz von Holzbauteilen und Holzgebäuden konzentriert.



Dr.-Ing. Claudia Hemmerle

Dr. Hemmerle studierte Umwelttechnik / Regenerative Energien an der HTW Berlin. Sie promovierte 2015 am Institut für Baukonstruktion der Technischen Universität Dresden. Seit Oktober 2018 leitet sie eine Juniorforschergruppe des Bayerischen Klimaforschungsnetzwerks an der TUM.



FH-Prof. M.Eng. Dipl.Ing Architekt Manfred Stieglmeier

Prof. Stieglmeier studierte Architektur an der Akademie der Bildenden Künste München und der Hochschule München sowie Holzbau für Architekten an der Hochschule Rosenheim. Seit 2000 führt er sein eigenes Architekturbüro Stieglmeier Architekten mit Schwerpunkt Holzbau und seit 2021 ist er Professor an der Fachhochschule Salzburg.

**Dr.-Ing. Thomas Engel**

Thomas Engel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München und seit 2023 Leiter des Fachbereichs Brandschutz. Weiterhin ist er geschäftsführender Gesellschafter der Brandschutz-Engel GmbH und der KET Fire GmbH. Er ist Kommandant einer Abteilung der freiwilligen Feuerwehr München.

**Serena Keller, M.Sc.**

Frau Keller absolvierte einen B.Sc. in Architektur an der Universität Liechtenstein und erwarb anschließend einen M.Sc. in Ressourceneffizientem und Nachhaltigem Planen und Bauen an der TUM. Seit 2023 ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der TUM tätig.

**Hanna Wirth, M.Sc.**

Frau Wirth studierte Umweltingenieurwesen an der TU München. Anschließend schloss sie ihren Master in Ressourceneffizientem und Nachhaltigem Planen und Bauen, ebenfalls an der TU München ab.

**Tabea Horn, M.Sc.**

Frau Horn studierte Bauingenieurwesen (Bachelor und Master) an der Technischen Universität München und schloss ihr Masterstudium mit den Vertiefungen Holzbau, Baukonstruktion und nachhaltiges Bauen 2023 ab.

**Prof. Thomas Auer**

Prof. Auer studierte Verfahrenstechnik an der Universität Stuttgart und beschäftigte sich im Anschluss bei der Transsolar Energietechnik GmbH mit dem Thema Energieeffizienz und Nutzerkomfort. Von 2001 bis 2008 hatte Prof. Auer einen Lehrauftrag an der Yale University. Seit 2014 ist er Professor an der TUM.

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter**

Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter ist ordentlicher Professor und Leiter des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion. Er ist Vorstandsmitglied der MPA BAU (Werkstoffprüflabor) der Technischen Universität München; und Autor zahlreicher wissenschaftlicher Artikel.

**Dr. Ernest Berghofer**

Dr. Berghofer ist Leiter des Forschungs- und Versuchslabors für Haustechnik des Lehrstuhls für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen der TU München.

**Jochen Mecus, M.Sc.**

Herr Mecus studierte Bauingenieurwesen und ist zurzeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungs- und Versuchslabor für Haustechnik des Lehrstuhls für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen der TU München.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematische Darstellung der greenTES Konstruktionen	13
Abbildung 2 Methodische Vorgehensweise im greenTES Forschungsprojekt	15
Abbildung 3 Arbeitspakete im greenTES Forschungsprojekt	16
Abbildung 4 Bodengebundene Fassadenbegrünung als Direktbewuchs (1) oder als leitbarer Bewuchs (2) [9]	19
Abbildung 5 Wandgebundene Fassadenbegrünung als horizontale Ausführung (3), modulare Bauweise (4) und flächige Bauweise (5) [9]	20
Abbildung 6: <i>Einfluss der Holzfeuchte auf verschiedene Holzeigenschaften</i> [23]	24
Abbildung 7: Indikatoren für Schimmelpilzwachstum [31]	26
Abbildung 8: Temperatur- und Feuchtediagramme zur Keimungs- und Wachstumsrate am Beispiel des <i>Aspergillus restrictus</i> nach [33]	26
Abbildung 9: Schimmelsporenauskeimen je nach Substratart anhand der Grenzkurven [22]	27
Abbildung 10: LIM-Kurve von Zellosoeschüttung behandelt [34] (Hier ist der Versatz des Diagrammnullpunktes im Vergleich zu Abbildung 9 zu berücksichtigen.)	27
Abbildung 11: Kapazitative Methode/ dielektrische Methode [42]	30
Abbildung 12: Mikrowellenmethode [42]	31
Abbildung 13 Elektrisches Widerstandsverfahren [42]	32
Abbildung 14 Ablaufschema des Berechnungsverfahrens, das der Software WUFI zugrunde liegt, aus [50].	34
Abbildung 15 Prozess der Modellentwicklung nach [59]	35
Abbildung 16: Brandentwicklung auf der PMMA-Platte mit einer Spalthöhe von 15 cm und einer Probenbreite von 30 cm [75]	41
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Wärmestromanstiege; Vorwärmzone (xh) vor der Pyrolyse Zone (xp), als Funktion der Spalthöhe (Hn), Flammenhöhe (Lf) und brennbarer Inhalt von dem Panel. (a) Keine Platte – natürliche Flamme Ausbreitung, $\dot{q}'' f(x)$ - Wärmefluss von der Flamme. (b) Nicht brennbar Panel, $H_1 > L_f$, Wärmestrom von Panel, $\dot{q}'' p(x)$, und angesammelter Rauch, $\dot{q}'' g(x)$. (c) Nicht brennbare Platte $H_2 < L_f$, Durchbiegung einer Flamme, die zu einem erhöhten Wärmefluss führt von der Flamme. (d) PV-Modul mit Brennstoff Rückseitenmembran, wodurch der Wärmefluss entsteht $\dot{q}'' PV$. [75]	41
Abbildung 18: Versuchsaufbau im Projekt <i>PV-Brandschutz – Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaikanlagen und Entwicklung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung; Aufbau mit Thermoelementen (links); Gasbrenner (rechts)</i> [77]	43
Abbildung 19: Aufbau des Prüfstandes vor Befestigung der Außenwandbekleidung/Prüfkörper nach DIN 4102-20 [78]	43
Abbildung 20: Versuchsstand mit Bezeichnung der PV-Module (links), Darstellung der abgefallenen Module mit Zeitangabe (rechts) [81]	45
Abbildung 21 Pflanzenauswahl Rinnensystem (Fotos: Baumschule Horstmann)	47
Abbildung 22 Visualisierung Trogsystem	50
Abbildung 23 Bewässerungsprinzip Trogsystem	51

Abbildung 24 Visualisierung des Rinnensystems	52
Abbildung 25 Bewässerungsprinzip Rinnensystem	53
Abbildung 26 Visualisierung Photovoltaik AVANCIS-Skala-System	54
Abbildung 27 Visualisierung mit GES-Photovoltaik	55
Abbildung 28 Mock-Up greenTES in Binswangen	59
Abbildung 29 Grundriss Mock-Up (maßstabslos)	60
Abbildung 30 Schnitt A-A Mock-Up (maßstabslos)	60
Abbildung 31 Schnitt B-B Mock-Up (maßstabslos)	60
Abbildung 32: Grundrissdarstellung der Positionierung der Messtechnik im Mock-Up	61
Abbildung 33: Positionierung der Sensoren in den Bauteilschichten; Bild 1: oH; Schnitt 2: mH; Schnitt 3: PV; Schnitt 4: Ref	65
Abbildung 34: Sensorpositionen in den Bauteilaufbauten mit begrünter Fassade	66
Abbildung 35: Eingebaute Messtechnik vor Befüllung mit Zellulosedämmung; Elektrisches Widerstandsverfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte (links), Oberflächentempersensor (Mitte), Hygrosensor zur Bestimmung der Dämmfeuchte und -temperatur (rechts)	66
Abbildung 36: Ausschnitt der im Grundriss dargestellten Verkabelung der Messtechnik inklusive Beschriftung der Datenlogger (Thermofox Universal)	67
Abbildung 37: Abbildung der Sensorpositionen mit Benennung	69
Abbildung 38: Sorptionsisotherme Isocell Zellulosedämmung [104]	70
Abbildung 39: Betrachtungszeitraum 1	71
Abbildung 40: Legende der Farbkodierung für die Auswertung der hygrothermischen Messergebnisse	71
Abbildung 41: <i>Verlauf relative Luftfeuchte & Temperatur außen und innen im ersten Betrachtungszeitraum</i>	72
Abbildung 42: <i>Strahlungsdaten, kurzweilige Globalstrahlung ZR 1</i>	73
Abbildung 43: <i>Windgeschwindigkeit in [m/s] ZR 1</i>	73
Abbildung 44: Messungen der Temperatur an der Referenzfassade	74
Abbildung 45: Messungen der relativen Feuchte in der Dämmung der Referenzfassade	74
Abbildung 46: Holzfeuchtemessungen der Referenzfassade	75
Abbildung 47: Messungen der Temperatur an der Fassade mit PV	76
Abbildung 48: Messungen der relativen Feuchte in der Dämmung an der Fassade mit PV	76
Abbildung 49: Holzfeuchtemessungen der Fassade mit PV	77
Abbildung 50: Messungen der Temperatur an der Fassade mit Begrünung mit Hinterlüftung	78
Abbildung 51: Messungen der relativen Feuchte in der Dämmung an der Fassade mit Begrünung mit Hinterlüftung	78
Abbildung 52: Holzfeuchtemessungen der Fassade mit Begrünung mit Hinterlüftung	79
Abbildung 53: Messungen der Temperatur an der Fassade mit Begrünung ohne Hinterlüftung	80
Abbildung 54: Messungen der relativen Feuchte in der Dämmung an der Fassade mit Begrünung ohne Hinterlüftung	80

Abbildung 55: Holzfeuchtemessungen der Fassade mit Begrünung ohne Hinterlüftung	81
Abbildung 56: Temperaturverläufe aller Fassaden an Position Da ZR 1	82
Abbildung 57: Verläufe der relativen Feuchte aller Fassaden in der Dämmebene ZR 1	82
Abbildung 58: Holzfeuchteverlauf aller Fassaden Positionen a & i ZR 1	83
Abbildung 59: Betrachtungszeitraum 2	83
Abbildung 60: Verlauf relative Luftfeuchte & Temperatur außen und innen ZR 2	84
Abbildung 61: Strahlungsdaten, kurzweilige Globalstrahlung ZR 2	85
Abbildung 62: Windgeschwindigkeit in [m/s] ZR 2	85
Abbildung 63: Windrose zur Darstellung der Windrichtungshäufigkeit ZR 2	86
Abbildung 64: Temperaturverlauf Referenzfassade ZR 2	86
Abbildung 65: Verlauf der relativen Feuchte in der Dämmebene Referenzfassade ZR 2	87
Abbildung 66: Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene Referenzfassade ZR 2	88
Abbildung 67: Hygrothermischer Verlauf über den Bauteilquerschnitt Referenzfassade ZR 2	88
Abbildung 68: Holzfeuchteverlauf Referenzfassade ZR 2	89
Abbildung 69: Temperaturverlauf Photovoltaik-Fassade ZR 2	90
Abbildung 70: Verlauf der relativen Feuchte in der Dämmebene Photovoltaik-Fassade ZR 2	91
Abbildung 71: Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene Photovoltaik-Fassade ZR 2	91
Abbildung 72: hygrothermischer Verlauf über den Bauteilquerschnitt Photovoltaik-Fassade ZR 2	92
Abbildung 73: Holzfeuchteverlauf Photovoltaik-Fassade ZR 2	92
Abbildung 74: Temperaturverlauf Selbstklammer-Fassade hinterlüftet ZR 2	93
Abbildung 75: Verlauf der relativen Feuchte in der Dämmebene Selbstklammer-Fassade hinterlüftet ZR 2	94
Abbildung 76: Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene Selbstklammer-Fassade hinterlüftet ZR 2	95
Abbildung 77: hygrothermischer Verlauf über den Bauteilquerschnitt Selbstklammer-Fassade hinterlüftet ZR 2	95
Abbildung 78: Holzfeuchteverlauf Selbstklammer-Fassade hinterlüftet ZR 2	96
Abbildung 79: Temperaturverlauf Selbstklammer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2	97
Abbildung 80: Verlauf der relativen Feuchte in der Dämmebene Selbstklammer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2	98
Abbildung 81: Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene Selbstklammer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2	98
Abbildung 82: hygrothermischer Verlauf über den Bauteilquerschnitt Selbstklammer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2	99
Abbildung 83: Holzfeuchteverlauf Selbstklammer-Fassade nicht hinterlüftet ZR 2	100
Abbildung 84: Legende der Farbkodierung für die Auswertung der hygrothermischen Messergebnisse	100
Abbildung 85: Temperaturverläufe aller Fassaden an Position Da ZR 2	101

Abbildung 86: Verläufe der relativen Feuchte aller Fassaden in der Dämmebene ZR 2	102
Abbildung 87: Materialfeuchte der Zellulosedämmung aller Fassaden ZR 2	102
Abbildung 88: Holzfeuchteverlauf aller Fassaden Positionen a und i im ZR 2	103
Abbildung 89: Luftgeschwindigkeit in der Hinterlüftung der Selbstklammer-Fassade an ausgewählten Tagen in [m/s]	104
Abbildung 90: Volumenstrom in der Hinterlüftung der Selbstklammer-Fassade an ausgewählten Tagen in [m ³ /s]	104
Abbildung 91 Ablauf des Berechnungsmodells in WUFI in Anlehnung an [50]	106
Abbildung 92 Herleitung der Feuchtigkeitsmenge für Fassadenbegrünung basierend auf [118]	110
Abbildung 93 Feuchtequelle des Fassadenbegrünungsmodells mit Feuchtigkeitsmenge über das Jahr	110
Abbildung 94 Schematische Darstellung der auftreffenden, reflektierten und umgewandelten Strahlung an einem Photovoltaikmodul	111
Abbildung 95 Wärmequelle des Photovoltaikmodells im Jahresverlauf	111
Abbildung 96 Gemittelte (MW) und absolute Temperaturen des Glasmoduls bei den Modellierungsschritten des Photovoltaikaufbaus.	112
Abbildung 97 Implementierung der greenTES Konstruktionsvarianten in WUFI Pro Version 6.7	113
Abbildung 98 Analyse verschiedener Gitteraufbauten von grob (40) bis fein (200)	114
Abbildung 99 Validierungsmethodik	116
Abbildung 100 Position der Messgeräte und Benennung der Simulationspunkte	118
Abbildung 101 Übersicht über die WUFI Fassadenvarianten im Bestand mit Ziegelmauerwerk	126
Abbildung 102 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante oH im Bestand. Darstellung der Temperatur an Position TaO.	128
Abbildung 103 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante PV im Bestand. Darstellung der Temperatur an Position TaO.	129
Abbildung 104 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante oH im Neubau. Darstellung der Temperatur an Position T4.	130
Abbildung 105 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante Ref im Bestand. Darstellung des Wassergehalts an Position w2 bei Orientierung nach Süd-West.	131
Abbildung 106 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante Ref im Bestand. Darstellung des Wassergehalts an Position 2 bei Orientierung nach Nord-West.	131
Abbildung 107 Vergleich des Wassergehalts in Position 2 der Anwendungsszenarien Neubau und Bestand der Fassade Ref, Modell 2.	132
Abbildung 108 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante oH im Bestand. Darstellung des Wassergehalts an Position 2 bei Orientierung nach Süd-West.	133
Abbildung 109 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante mH im Bestand. Darstellung des Wassergehalts an Position 2 bei Orientierung nach Süd-West.	134
Abbildung 110 Vergleich der Modelle 1,2 und 3 der Variante PV im Neubau. Darstellung des Wassergehalts an Position 2 bei Orientierung nach Süd-West.	135
Abbildung 111: Ansicht des Prüfkörpers mit vertikaler Positionierung der Thermoelemente innenseitig der Beplankungen	140

Abbildung 112: Schnitt A-A durch den Prüfkörper mit horizontaler Positionierung der Thermoelemente an der Innenseite der Platten	140
Abbildung 113: Einbau der Thermoelemente in den Prüfkörper	141
Abbildung 114: Messstellenplan	142
Abbildung 115: Eingebauter Prüfkörper im Prüfofen von innen (links) und von außen (rechts)	143
Abbildung 116: ETK und Brandraumtemperatur	144
Abbildung 117: Flächenintegral der Brandraumtemperatur	144
Abbildung 118: Temperaturverlauf Gefach 1, 18 mm, Fermacell Gipsfaserplatte + Steinwolle-Dämmstoff	146
Abbildung 119: Temperaturverlauf Gefach 2, 15 mm, Fermacell Gipsfaserplatte + Zellulose-Dämmstoff	146
Abbildung 120: Temperaturverlauf Gefach 3, 18 mm, Fermacell Gipsfaserplatte + Zellulose-Dämmstoff	147
Abbildung 121: Temperaturverlauf Gefach 4, 19 mm, Siniat Duripanel A2 + Zellulose-Dämmstoff	148
Abbildung 122: Temperaturverlauf Gefach 5, 12,5 mm, Fermacell Gipsfaserplatte + Zellulose-Dämmstoff	149
Abbildung 123: Temperaturverlauf Gefach 6, 12,5 mm, Knauf Aquapanel + Zellulose-Dämmstoff	149
Abbildung 124: Temperaturverlauf Gefach 7, 15 mm, HD Fermacell Powerpanel + Zellulose-Dämmstoff	150
Abbildung 125: Temperaturverlauf Gefach 8, 16 mm, Siniat Duripanel A2 + Zellulose-Dämmstoff	150
Abbildung 126: Durchbrand in Gefach 8	151
Abbildung 127: Thermographische Aufnahmen mit der Wärmebildkamera, von links nach rechts: Minute 0, 15, 25, 35	151
Abbildung 128: Messstelleninstrumentalisierung beider Großbrandversuche nach DIN EN 4102-20 in der Holzfassade (links), in der PV-Fassade (mittig) in Anlehnung an Anordnung aus der DIN EN 4102-20 [78] bei WDVS (rechts)	154
Abbildung 129: Aufbau und Messstellenplan des Großbrandversuches 1	156
Abbildung 130: Prüfkörper vor Beginn des Brandversuches	156
Abbildung 131: Prüfkörper während des Brandversuches (von links nach rechts: Minute 2, 3, 9, 10, 17)	158
Abbildung 132: Brandeinwirkung auf das PV-Modul in der Stützflamme, Brand in der Zwischenschicht (links) und über die Brandsperre (rechts)	159
Abbildung 133: Schäden an der Fassade nach Brandversuch, Horizontales Modul (links und Mitte), Modul rechts der Brandkammer (rechts)	159
Abbildung 134: Herabgefallene Teile und Splitter der PV-Module	159
Abbildung 135: Temperaturverläufe im Hinterlüftungsspalt an Achse 1-4	160
Abbildung 136: Aufbau des Großbrandversuches 2	164
Abbildung 137: Prüfkörper vor Beginn des Brandversuches	165
Abbildung 138: Prüfkörper während des Brandversuches (von links nach rechts: Minute 2, 3, 4, 10, 17)	167
Abbildung 139: Temperaturverläufe in Achse 1 (Holzfassade), Ebene A vor der Fassade (links), Ebene B in der Hinterlüftung (rechts)	167
Abbildung 140: Temperaturverläufe in Achse 2 (Holzfassade), Ebene A vor der Fassade (links), Ebene B in der Hinterlüftung (rechts)	168

Abbildung 141: Temperaturverläufe in Achse 3 (Photovoltaikfassade), Ebene A vor der Fassade (links), Ebene B in der Hinterlüftung (rechts)	168
Abbildung 142: Abfallen der Module Modul 10 (links), Modul 7 (Mitte), Modul 8 (rechts)	169
Abbildung 143: Temperaturverläufe in Achse 4 (Photovoltaikfassade), Ebene A vor der Fassade (links), Ebene B in der Hinterlüftung (rechts)	169
Abbildung 144: Brandeinwirkung auf das PV-Modul in der Primärflamme	170
Abbildung 145: Prüfkörper vor dem Ablöschen in Minute 19 (links) und nach dem Ablöschen in der Beobachtungsphase (rechts)	171
Abbildung 146: Schäden an der PV-Fassade nach dem Brandversuch	171
Abbildung 147: Bereich um den Prüfkörper nach dem Brandversuch	171
Abbildung 148 Montagehalle Gump & Maier GmbH (Quelle: www.konstruktiver-holzbau.de)	175

Tabellenverzeichnis

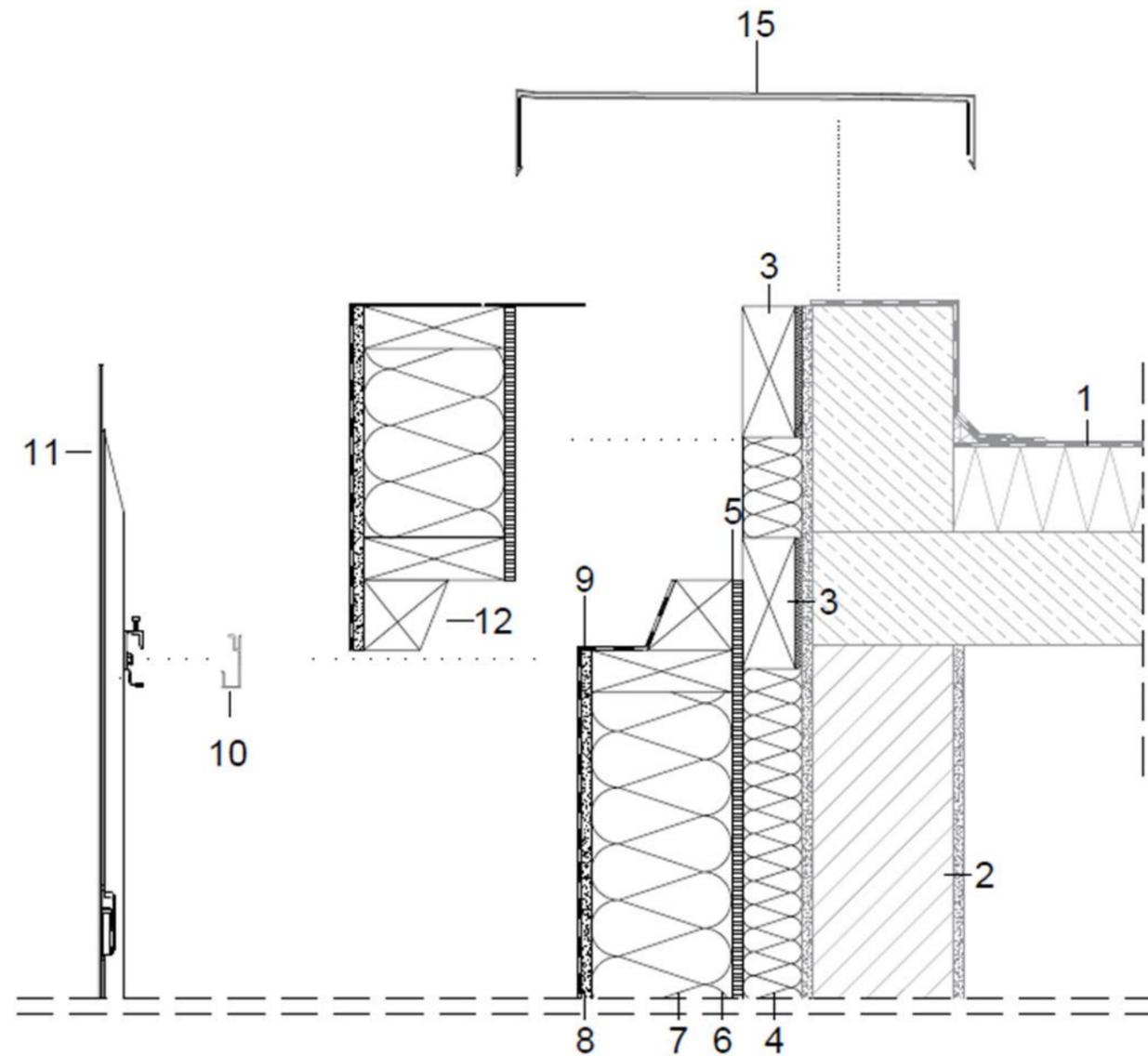
Tabelle 1: Ausgleichsfeuchten von Zellulosefasern und Holzfaserdämmung [19]	22
Tabelle 2: Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m] von verwendeten Baustoffen	23
Tabelle 3: Feuchteschutztechnische Grenzwerte	24
Tabelle 4 Spezifische Wärmekapazität der Baustoffe der greenTES-Konstruktionen	28
Tabelle 5 Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe der greenTES-Konstruktionen	28
Tabelle 6 Wärmeschutztechnische Grenzwerte für Gebäude	29
Tabelle 7: Begriffsbestimmungen	36
Tabelle 8 Vereinfachte Matrix zur Bewertung der Photovoltaik-Systeme	47
Tabelle 9: Messtechnik im Projekt greenTES	64
Tabelle 10: Messgenauigkeiten der Messgeräte [89, 90, 94]	64
Tabelle 11: Messdaten der Wetterstation CR1000X von Campbell Scientific Ltd [99–101]	68
Tabelle 12: Nomenklatur der Sensorbeschriftung	69
Tabelle 13: Zeitliche Darstellung der Aufzeichnung der Wetterstation	70
Tabelle 14 Eingabeparameter für den Bauteilaufbau. Entnommen aus [108]	107
Tabelle 15 Zusammenstellung der greenTES-Konstruktionsmaterialien und der zugehörigen Datenquelle. Authentizität: xxx = aus der WUFI-Materialdatenbank übernommen, xx = Anpassung eines existierenden Datensatzes, x = eigenständig angenähert.	107
Tabelle 16 Grundkennwerte der in den Simulationen verwendeten Materialien	108
Tabelle 17 Eingabeparameter der Oberflächenübergangskoeffizienten. Entnommen aus WUFI [110]	114
Tabelle 18 Eingabeparameter Modell 1 in WUFI Pro Version 6.7	116
Tabelle 19 Herkunft der Rand- und Anfangsbedingungen des Simulationsmodells (WET = Wetterdaten, BER = Berechnung, MESS = Messdaten)	117
Tabelle 20 Kriterien zur Beurteilung der Abweichung von Mess- und Simulationsergebnis in Bezug auf das 90 %-Quartil und das Bestimmtheitsmaß	118
Tabelle 21 Anpassung der Modellparameter für Modell 2	120
Tabelle 22 Anpassung der Modellparameter für Modell 3	121
Tabelle 23 Modell oH, Sommer, Dämmebene. Genauigkeitskriterien Q90 und R ² für die Differenz zwischen Messung und Simulation der Modelle 1 bis 3.	122
Tabelle 24 Modell mH, Sommer, Dämmebene. Genauigkeitskriterien Q90 und R ² für die Differenz zwischen Messung und Simulation der Modelle 1 bis 3.	123
Tabelle 25 Modell RF, Sommer, Dämmebene. Genauigkeitskriterien Q90 und R ² für die Differenz zwischen Messung und Simulation der Modelle 1 bis 3.	124
Tabelle 26 Modell PV, Sommer, Dämmebene. Genauigkeitskriterien Q90 und R ² für die Differenz zwischen Messung und Simulation der Modelle 1 bis 3.	125
Tabelle 27: Materialkennwerte der Beplankung der Holztafelwand im Durchwärmungsversuch	139
Tabelle 28: Materialkennwerte der Dämmstoffe in den Gefachen im Durchwärmungsversuch	139

Tabelle 29: Beobachtungsprotokoll des Durchwärmungsversuches	145
Tabelle 30: Vergleich des Erreichens der Temperaturgrenzwerte in den Gefachen an der brandzugewandten Seite	148
Tabelle 31: Übersicht über die Schutzzeit der Platten (Zellen der zementgebundenen Platten in grau, die der Gipswerkstoffplatten in weiß hinterlegt)	152
Tabelle 32: Material- und Umgebungskennwerte zu Beginn des Versuchs	157
Tabelle 33: Beobachtungsprotokoll des 1. Brandversuches	157
Tabelle 34: Material- und Umgebungskennwerte zu Beginn des Versuches	165
Tabelle 35: Beobachtungsprotokoll des 2. Brandversuches	166
Tabelle 36 Montage- und Vorfertigungszeiten; Quelle: Gumpp & Maier GmbH	178
Tabelle 37: Zuordnung der bauaufsichtlichen Benennungen von Baustoffen nach DIN 4102-1 [68] und DIN EN 13501-1 [143] in Anlehnung an [144]	246

Anlagen

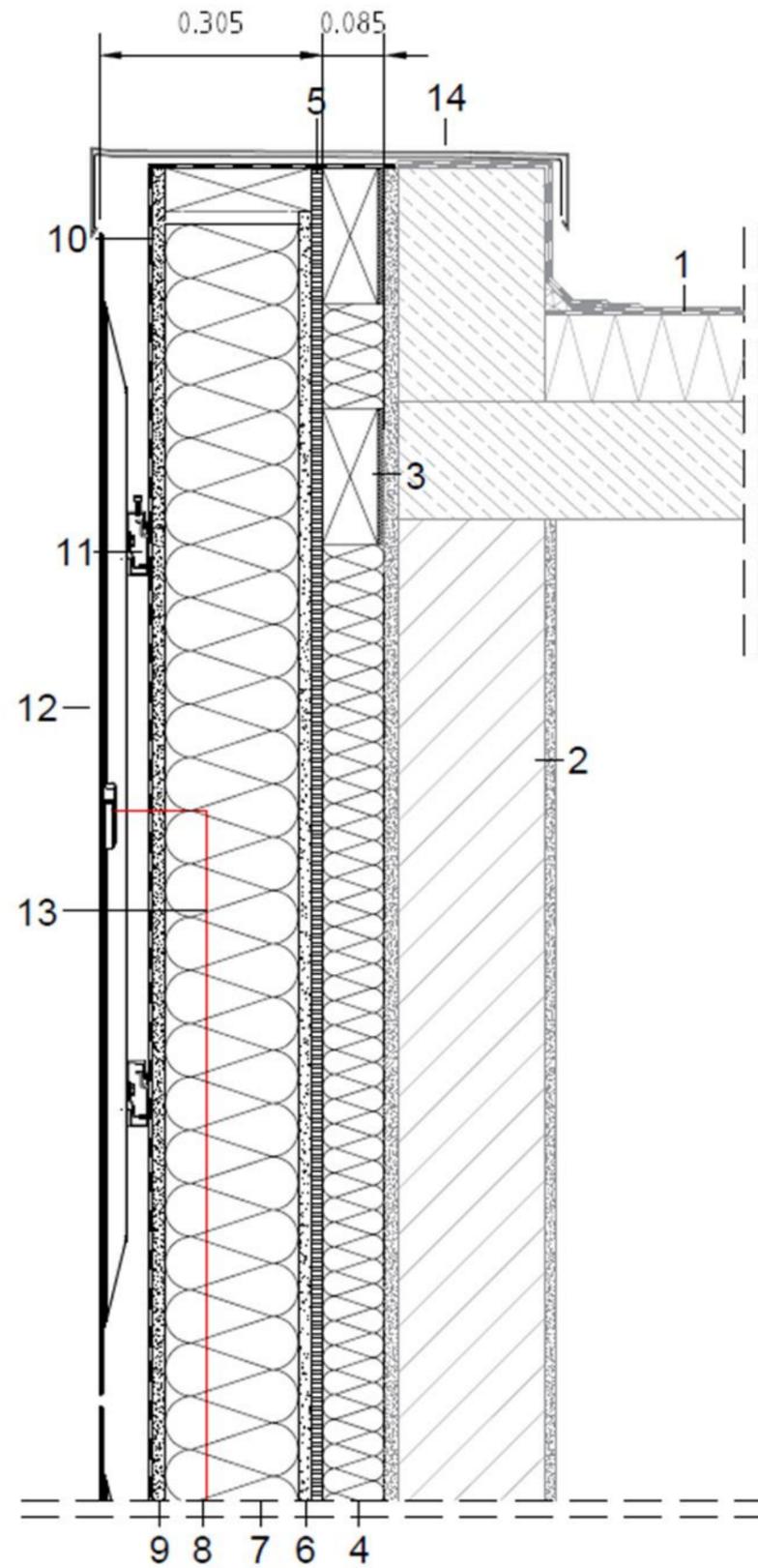
A.1 Detailzeichnungen der greenTES-Konstruktionsvarianten

Abbildung A 1 Detail - Attikastoß – AVANCIS Skala – Schnitt (maßstabslos)



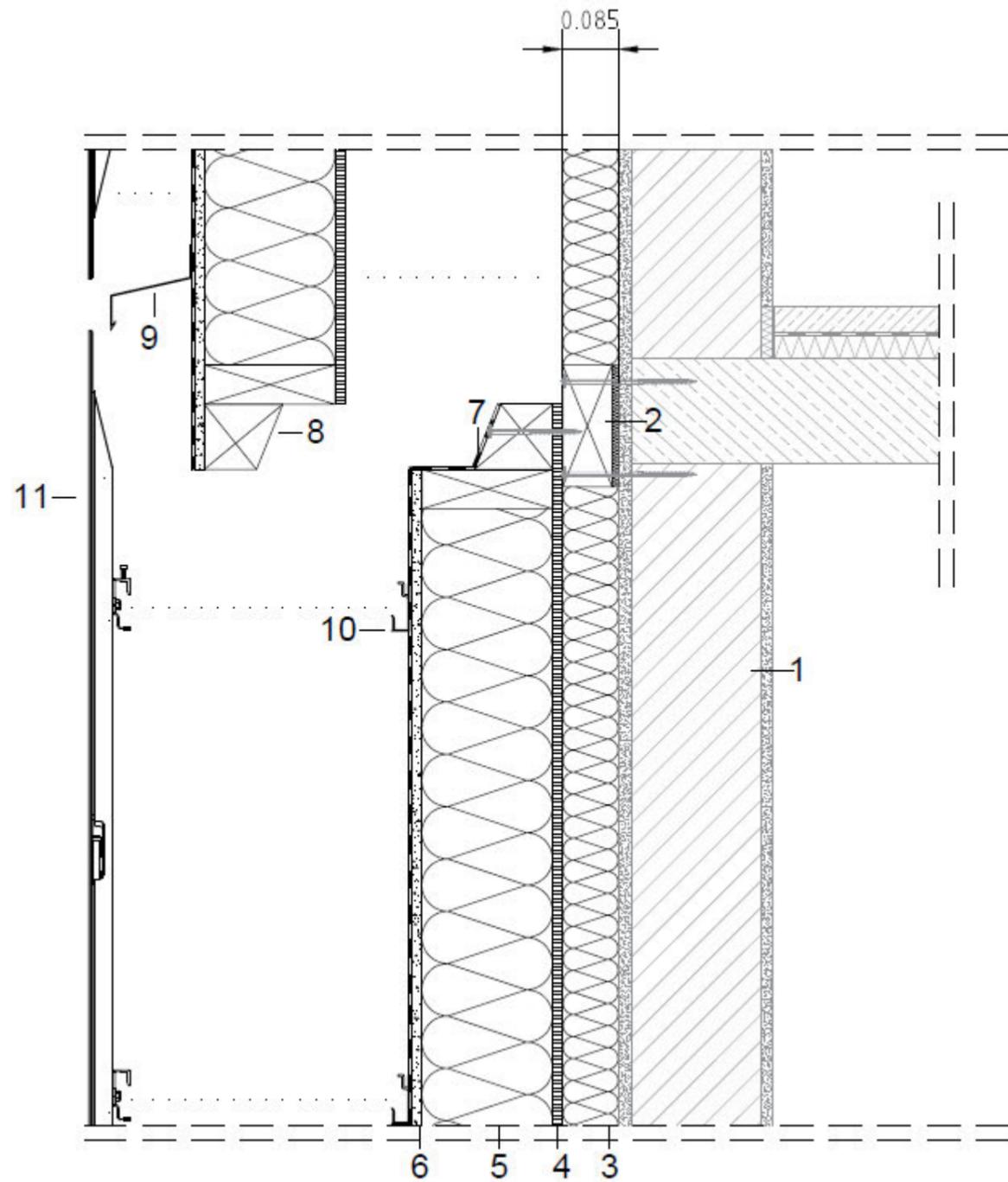
- 1 Aufbau Dach:
Stahlbeton
Wärmedämmung 120 mm
Dachabdichtung
- 2 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 3 Bauchbinde
- 4 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 5 OSB Platte 15 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Mineralwolle 180 mm
- 8 Gipsfaserplatte 18 mm
- 9 Winddichtung
- 10 Backrailsystem
- 11 PV-Modul
- 12 Geteilte Schwelle KVH Fichte

Abbildung A 2 Detail - Attikastoß – AVANCIS Skala – Schachtelement mit Leitungsführung – Schnitt (maßstabslos)



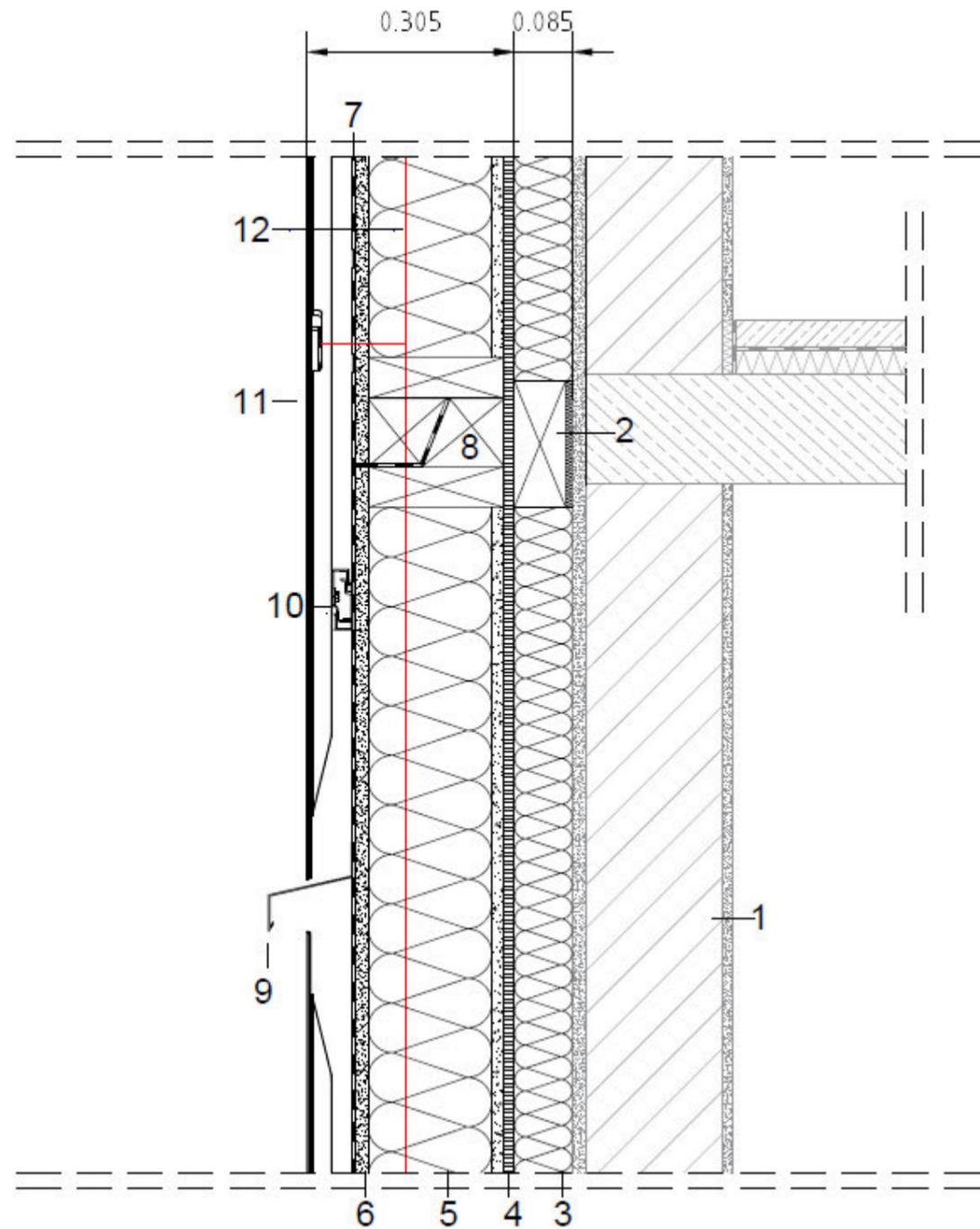
- 1 Aufbau Dach:
Stahlbeton
Wärmedämmung 120 mm
Dachabdichtung
- 2 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 3 Bauchbinde
- 4 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 5 OSB Platte 15 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Mineralwolle 180 mm
- 8 Leerrohr für PV-Anschluss
- 9 Gipsfaserplatte 18 mm
- 10 Winddichtung
- 11 Backrailsystem
- 12 PV-Modul
- 13 Leerrohr für Verkabelung PV

Abbildung A 3 Detail - Elementstoß – AVANCIS Skala – Schnitt (maßstabslos)



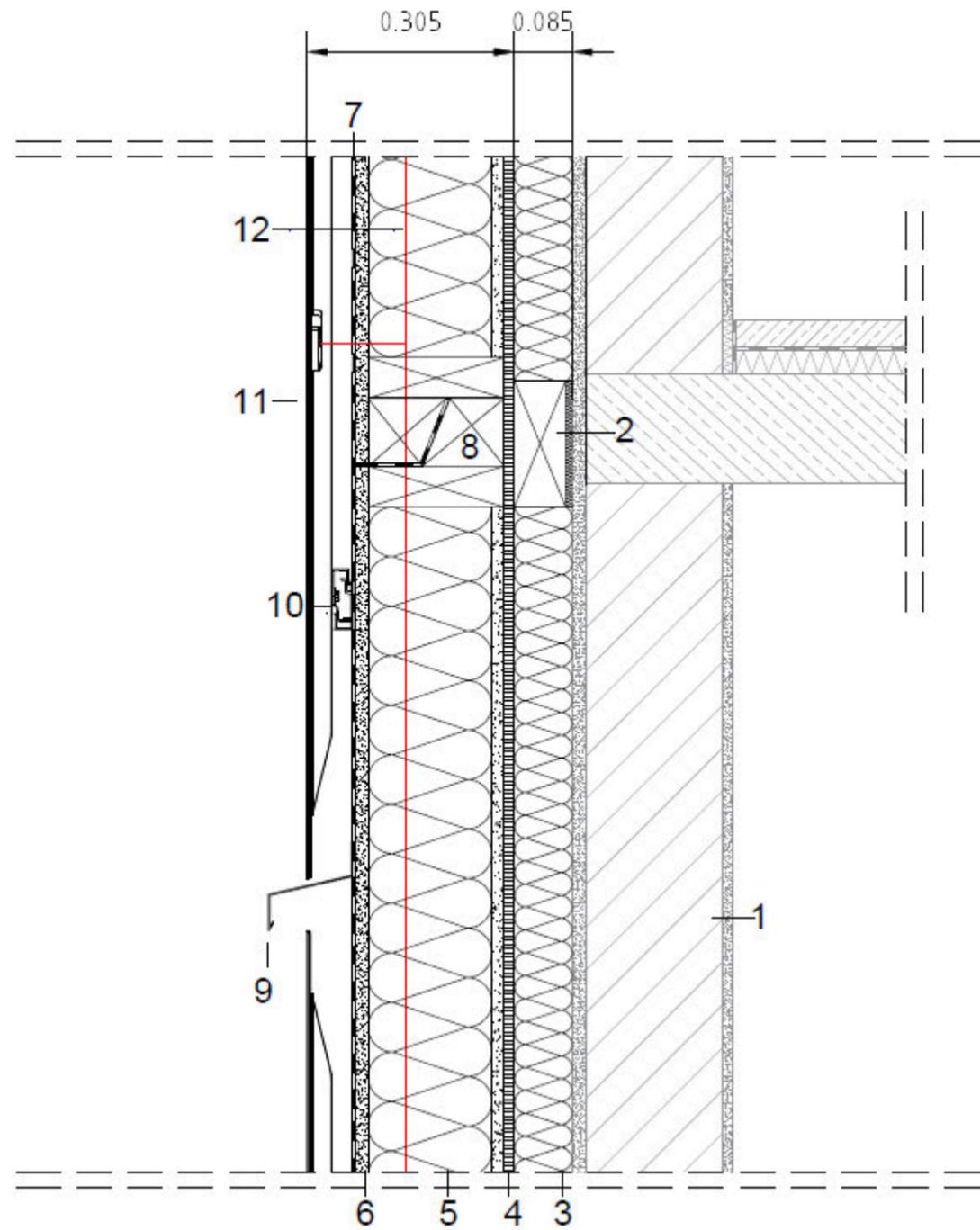
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Bauchbinde KVH Fichte
- 3 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 4 OSB Platte 15 mm
- 5 Zellulose Dämmung 200 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Winddichtung
- 8 Geteilte Schwelle Fichte
- 9 Brandschutzblech
- 10 Backrailsystem
- 11 PV Modul

Abbildung A 4 Detail - Elementstoß – AVANCIS Skala – Schachtelement mit Leitungsführung – Schnitt (maßstabslos)



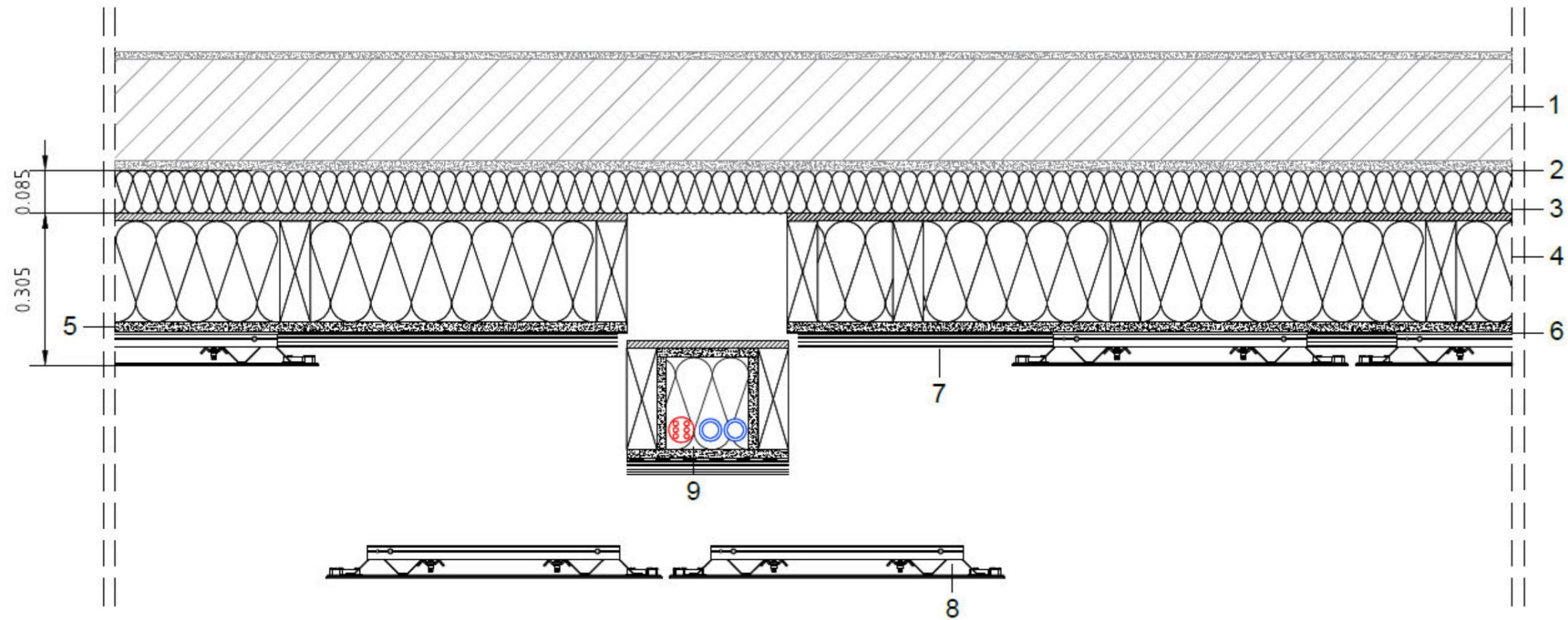
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Bauchbinde KVH Fichte
- 3 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 4 OSB Platte 15 mm
- 5 Zellulose Dämmung 200 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Winddichtung
- 8 Geteilte Schwelle Fichte
- 9 Brandschutzblech
- 10 Backrailsystem
- 11 PV Modul
- 12 Leerrohr für Verkabelung PV

Abbildung A5 Detail - Eckverbindung – AVANCIS Skala – Grundriss (maßstabslos)



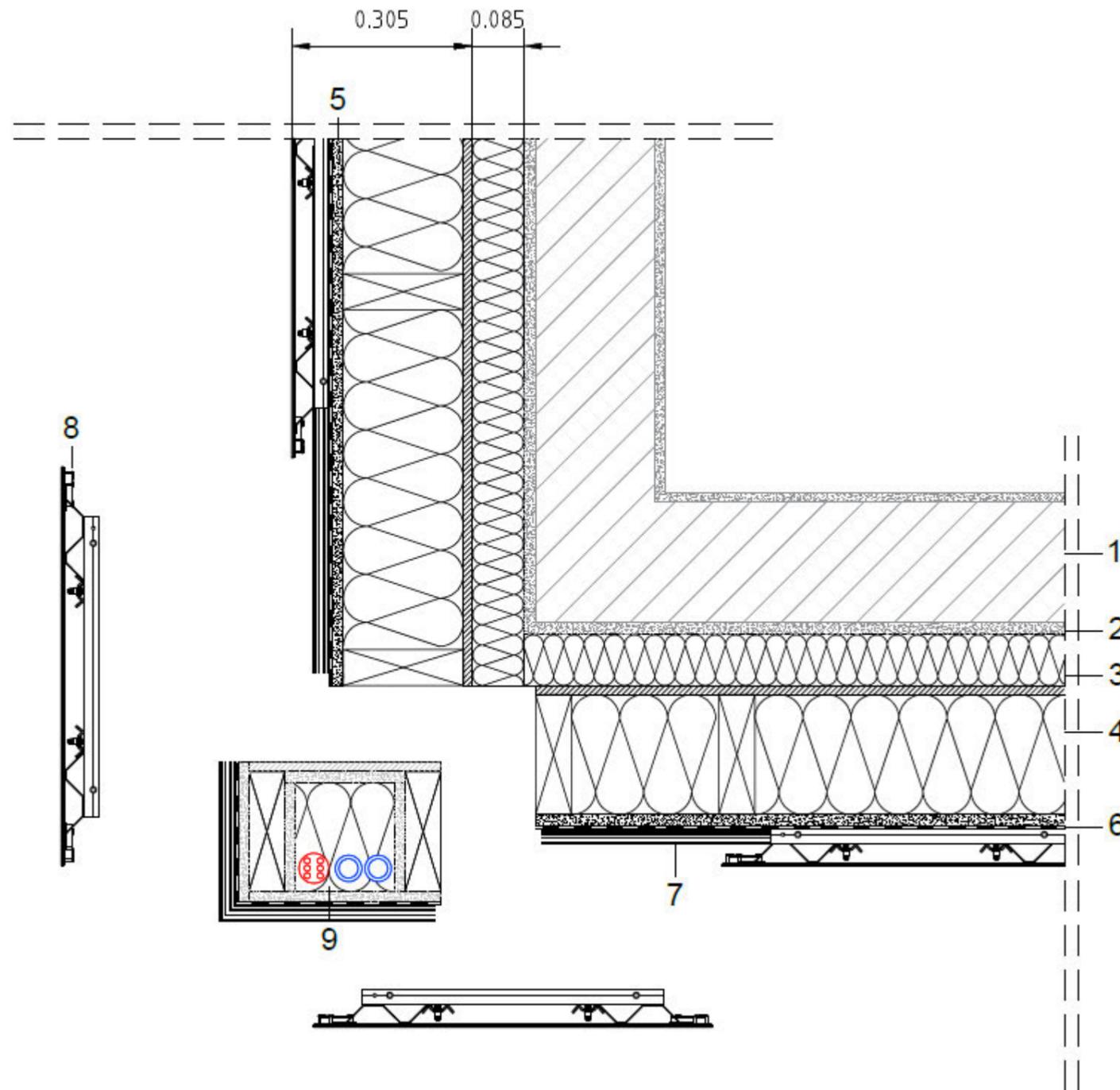
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Bauchbinde KVH Fichte
- 3 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 4 OSB Platte 15 mm
- 5 Zellulose Dämmung 200 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Winddichtung
- 8 Geteilte Schwelle Fichte
- 9 Brandschutzblech
- 10 Backrailsystem
- 11 PV Modul
- 12 Leerrohr für Verkabelung PV

Abbildung A6 Detail – Elementstoß Schachtelement – AVANCIS Skala – Grundriss (maßstabslos)



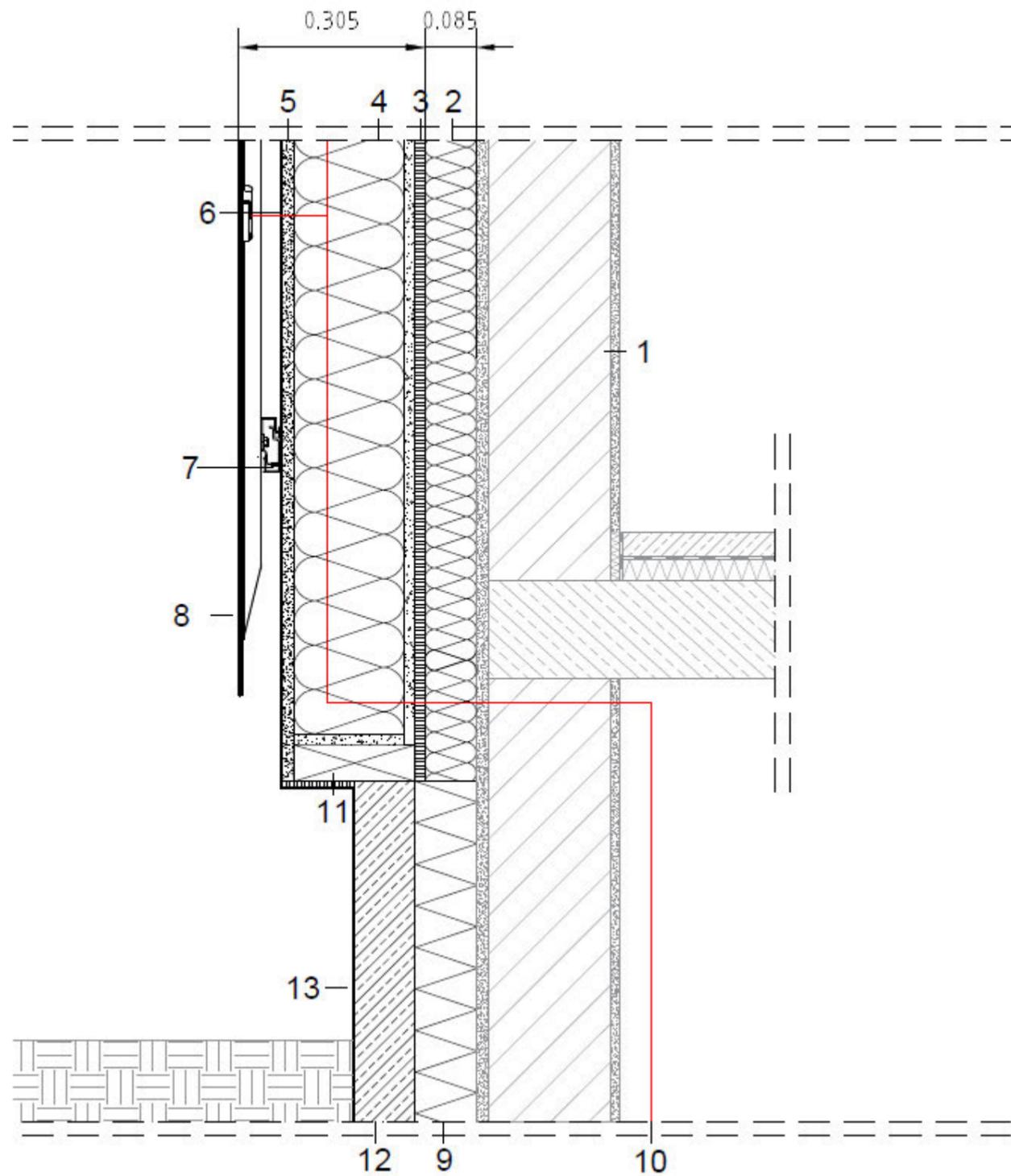
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Backrailsystem
- 8 PV-Modul
- 9 Schachtelement
Blau = Zu- und Ablauf Wasser
Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A7 Detail – Eckverbindung Schacht – AVANCIS Skala – Grundriss (maßstabslos)



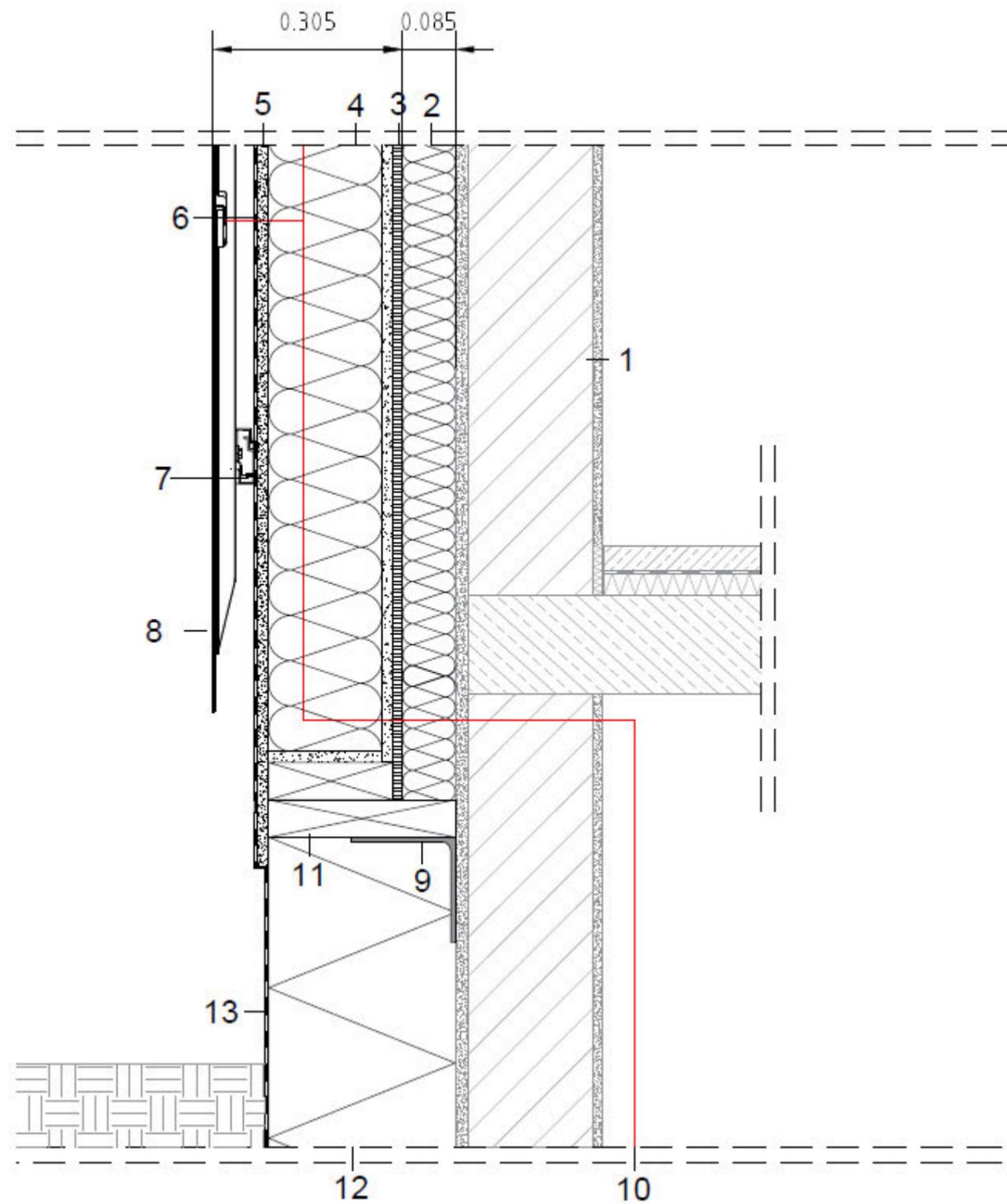
- 1 Aufbau Bestandswand:
 Innenputz
 Ziegel
 Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
 KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Backrailsystem
- 8 PV-Modul
- 9 Schachtelement
 Blau = Zu- und Ablauf Wasser
 Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A8 Detail – Sockel – Schachtelement mit Leitungsführung – AVANCIS Skala – Schnitt (maßstabslos)



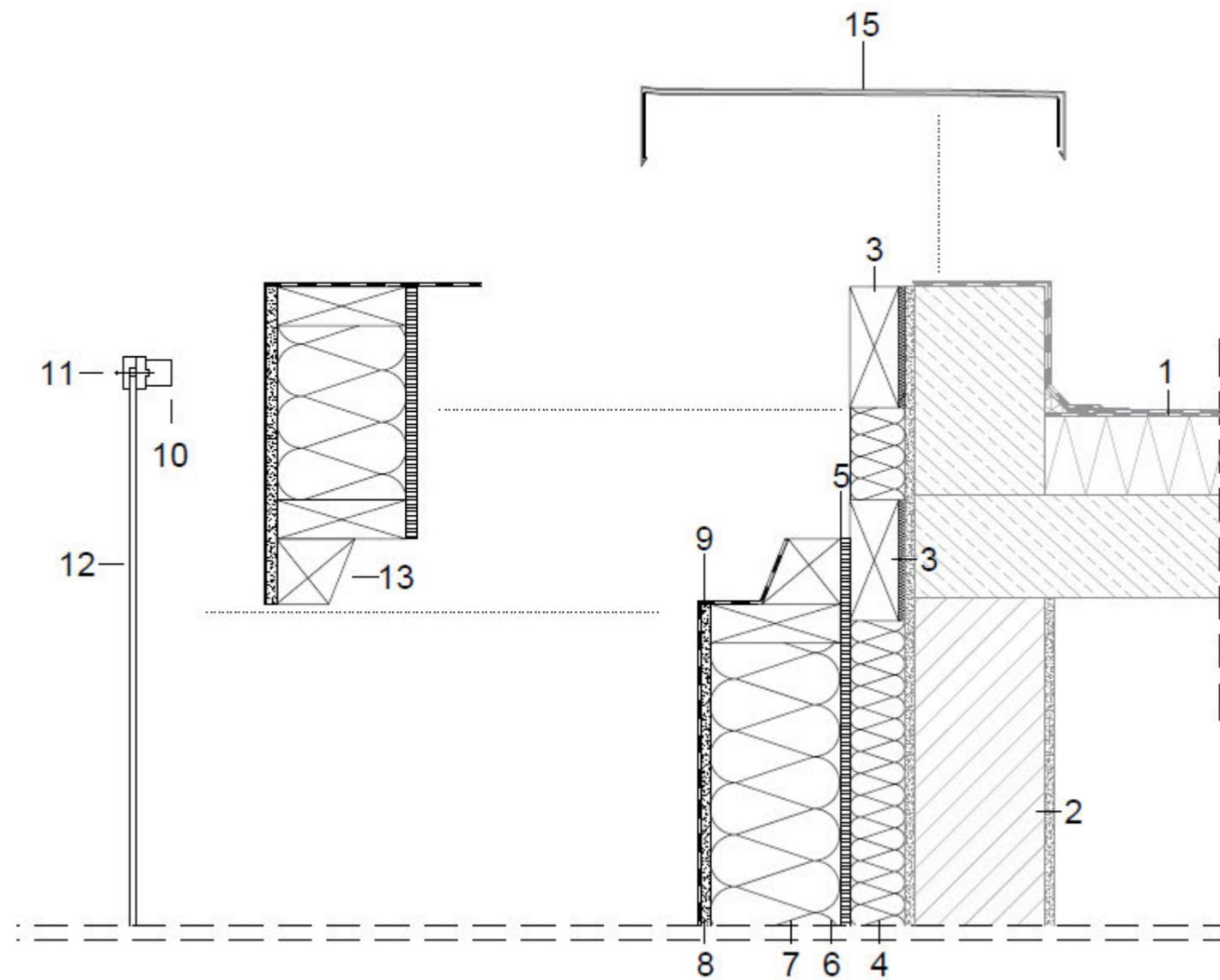
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Backrailsystem
- 8 PV Modul
- 9 Ausgleichsdämmung
- 10 Leerrohr für Verkabelung PV-Module
- 11 Schwelle KVH Fichte
- 12 Betonsockel
- 13 Sockelabdichtung

Abbildung A9 Detail – Sockel – Schachtelement mit Leitungsführung – AVANCIS Skala – Schnitt (maßstabslos)



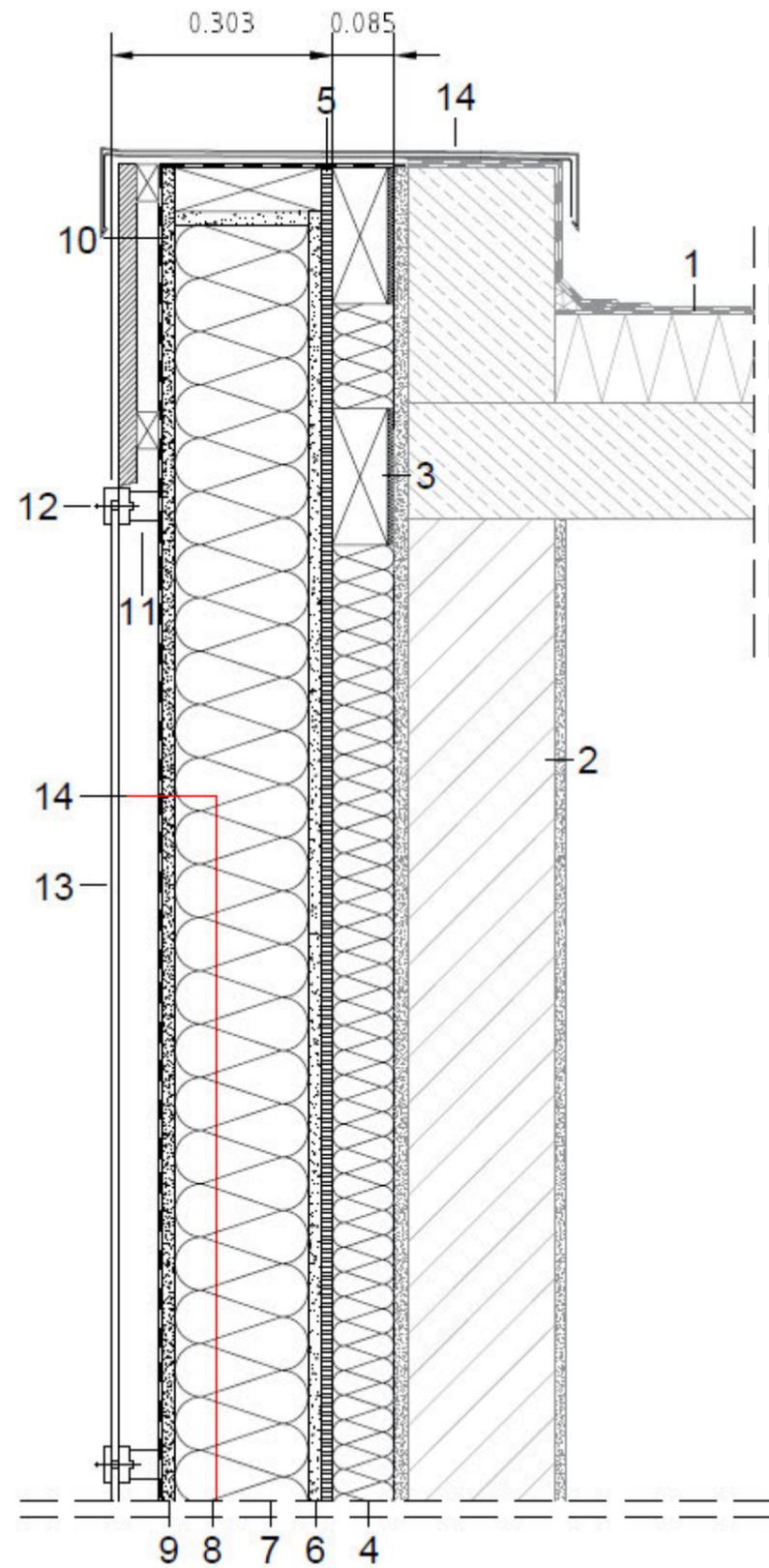
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Backrailsystem
- 8 PV Modul
- 9 Stahlkonsole als Auflager für HRBW
- 10 Leerrohr für Verkabelung PV-Module
- 11 Schwelle KVH Fichte
- 12 Sockeldämmung
- 13 Sockelabdichtung

Abbildung A 10 Detail – Attikastoß – GES-Photovoltaik – Schnitt (maßstabslos)



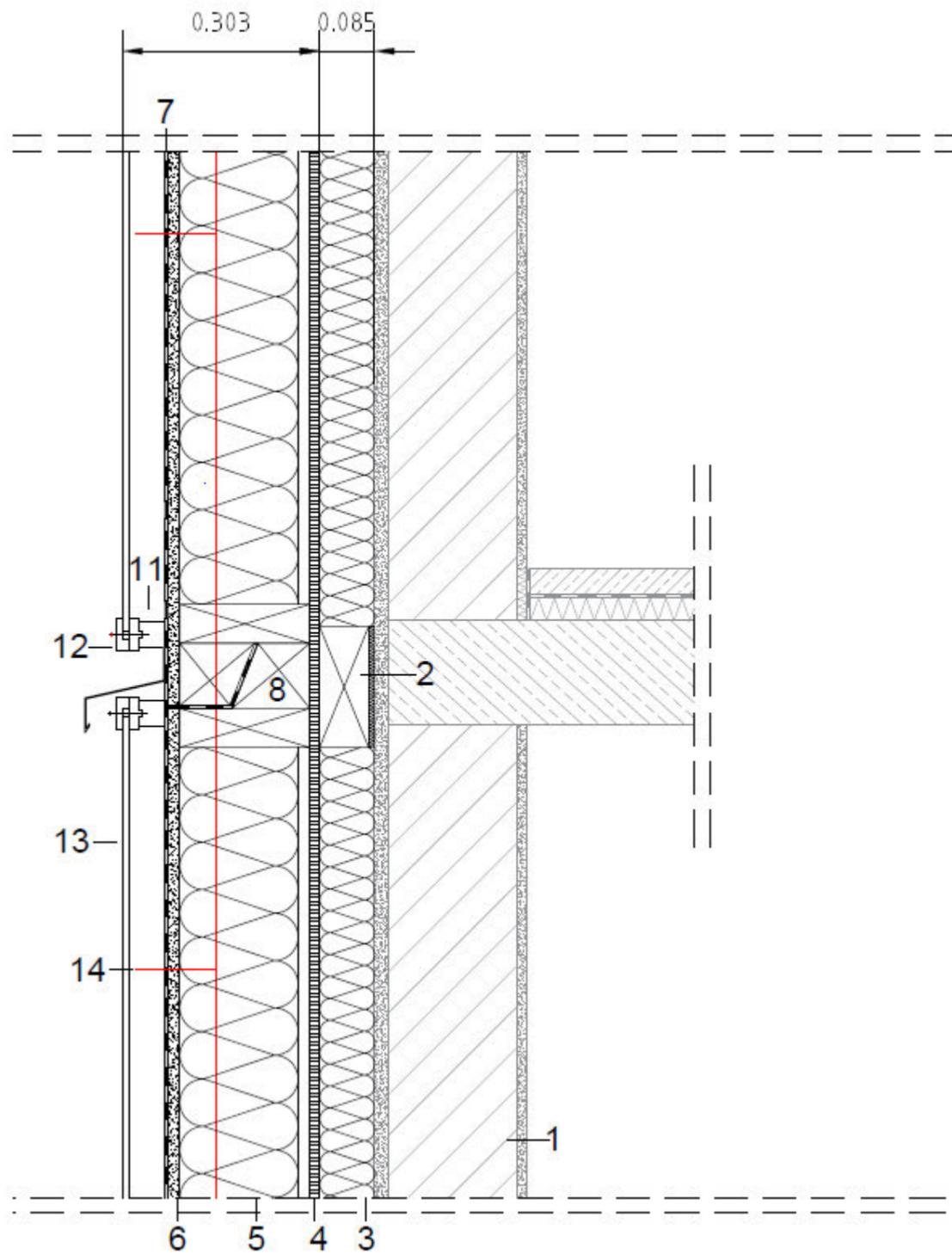
- 1 Aufbau Dach:
Stahlbeton
Wärmedämmung 120 mm
Dachabdichtung
- 2 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 3 Bauchbinde
- 4 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 5 OSB Platte 15 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Mineralwolle 180 mm
- 8 Gipsfaserplatte 18 mm
- 9 Winddichtung
- 10 Modultragprofil
- 11 Laminatklemme
- 12 PV-Modul
- 13 Geteilte Schwelle KVH Fichte

Abbildung A 11 Detail – Attikaelement Schacht – GES-Photovoltaik – Schnitt (maßstabslos)



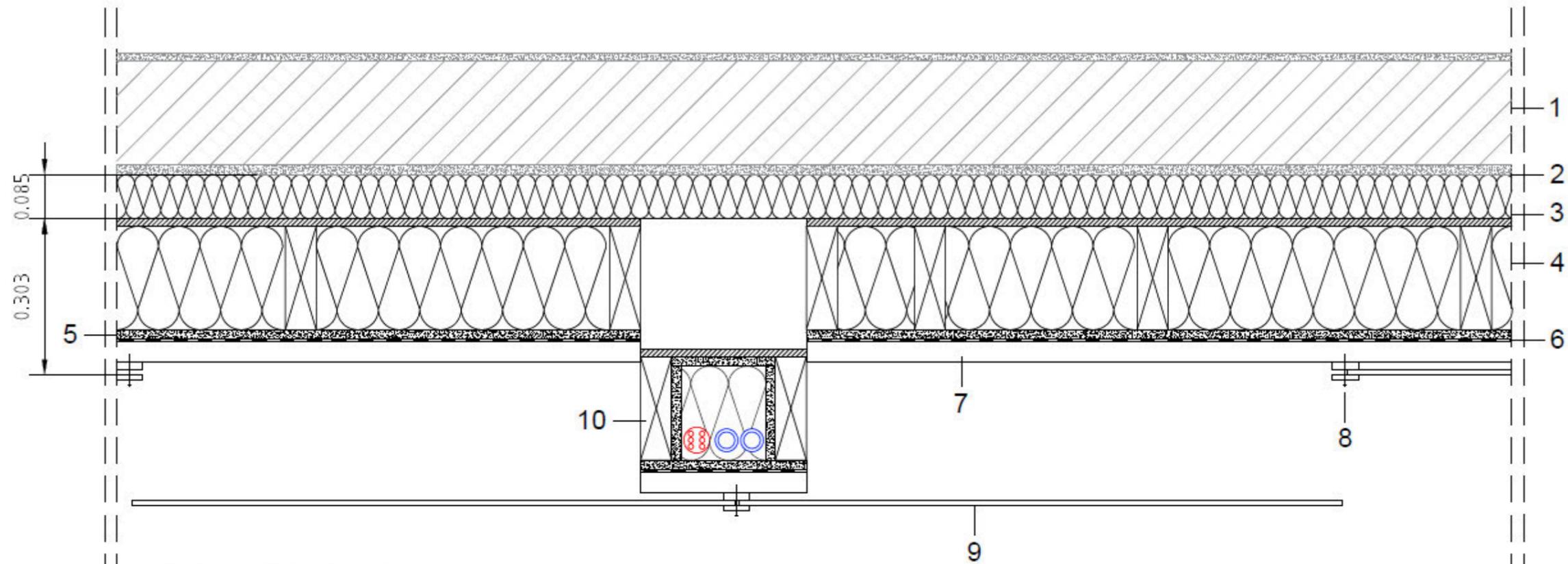
- 1 Aufbau Dach:
Stahlbeton
Wärmedämmung 120 mm
Dachabdichtung
- 2 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 3 Bauchbinde
- 4 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 5 OSB Platte 15 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Mineralwolle 180 mm
- 8 Leerrohr für PV-Anschluss
- 9 Gipsfaserplatte 18 mm
- 10 Winddichtung
- 11 Modultragprofil
- 12 Laminatklemme
- 13 PV-Modul
- 14 Leerrohr für Verkabelung PV

Abbildung A 12 Detail – Elementstoß Schacht – GES-Photovoltaik – Schnitt (maßstabslos)



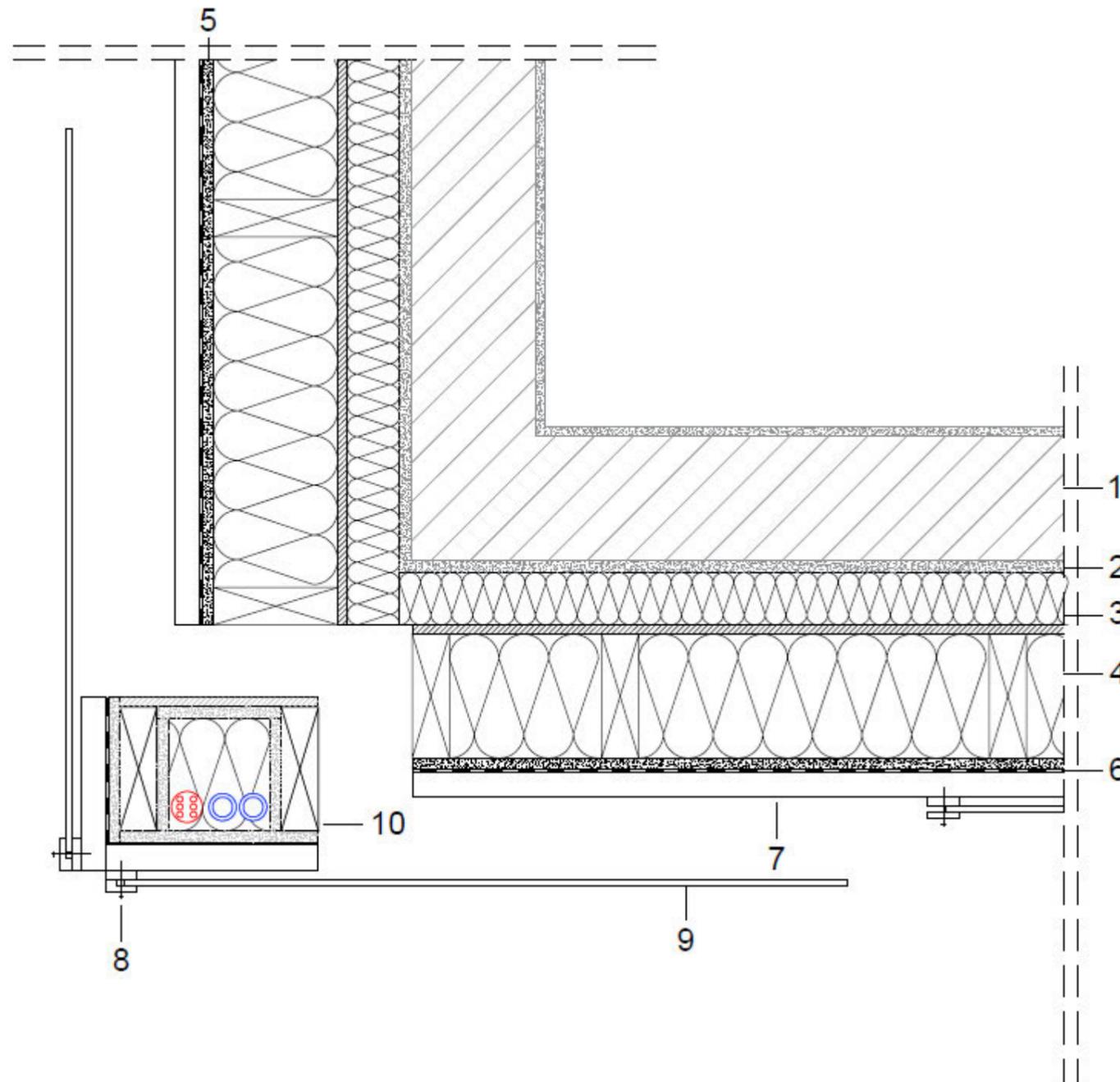
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Bauchbinde
- 3 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 4 OSB Platte 15 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Mineralwolle 180 mm
- 7 Zuleitung Wasser
- 9 Gipsfaserplatte 18 mm
- 10 Winddichtung
- 11 Modultragprofil
- 12 Laminatklemme
- 13 PV-Modul
- 14 Leerrohr für Verkabelung PV

Abbildung A 13 Detail – Elementstoß Schacht – GES-Photovoltaik – Grundriss (maßstabslos)



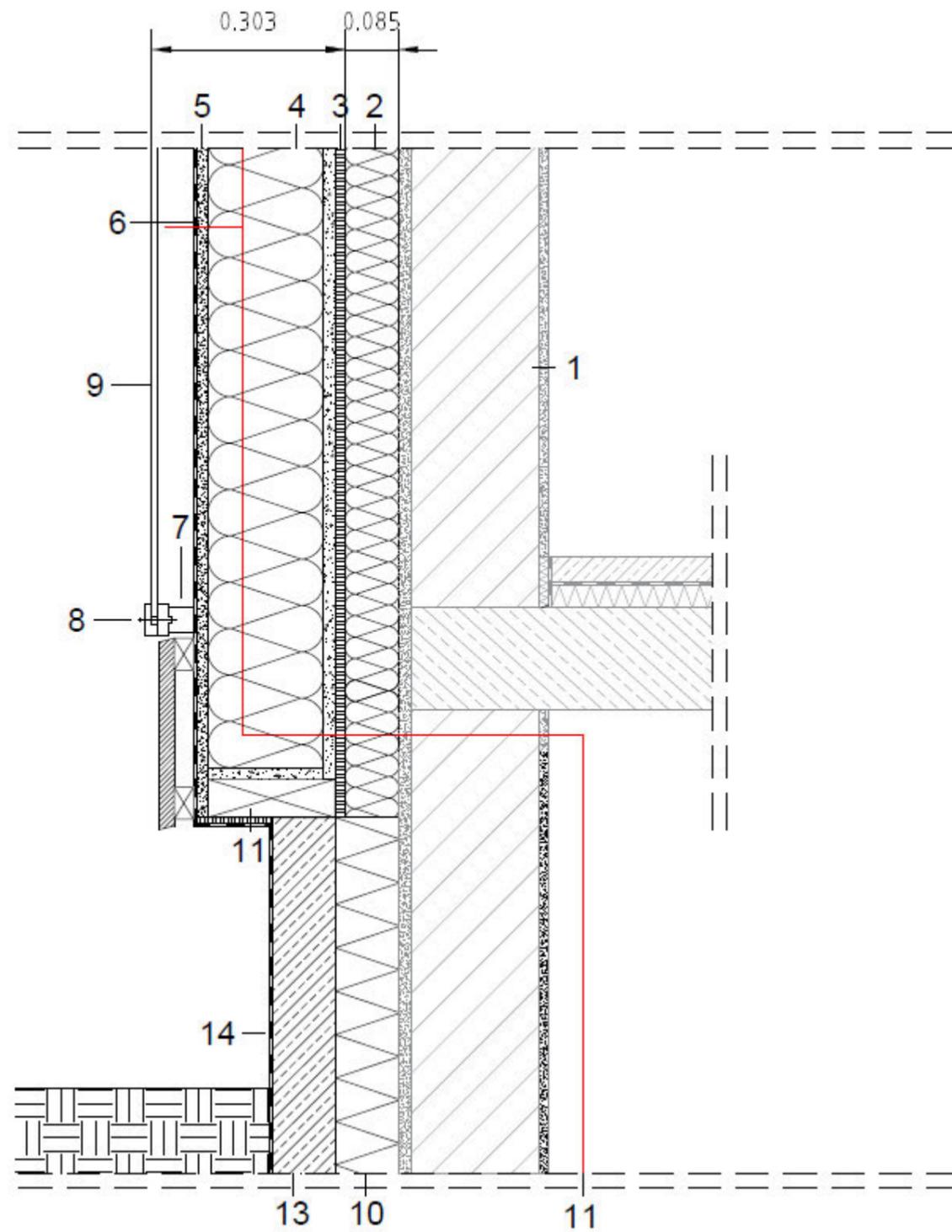
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Modultragprofil
- 8 Laminatklemme
- 9 PV-Modul
- 10 Schachtelement
Blau = Zu- und Ablauf Wasser
Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A 14 Detail – Elementstoß Schacht Gebäudeecke – GES-Photovoltaik – Grundriss (maßstabslos)



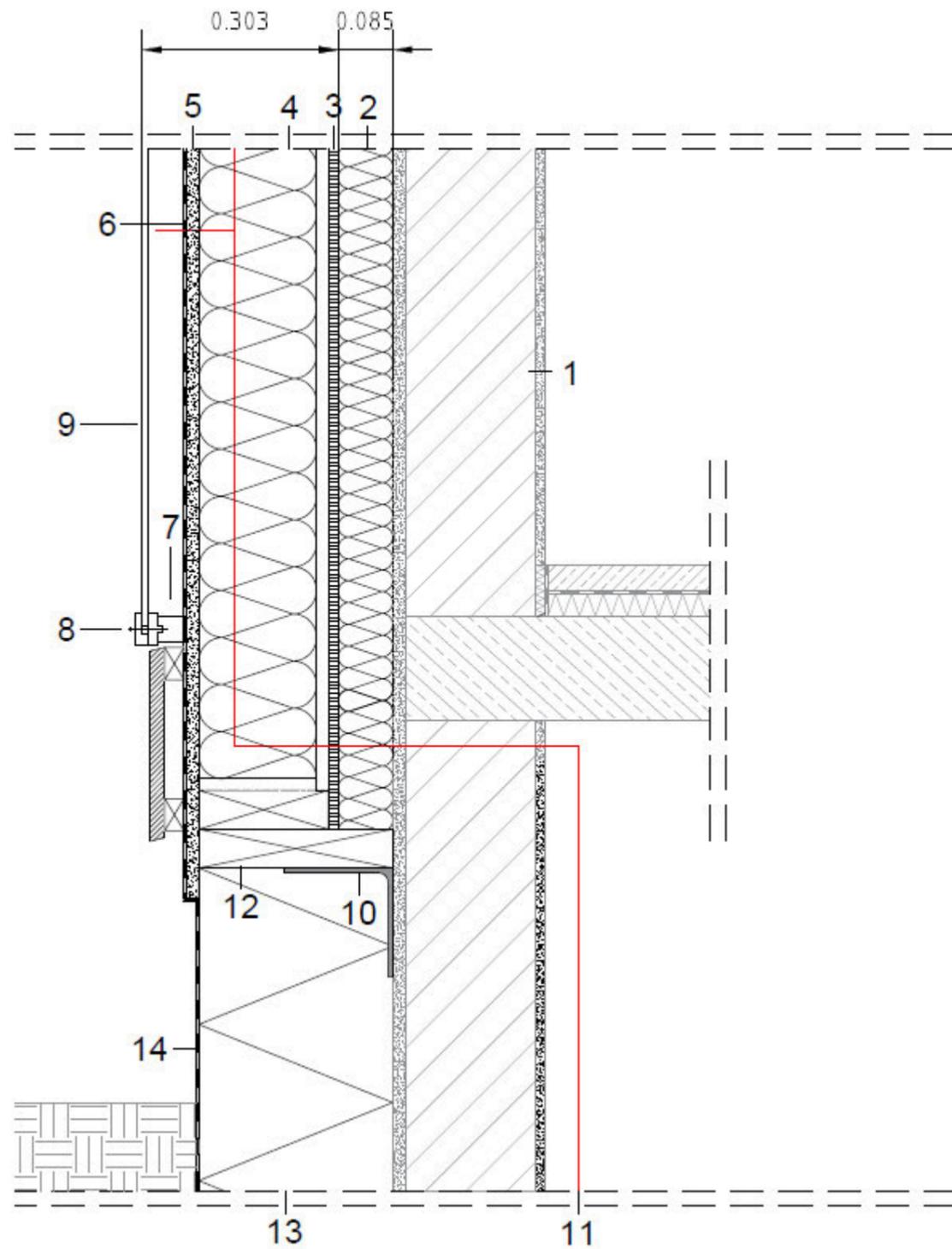
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Modultragprofil
- 8 Laminatklemme
- 9 PV-Modul
- 10 Schachtelement
Blau = Zu- und Ablauf Wasser
Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A 15 Detail – Sockelelement Schacht – GES-Photovoltaik – Schnitt (maßstabslos)



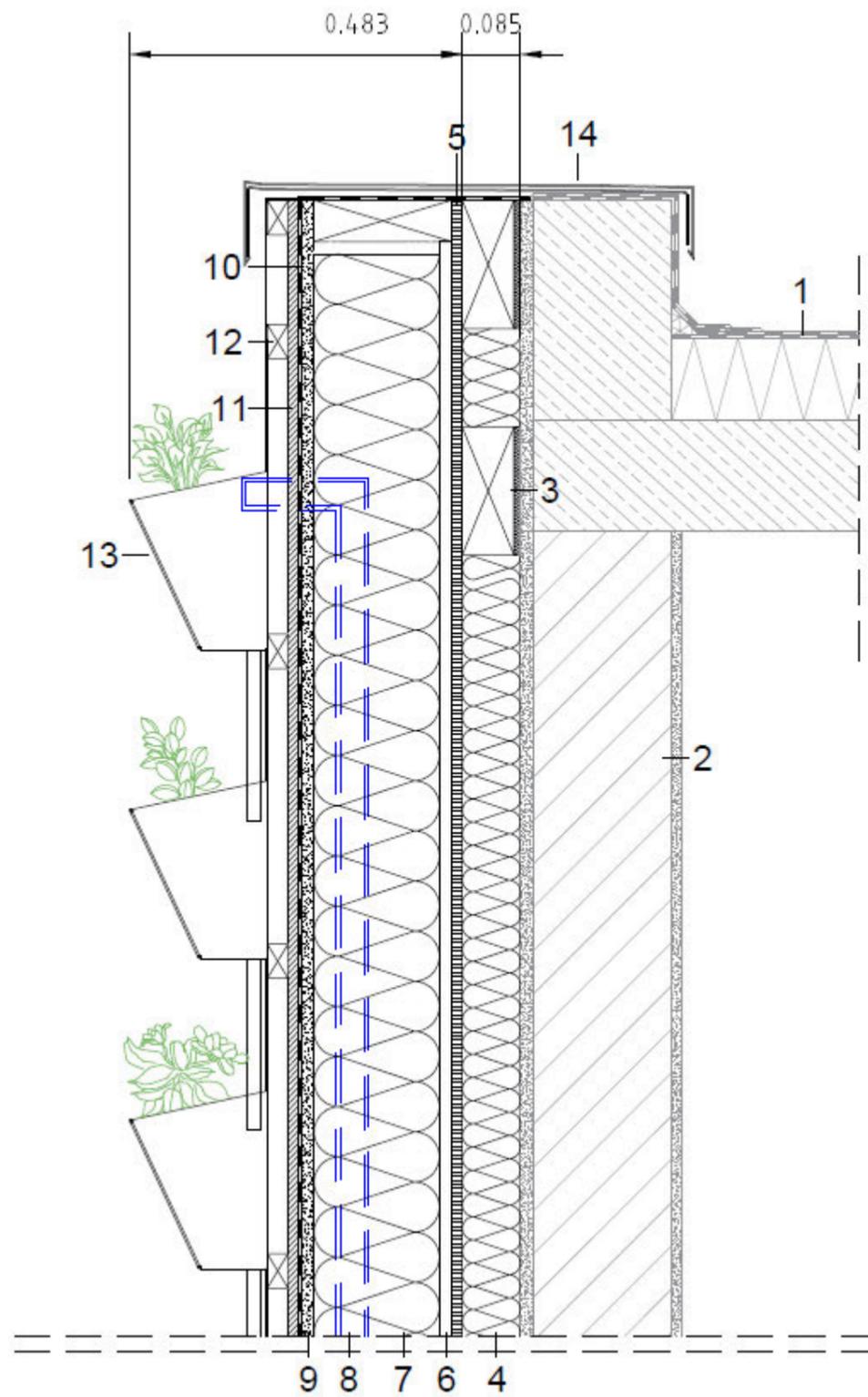
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Modultragprofil
- 8 Laminatklemme
- 9 PV-Modul
- 10 Ausgleichsdämmung
- 11 Leerrohr für Verkabelung PV-Module
- 12 Schwelle KVH Fichte
- 13 Betonsockel
- 14 Sockelabdichtung

Abbildung A 16 Detail – Sockelelement Schacht – GES-Photovoltaik – Schnitt (maßstabslos)



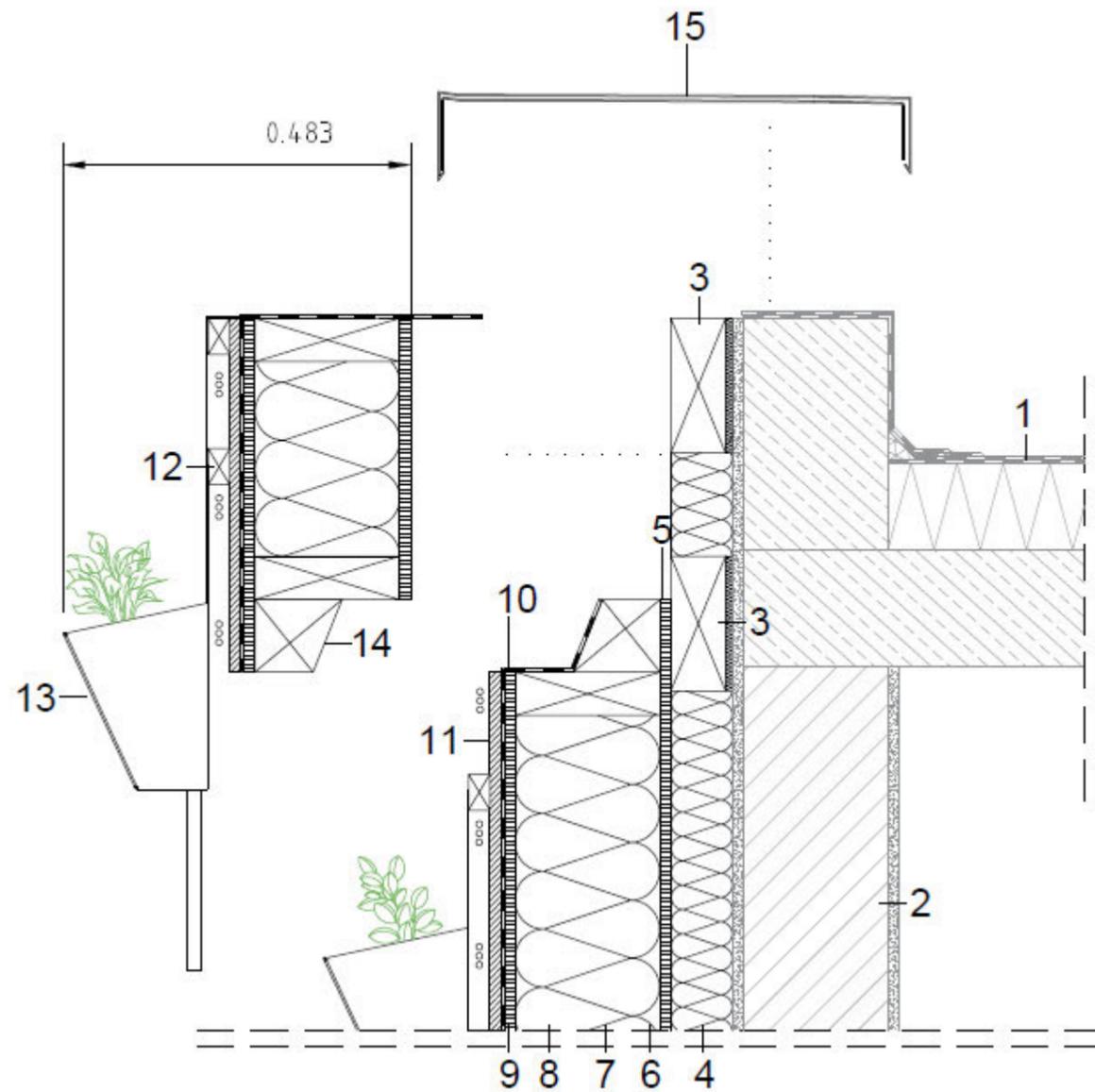
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Modultragprofil
- 8 Laminatklemme
- 9 PV-Modul
- 10 Stahlkonsole als Auflager für HRBW
- 11 Leerrohr für Verkabelung PV-Module
- 12 Schwelle KVH Fichte
- 13 Sockeldämmung
- 14 Sockelabdichtung

Abbildung A 17 Detail – Attika Rinnensystem – Schacht mit Leitungsführung – Schnitt (maßstabslos)



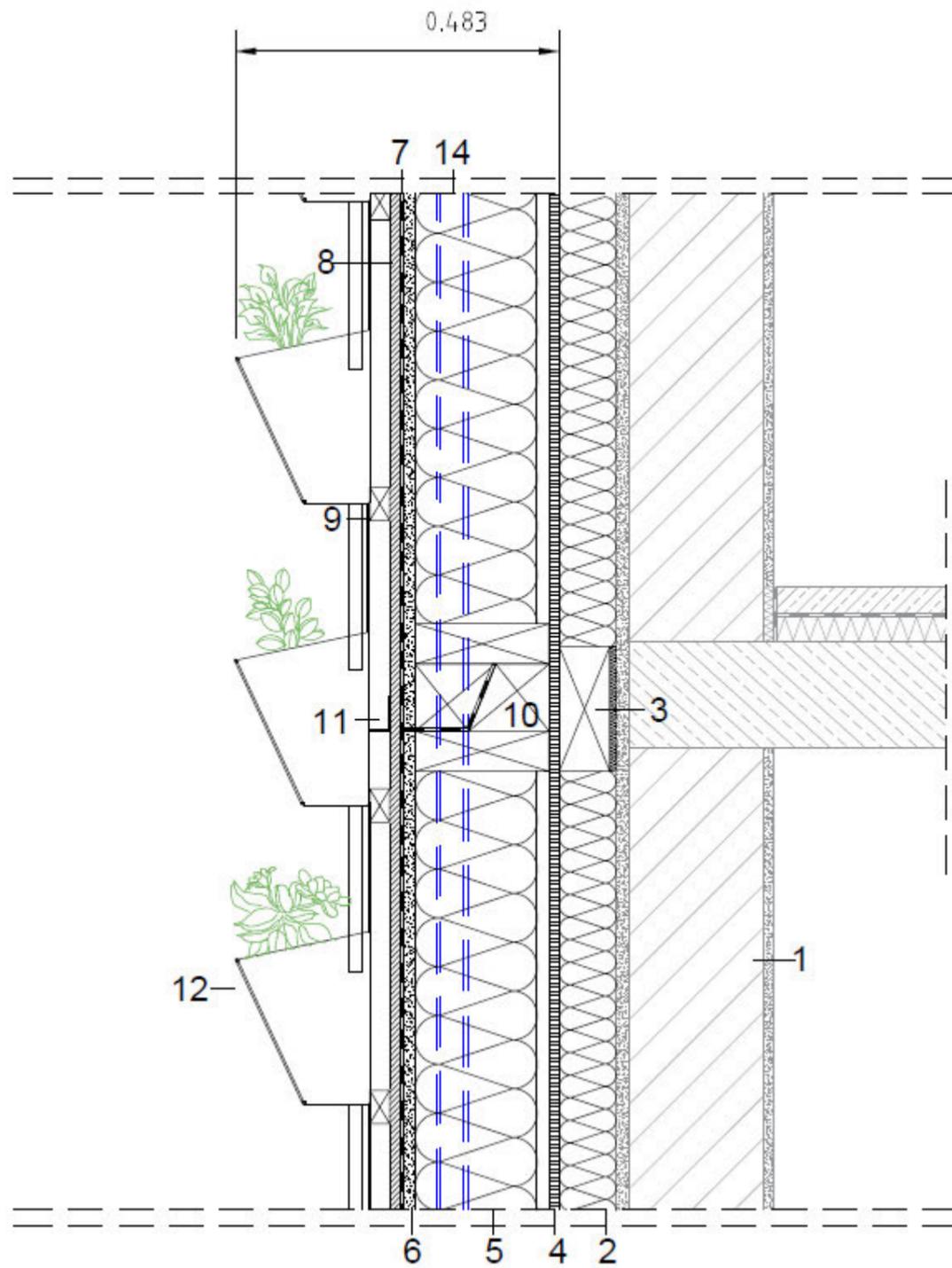
- 1 Aufbau Dach:
Stahlbeton
Wärmedämmung 120 mm
Dachabdichtung
- 2 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 3 Bauchbinde
- 4 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 5 OSB Platte 15 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Mineralwolle 180 mm
- 8 Zuleitung Wasser
- 9 Gipsfaserplatte 18 mm
- 10 Winddichtung OMEGA WD
- 11 Vertikallattung 15 mm
- 12 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 13 Rinnensystem Edelstahl
- 14 Attikablech

Abbildung A 18 Detail – Attika Rinnensystem – Stoß – Schnitt (maßstabslos)



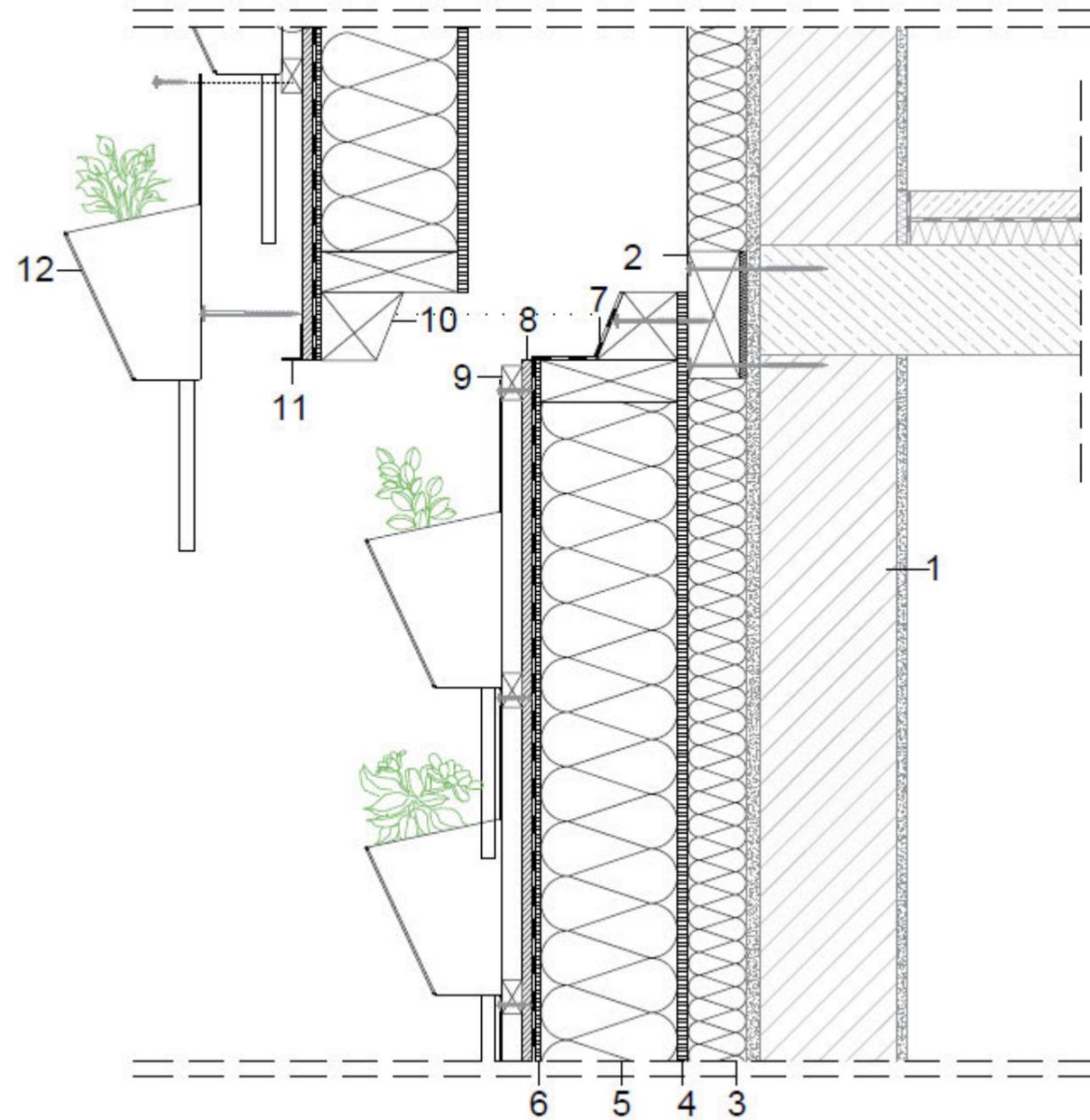
- 1 Aufbau Dach:
Stahlbeton
Wärmedämmung 120 mm
Dachabdichtung
- 2 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 3 Bauchbinde
- 4 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 5 OSB Platte 15 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Mineralwolle 180 mm
- 8 Zuleitung Wasser
- 9 Gipsfaserplatte 18 mm
- 10 Winddichtung
- 11 Vertikallattung 15 mm
- 12 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 13 Rinnensystem Edelstahl
- 14 Geteilte Schwelle Fichte
- 15 Attikablech

Abbildung A 19 Detail – Rinnensystem Elementstoß – Schacht – Schnitt (maßstabslos)



- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 Bauchbinde KVH Fichte
- 4 OSB Platte 15 mm
- 5 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Winddichtung
- 8 Vertikallattung 15 mm
- 9 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 10 Geteilte Schwelle Fichte
- 11 Brandschutzblech
- 12 Rinnensystem Edelstahl
- 14 Zulauf Wasser für Bewässerung

Abbildung A 20 Detail – Rinnensystem Elementstoß – Schnitt (maßstabslos)



- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Bauchbinde KVH Fichte
- 3 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 4 OSB Platte 15 mm
- 5 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Winddichtung
- 8 Vertikallattung 15 mm
- 9 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 10 Geteilte Schwelle Fichte
- 11 Brandschutzblech
- 12 Rinnensystem Edelstahl

Abbildung A 21 Detail – Rinnensystem - Gebäudeecke – Grundriss (maßstabslos)

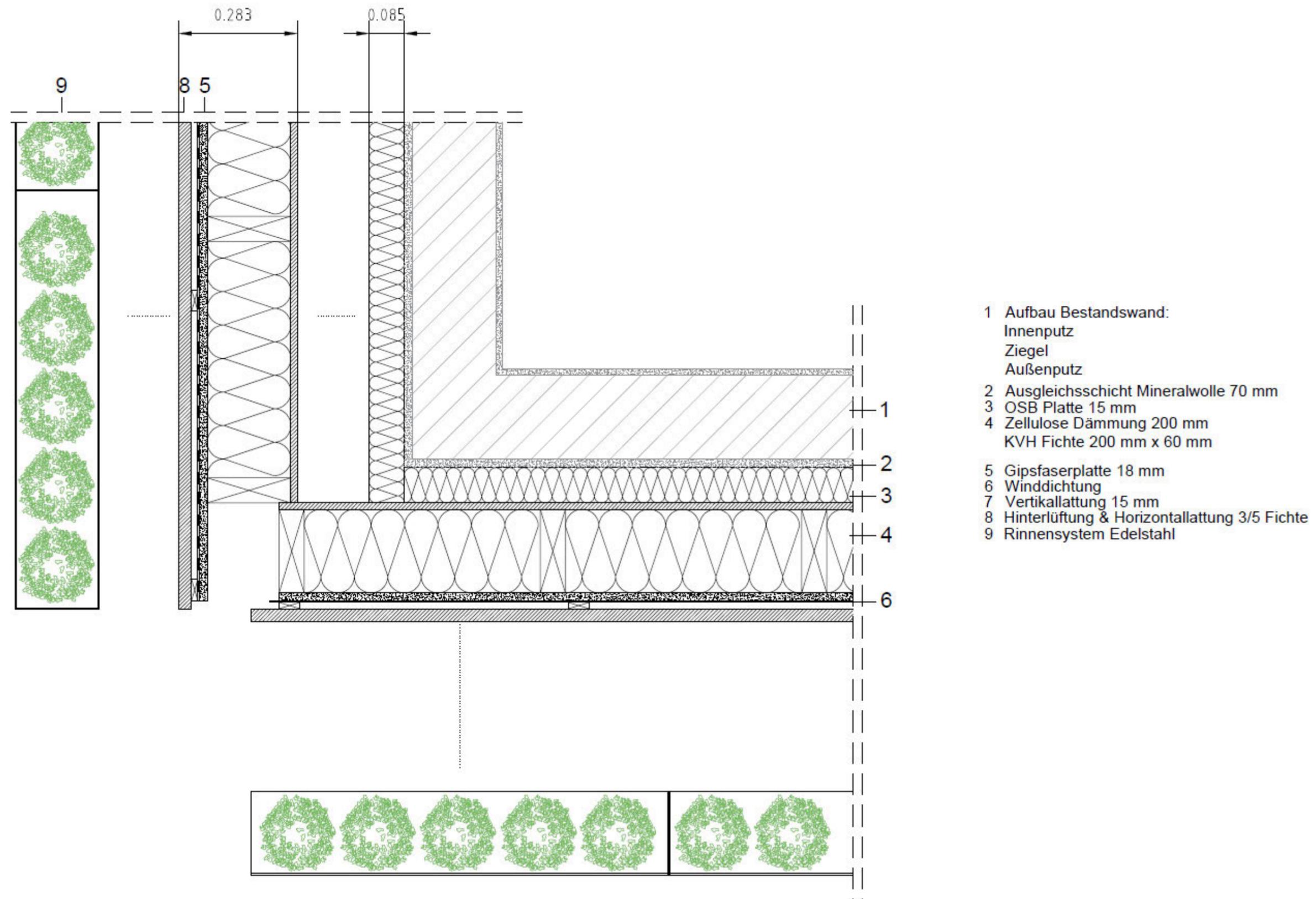
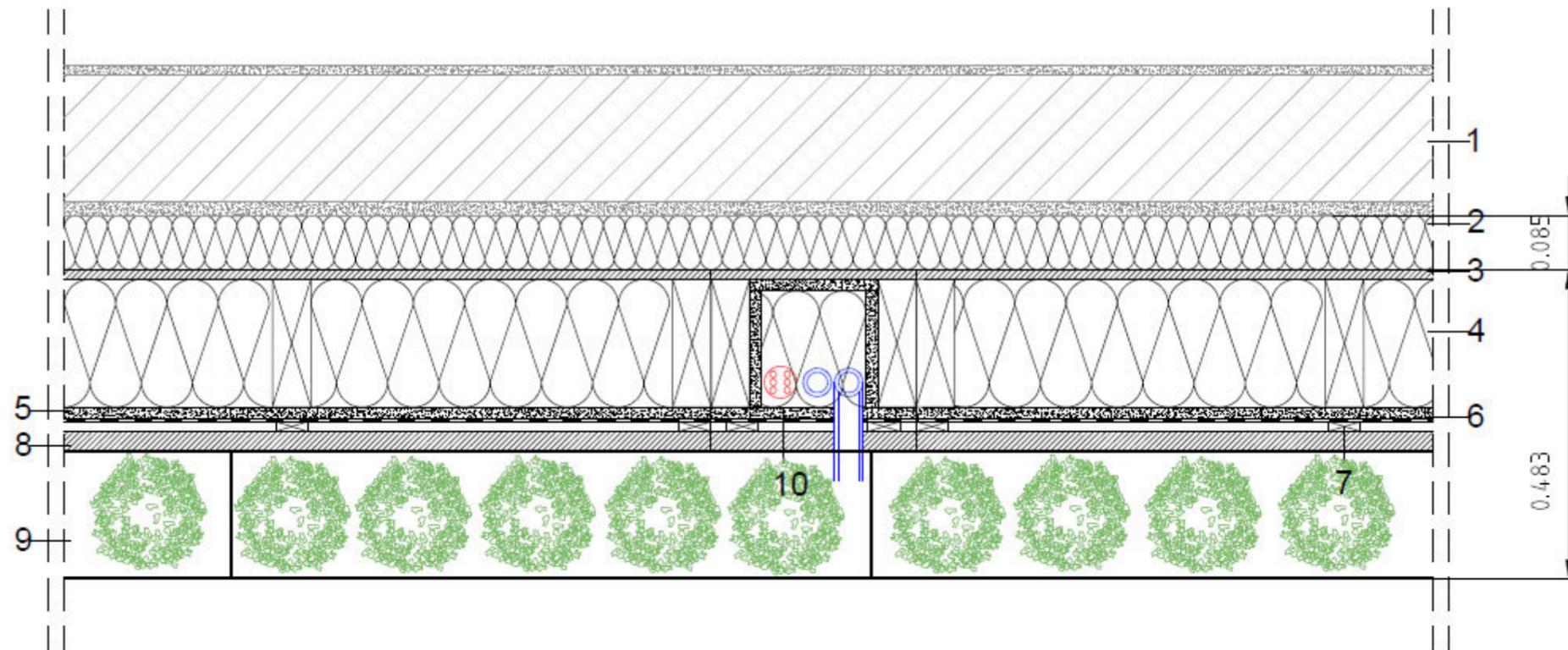
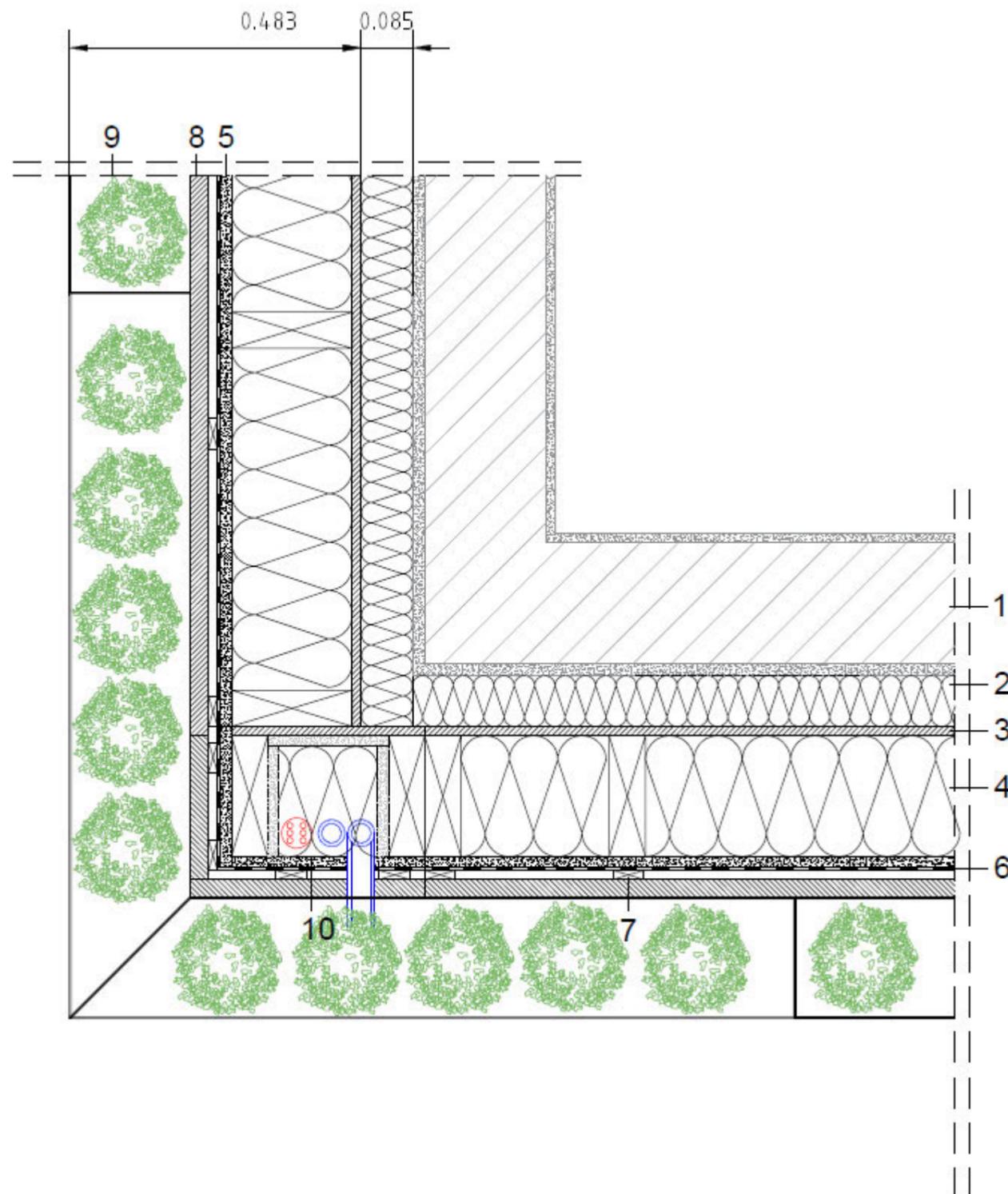


Abbildung A 22 Detail – Rinnensystem - Gebäudeecke – Grundriss (maßstabslos)



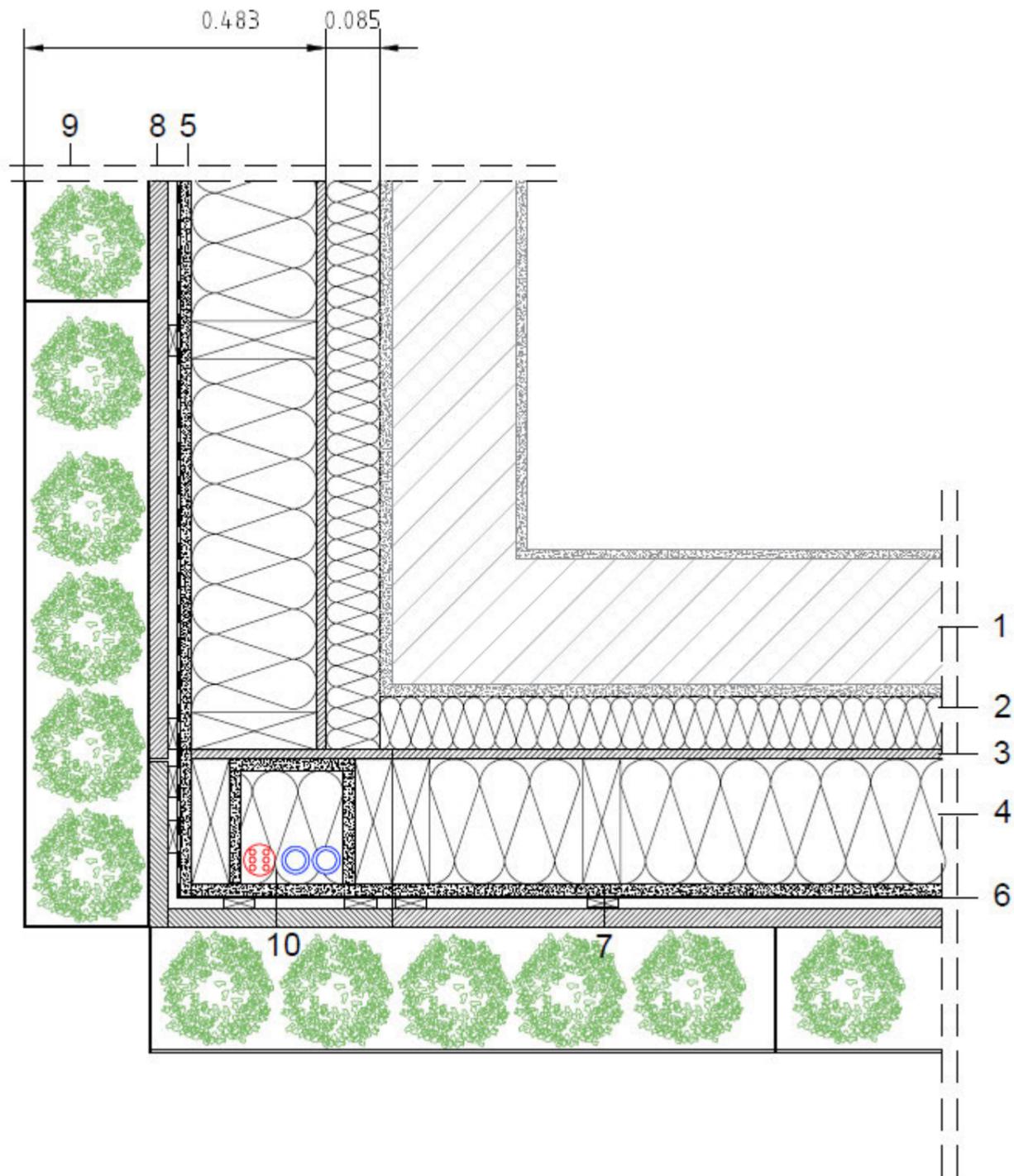
- 1 Aufbau Bestandswand:
 Innenputz
 Ziegel
 Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
 KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Rinnensystem Edelstahl
- 10 Schachtelement
 Blau = Zu- und Ablauf Wasser
 Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A 23 Detail – Rinnensystem – Gebäudeecke - Schacht – Grundriss (maßstabslos)



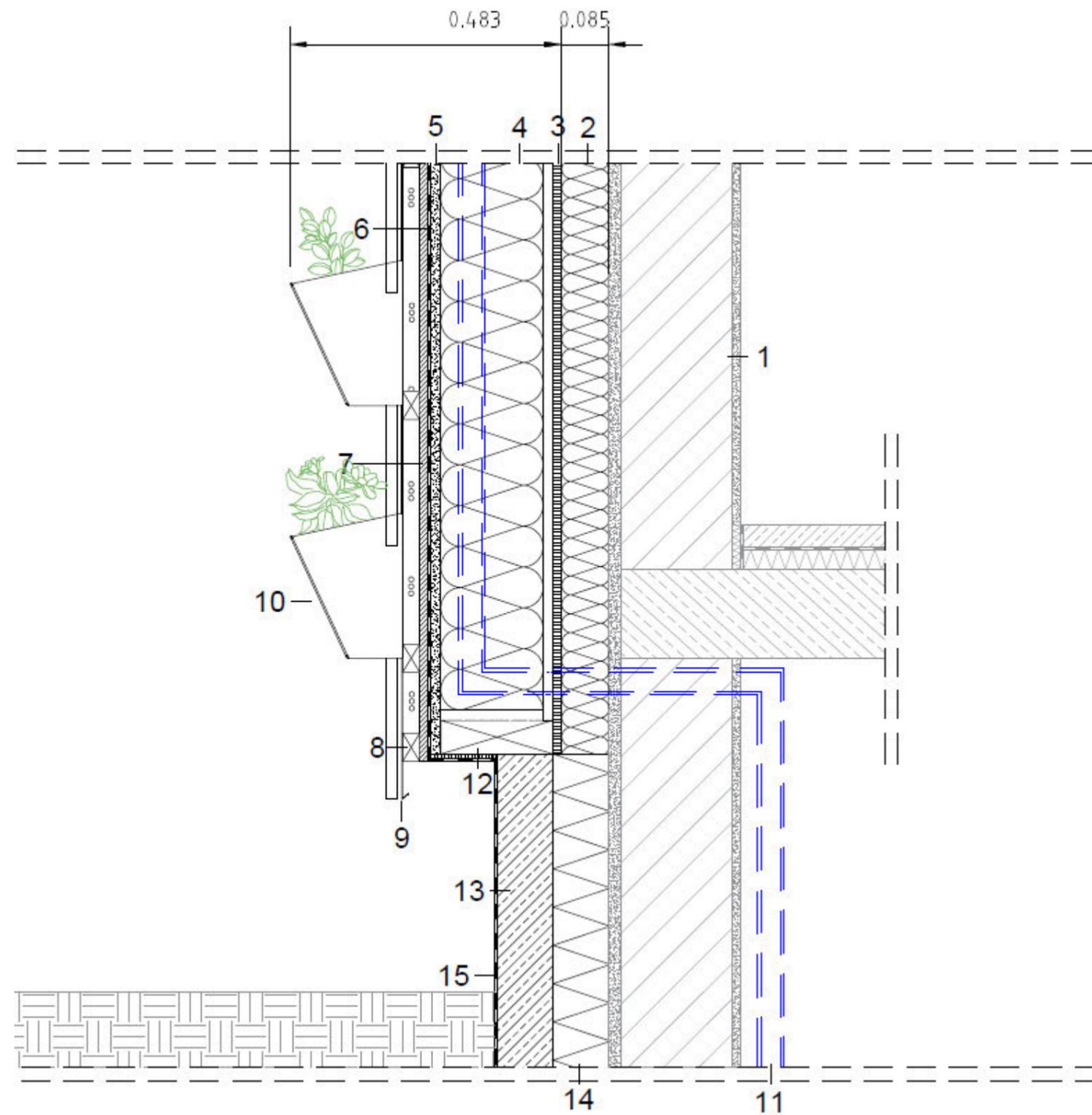
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Rinnensystem Edelstahl
- 10 Schachtelement
Blau = Zu- und Ablauf Wasser
Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A 24 Detail – Rinnensystem – Gebäudeecke - Schacht – Grundriss (maßstabslos)



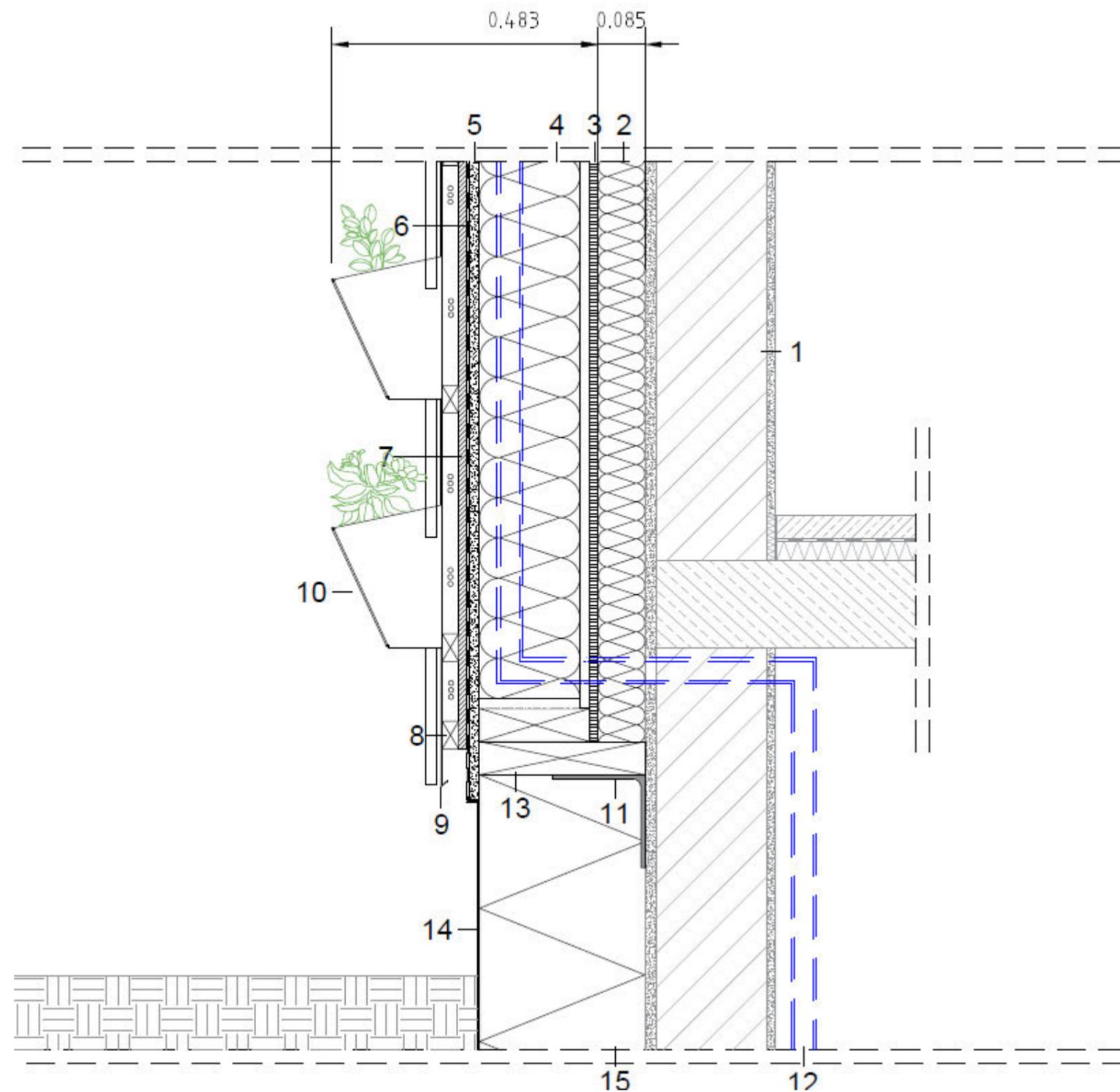
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 Pfeilerer Living Board 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Rinnensystem Edelstahl
- 10 Schachtelement
Blau = Zu- und Ablauf Wasser
Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A 25 Detail – Rinnensystem – Sockel – Schacht – Schnitt (maßstabslos)



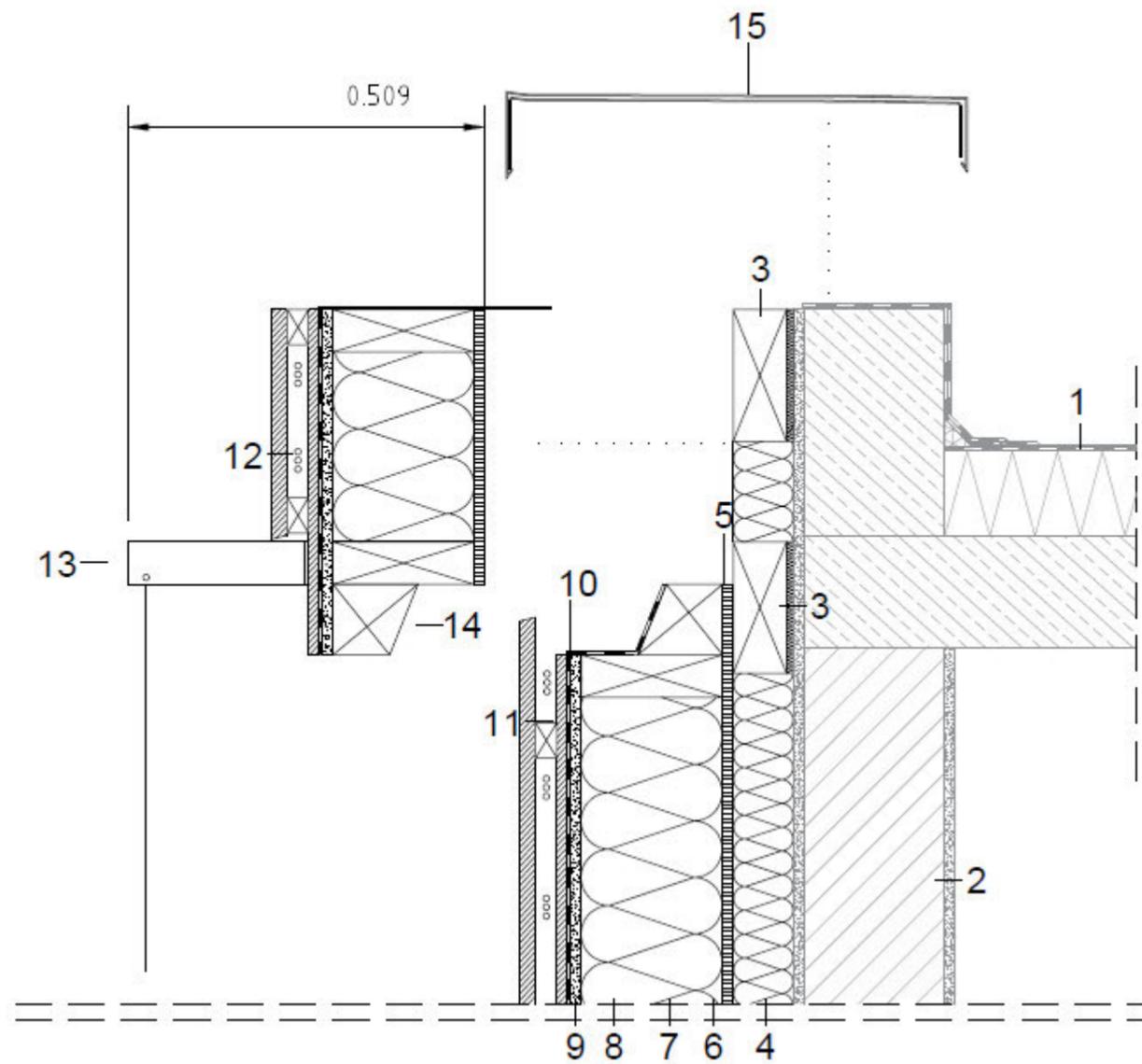
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Edelstahl Abtropfblech
- 10 Rinnensystem Edelstahl
- 11 Zulauf Wasser für Bewässerung
- 12 Schwelle KVH Fichte
- 13 Betonsockel
- 14 Ausgleichsdämmung
- 15 Sockelabdichtung

Abbildung A 26 Detail – Rinnensystem – Sockel – Schacht – Schnitt (maßstabslos)



- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Edelstahl Abtropfblech
- 10 Rinnensystem Edelstahl
- 11 Stahlkonsole als Auflager für HRBW
- 12 Zulauf Wasser für Bewässerung
- 13 Schwelle KVH Fichte
- 14 Sockeldämmung
- 15 Sockelabdichtung

Abbildung A 27 Detail – Trogsystem - Attikaelement – Schnitt (maßstabslos)



- 1 Aufbau Dach:
Stahlbeton
Wärmedämmung 120 mm
Dachabdichtung
- 2 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 3 Bauchbinde
- 4 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 5 OSB Platte 15 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Mineralwolle 180 mm
- 8 Zuleitung Wasser
- 9 Gipsfaserplatte 18 mm
- 10 Winddichtung
- 11 Vertikallattung 15 mm
- 12 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 13 Stahlschwert zur Seilbefestigung
- 14 Geteilte Schwelle Fichte
- 15 Attikablech

Abbildung A 29 Detail – Trogsystem – Elementstoß – Schnitt (maßstabslos)

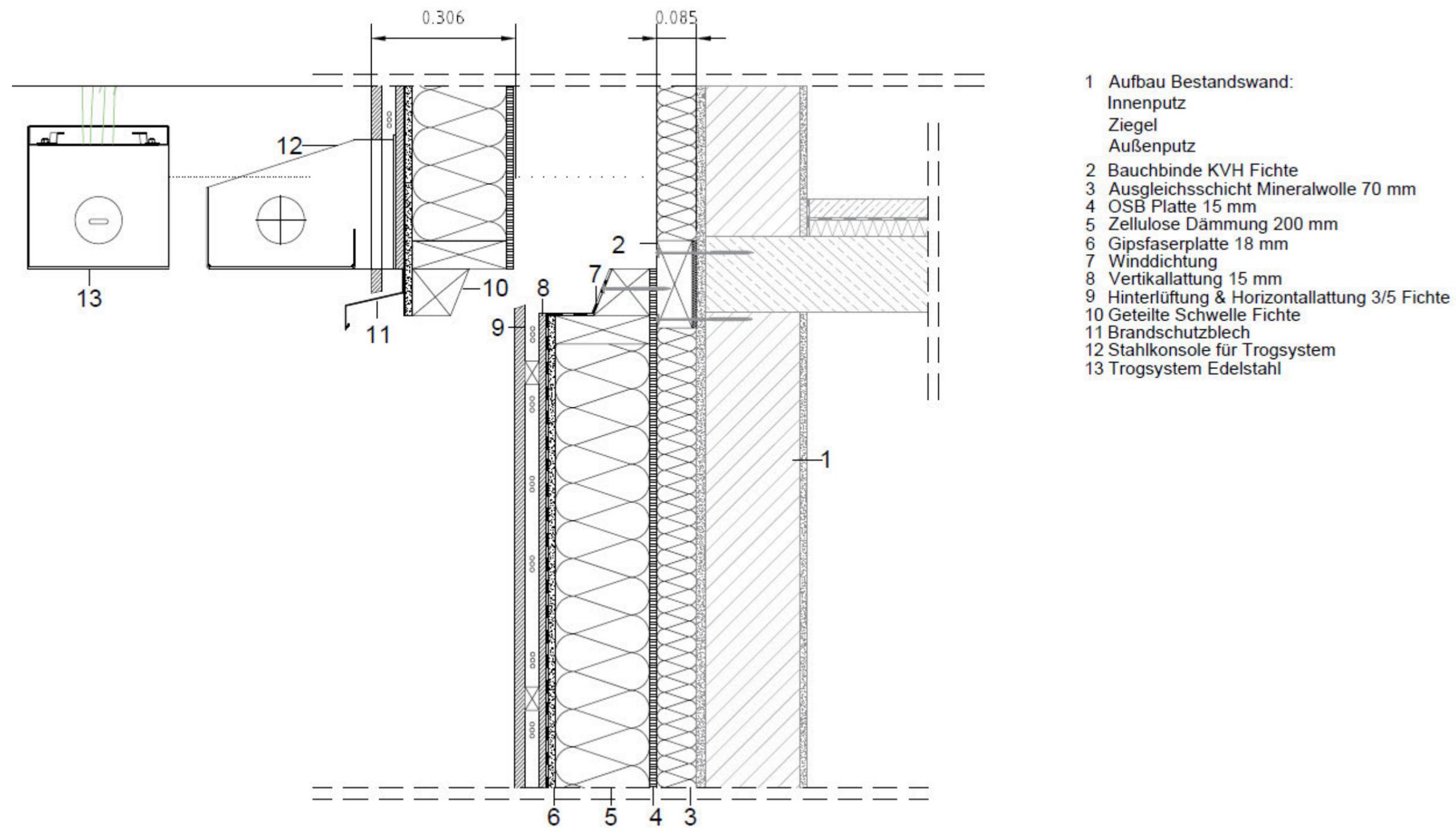
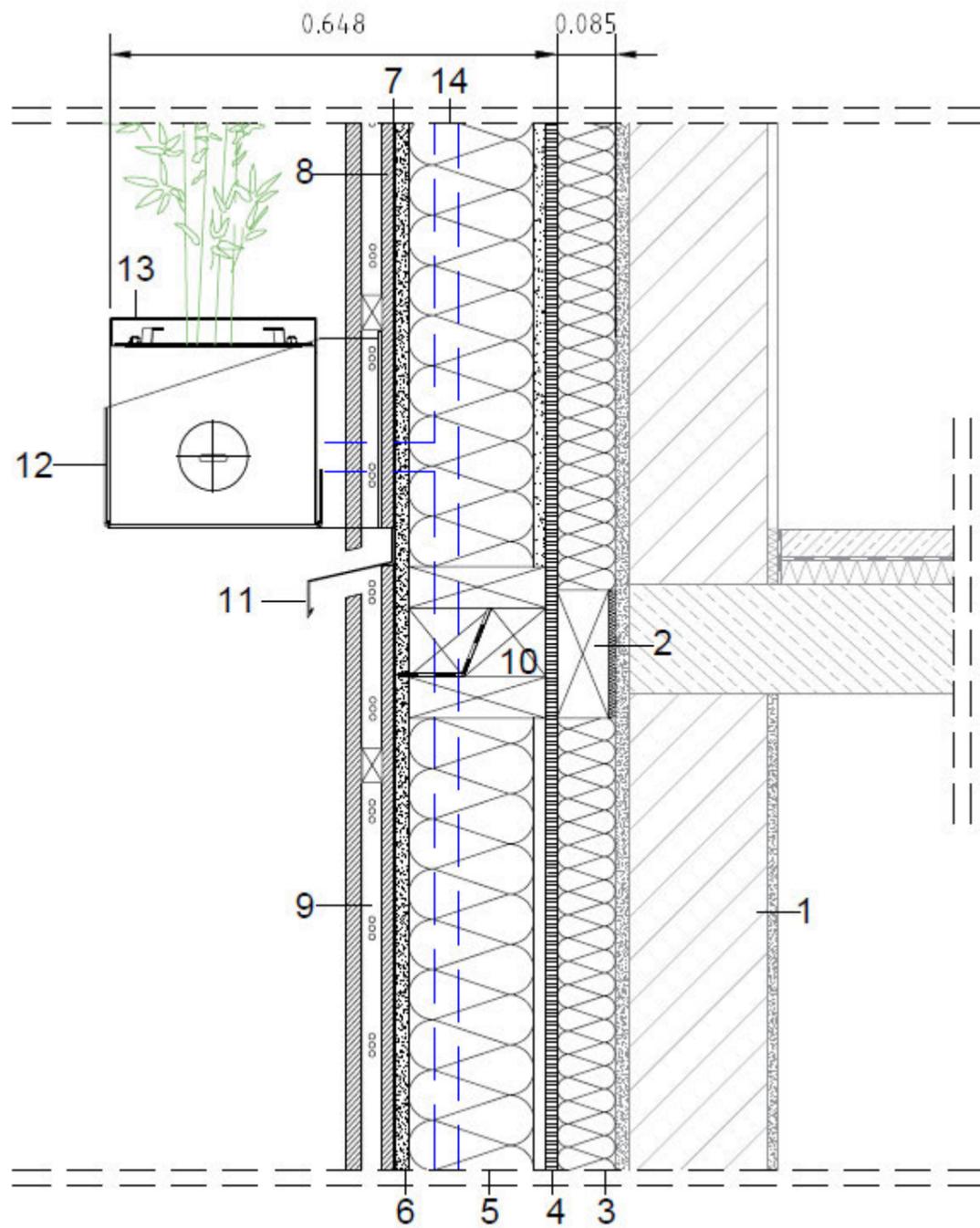
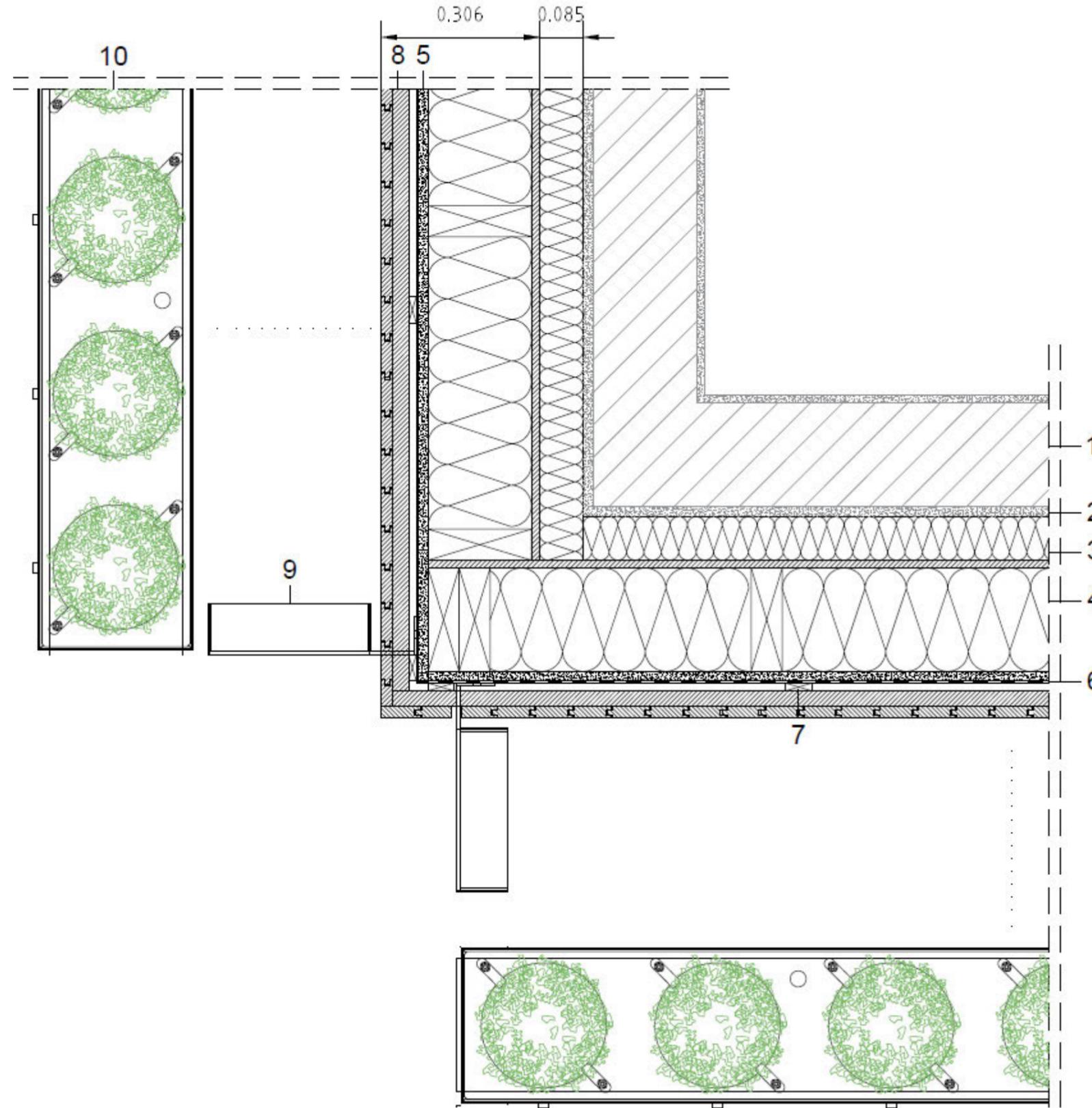


Abbildung A 30 Detail – Trogsystem – Elementstoß – Schacht – Schnitt (maßstabslos)



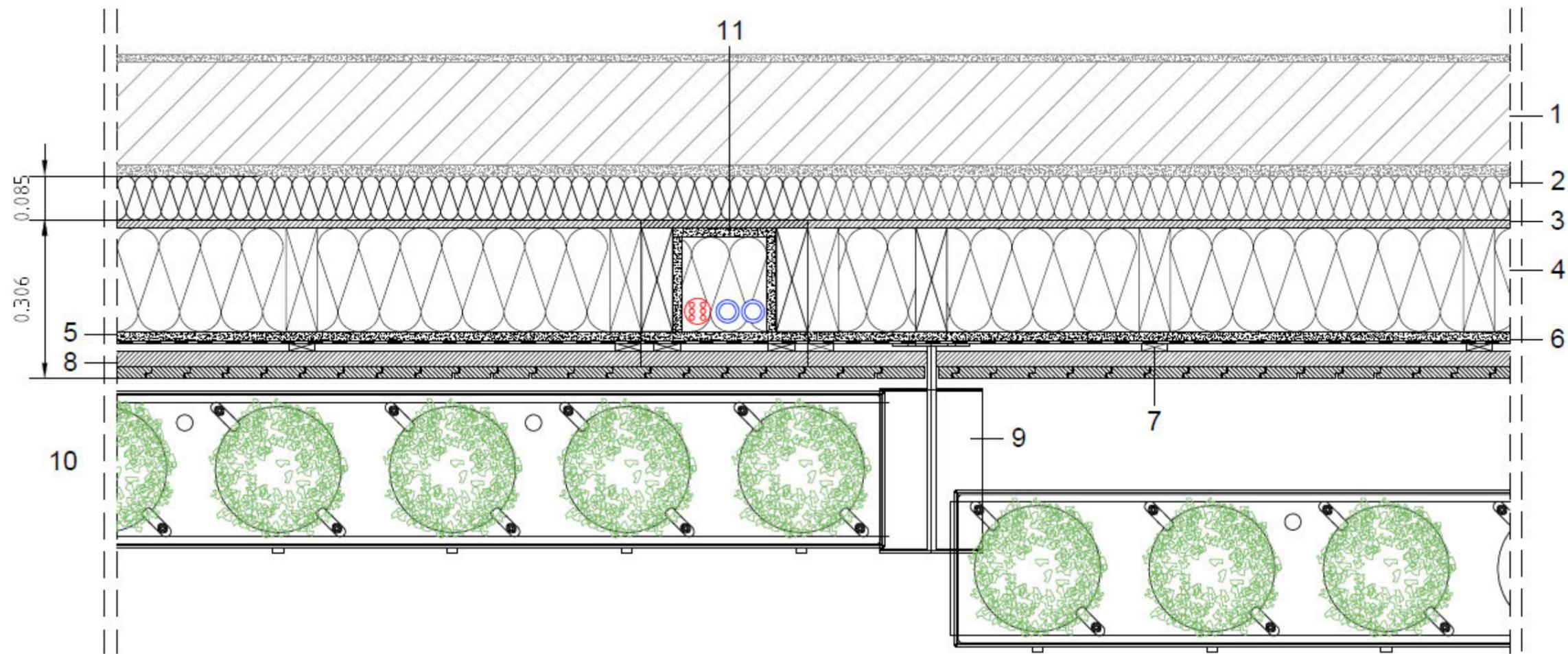
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Bauchbinde KVH Fichte
- 3 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 4 OSB Platte 15 mm
- 5 Zellulose Dämmung 200 mm
- 6 Gipsfaserplatte 18 mm
- 7 Winddichtung
- 8 Vertikallattung 15 mm
- 9 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 10 Geteilte Schwelle Fichte
- 11 Brandschutzblech
- 12 Stahlkonsole für Trogsystem
- 13 Trogsystem Edelstahl
- 14 Zulauf Wasser für Bewässerung

Abbildung A 31 Detail – Trogsystem – Gebäudeecke – Grundriss (maßstabslos)



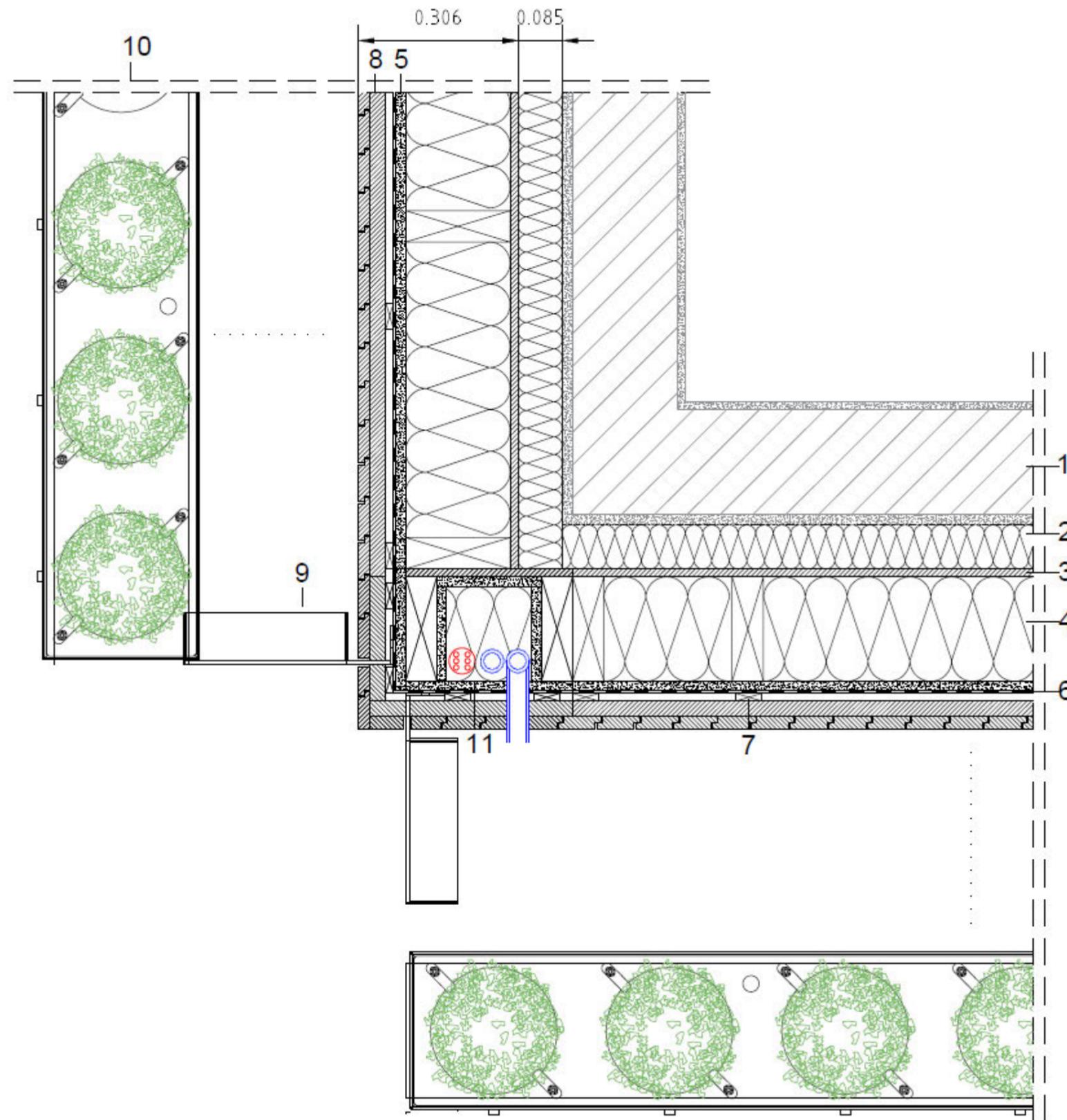
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Stahlkonsole
- 10 Trogsystem

Abbildung A 32 Detail – Trogsystem – Elementstoß – Schacht – Grundriss (maßstabslos)



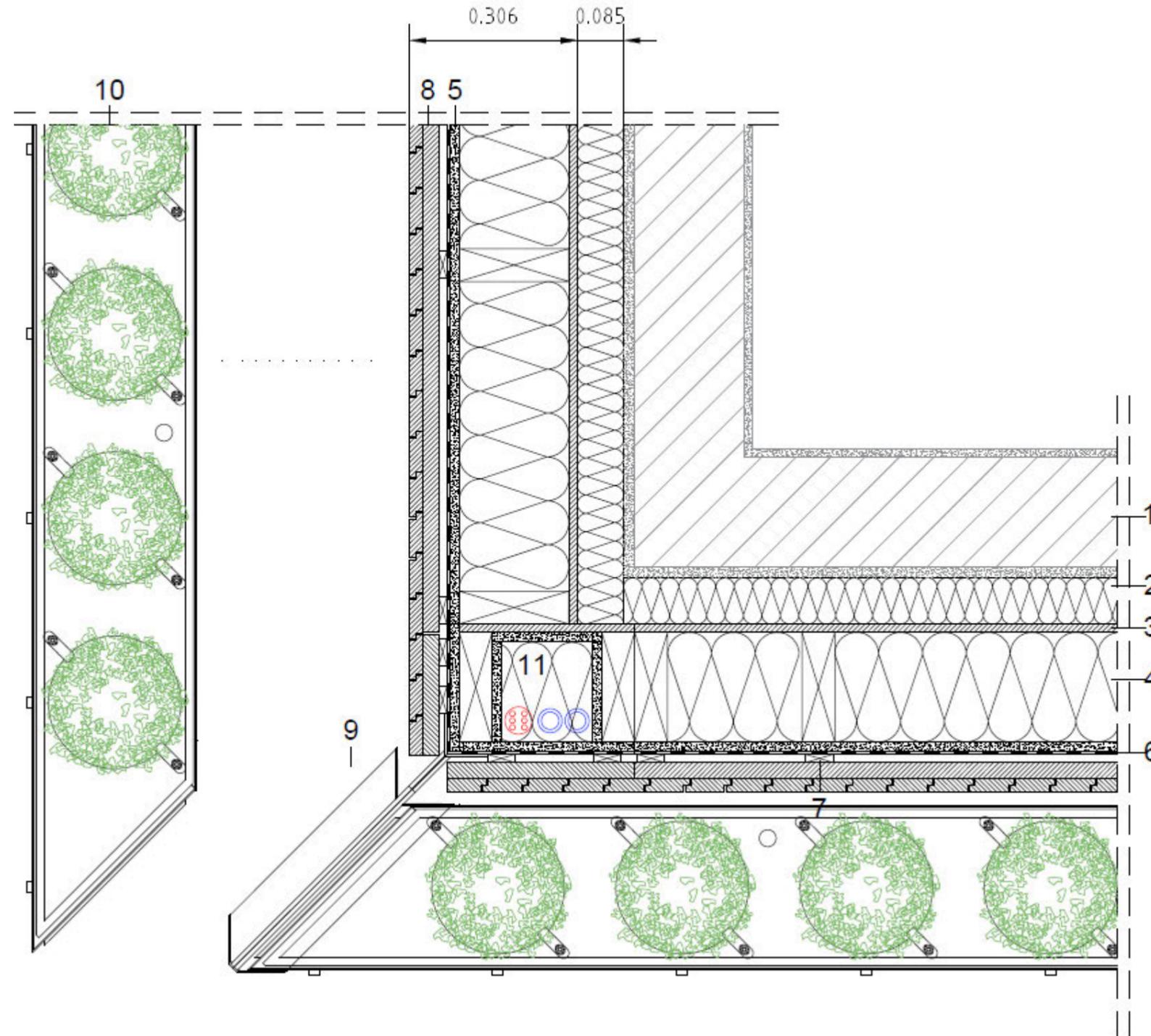
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Stahlkonsole
- 10 Trogsystem
- 11 Schachtelement
Blau = Zu- und Ablauf Wasser
Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A 33 Detail – Trogsystem – Gebäudeecke – Schacht – Grundriss (maßstabslos)



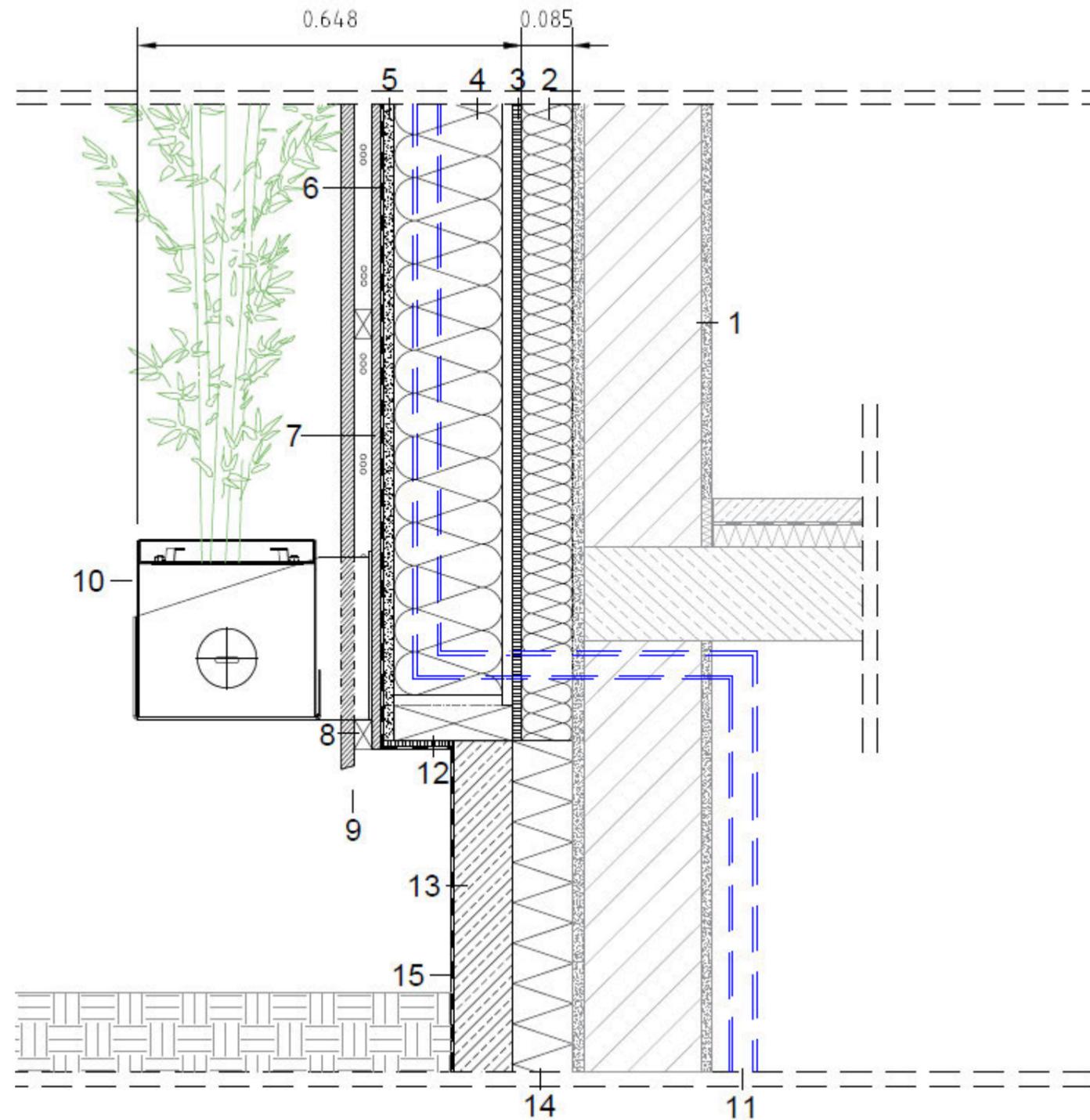
- 1 Aufbau Bestandswand:
 Innenputz
 Ziegel
 Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
 KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Stahlkonsole
- 10 Trogsystem
- 11 Schachtelement
 Blau = Zu- und Ablauf Wasser
 Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A 34 Detail – Trogsystem – Gebäudeecke – Schacht – Grundriss (maßstabslos)



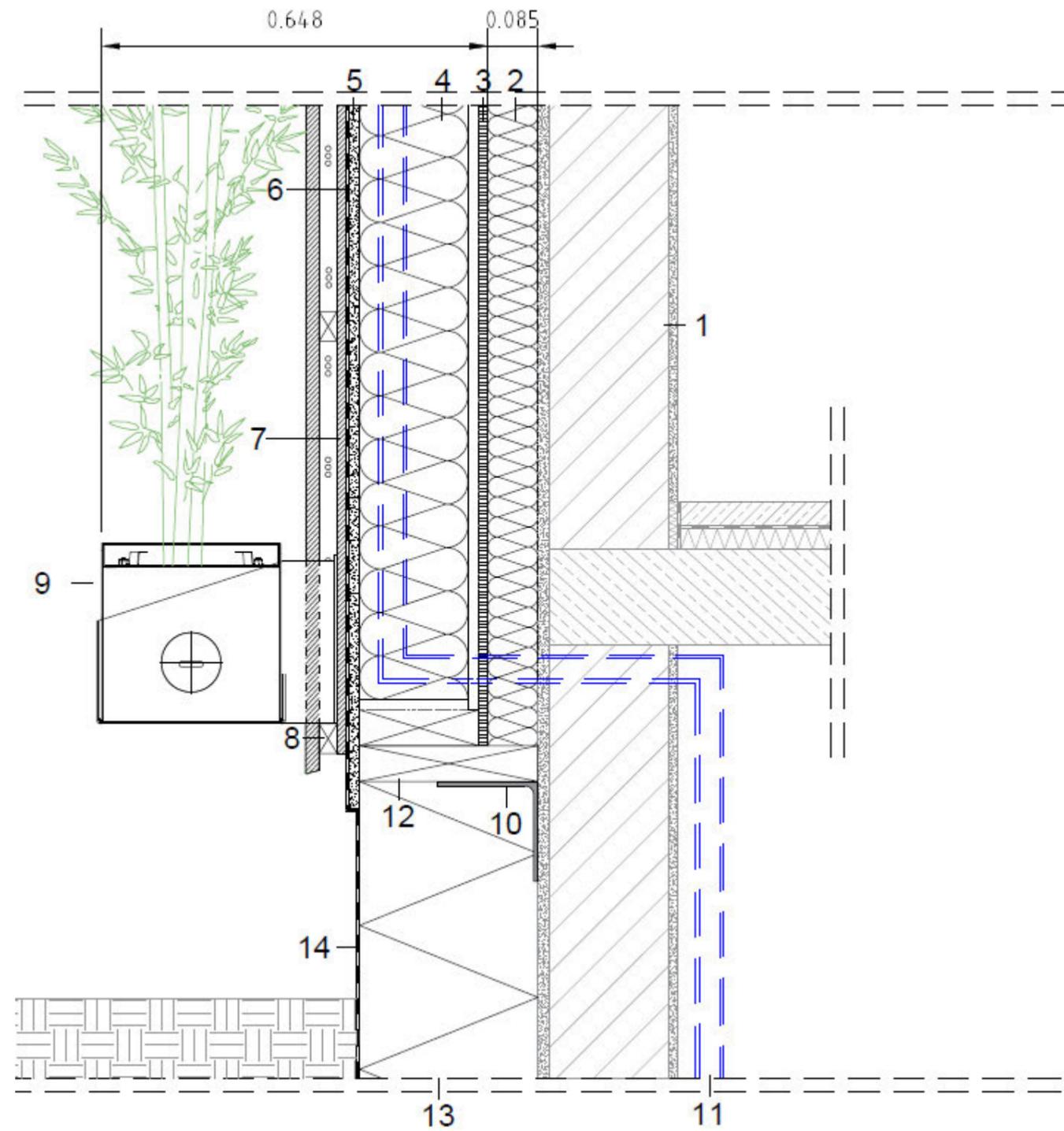
- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
KVH Fichte 200 mm x 60 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Stahlkonsole
- 10 Trogsystem
- 11 Schachtelement
Blau = Zu- und Ablauf Wasser
Rot = Leerrohre für Verkabelung PV

Abbildung A 35 Detail – Trogsystem – Sockel – Schacht – Schnitt (maßstabslos)



- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Edelstahl Abtropfblech
- 10 Trogsystem
- 11 Zulauf Wasser für Bewässerung
- 12 Schwelle KVH Fichte
- 13 Betonsockel
- 14 Ausgleichsdämmung
- 15 Sockelabdichtung

Abbildung A 36 Detail – Trogsystem – Sockel – Schacht – Schnitt (maßstabslos)



- 1 Aufbau Bestandswand:
Innenputz
Ziegel
Außenputz
- 2 Ausgleichsschicht Mineralwolle 70 mm
- 3 OSB Platte 15 mm
- 4 Zellulose Dämmung 200 mm
- 5 Gipsfaserplatte 18 mm
- 6 Winddichtung
- 7 Vertikallattung 15 mm
- 8 Hinterlüftung & Horizontallattung 3/5 Fichte
- 9 Trogsystem
- 10 Stahlkonsole als Auflager für HRBW
- 11 Zulauf Wasser für Bewässerung
- 12 Schwelle KVH Fichte
- 13 Sockeldämmung
- 14 Sockelabdichtung

A.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Tabelle A 1 Modell oH, Sommer Dämmung. Quantifizierung der Sensitivität der einzelnen Parameter.

oH	w2 [kg/m²]	w4 [kg/m²]	TaO [°C]	T2 [°C]	T4 [°C]
ρ_{iso}	<= 0,25	<= 0,25	<= 1	<= 1	<= 1
λ_{iso}	0,5-1	0,5	<= 1	<= 1	<= 1
μ_{iso}	1,5	1,0-1,5	<= 1	<= 1	<= 1
q50	0	0	0	0	0
α	2	0,5-1	15	10-15	<= 1
s _d	-	-	-	-	-
n	-	-	-	-	-
q	-	-	-	-	-
R	1-3	<= 0,25	1	1	0
FQT _{LS}	0,5	0,25	2,5	<= 1	-
FQT _{Aqua}	5	2,5	1	1	<= 1
μ_{Ferma}	-	-	-	-	-
μ_{Aqua}	0,5	0,5	0	0	0
λ_{Holz}	2	1	1	1	<= 1

Tabelle A 2 Modell mH, Sommer Dämmung. Quantifizierung der Sensitivität der einzelnen Parameter.

mH	w2 [kg/m²]	w4 [kg/m²]	TaO [°C]	T1 [°C]	T2 [°C]	T4 [°C]
ρ_{iso}	<= 0,25	<= 0,25	0	<= 1	<= 1	<= 1
λ_{iso}	0,25	<= 0,25	0	<= 1	1	<= 1
μ_{iso}	0,5	1	0	<= 1	<= 1	<= 1
q50	0	0	0	0	0	0
α	1,5	0,5	15	10	5-10	<= 1
s _d	<= 0,25	<= 0,25	0	0	0	0
n	<= 0,25	<= 0,25	0	0	0	0
q	-	-	-	-	-	-

mH	w2 [kg/m²]	w4 [kg/m²]	TaO [°C]	T1 [°C]	T2 [°C]	T4 [°C]
R	<= 0,25	<= 0,25	1	<= 1	<= 1	0
FQT _{LS}	<= 0,25	<= 0,25	2,5	2	0	-
FQT _{Aqua}	-	-	-	-	-	-
μ _{Ferma}	-	-	-	-	-	-
μ _{Aqua}	-	-	-	-	-	-
λ _{Holz}	-	-	-	-	-	-

Tabelle A 3 Modell Ref, Sommer Dämmung. Quantifizierung der Sensitivität der einzelnen Parameter.

Ref	w2 [kg/m²]	w4 [kg/m²]	TaO [°C]	T1 [°C]	T2 [°C]	T4 [°C]
ρ _{ISO}	0,25	<= 0,25	0	<= 1	<= 1	<= 1
λ _{ISO}	0,25	<= 0,25	0	1	1	<= 1
μ _{ISO}	0,5	0,5	0	0	<= 1	<= 1
q ₅₀	0	0	0	0	0	0
α	1	0,5-1	20	5-10	5-10	<= 1
s _d	<= 0,25	<= 0,25	0	0	0	0
n	0,5	0,5	0	0	0	0
q	-	-	-	-	-	-
R	0,25	<= 0,25	0	0	0	0
FQT _{LS}	-	-	-	-	-	-
FQT _{Aqua}	-	-	-	-	-	-
μ _{Ferma}	0,25	<= 0,25	0	0	0	0
μ _{Aqua}	-	-	-	-	-	-
λ _{Holz}	-	-	-	-	-	-

Tabelle A 4 Modell PV, Sommer Dämmung. Quantifizierung der Sensitivität der einzelnen Parameter.

PV	w2 [kg/m²]	w4 [kg/m²]	TaO [°C]	T1 [°C]	T2 [°C]	T4 [°C]
ρ _{ISO}	0,25	0,25	-	2	2	<= 1
λ _{ISO}	0,25	0,25	-	2	2	1
μ _{ISO}	1,5	1,5	-	1	1	<= 1

PV	w2 [kg/m²]	w4 [kg/m²]	TaO [°C]	T1 [°C]	T2 [°C]	T4 [°C]
q50	0	0	-	0	0	0
α	0,5	0,5	-	10	5-10	1
s _d	0	<= 0,25	-	0	0	0
n	0,5	0,5	-	<= 1	0	<= 1
q	0,25	0,25	-	5-10	5-10	<= 1
R	0,25	<= 0,25	-	<= 1	0	0
FQT _{LS}	-	-	-	-	-	-
FQT _{Aqua}	-	-	-	-	-	-
μ _{Ferma}	-	-	-	-	-	-
μ _{Aqua}	-	-	-	-	-	-
λ _{Holz}	-	-	-	-	-	-

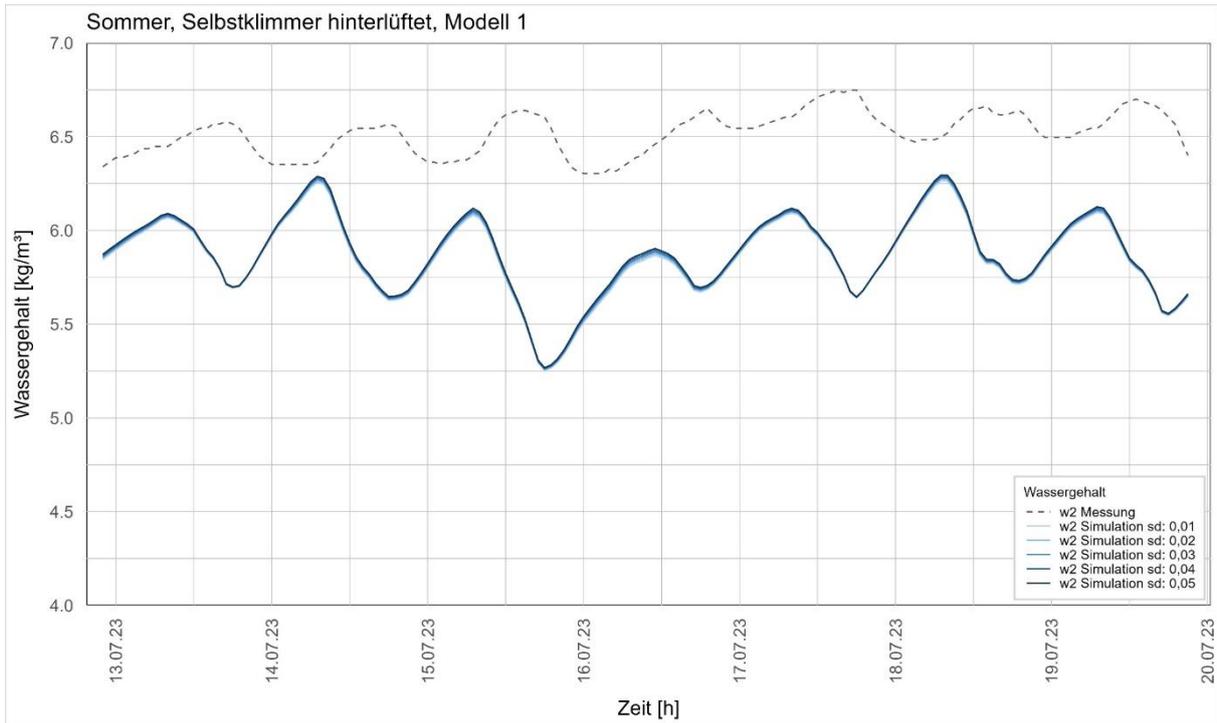
Abbildung A 37 Darstellung des Wassergehalts in Position 2 der Fassade mH, Sommer Dämmung. Varianz des s_d -Werts.

Abbildung A 38 Darstellung des Wassergehalts in Position 4 der Fassade mH, Sommer Dämmung. Varianz der Rohdichte.

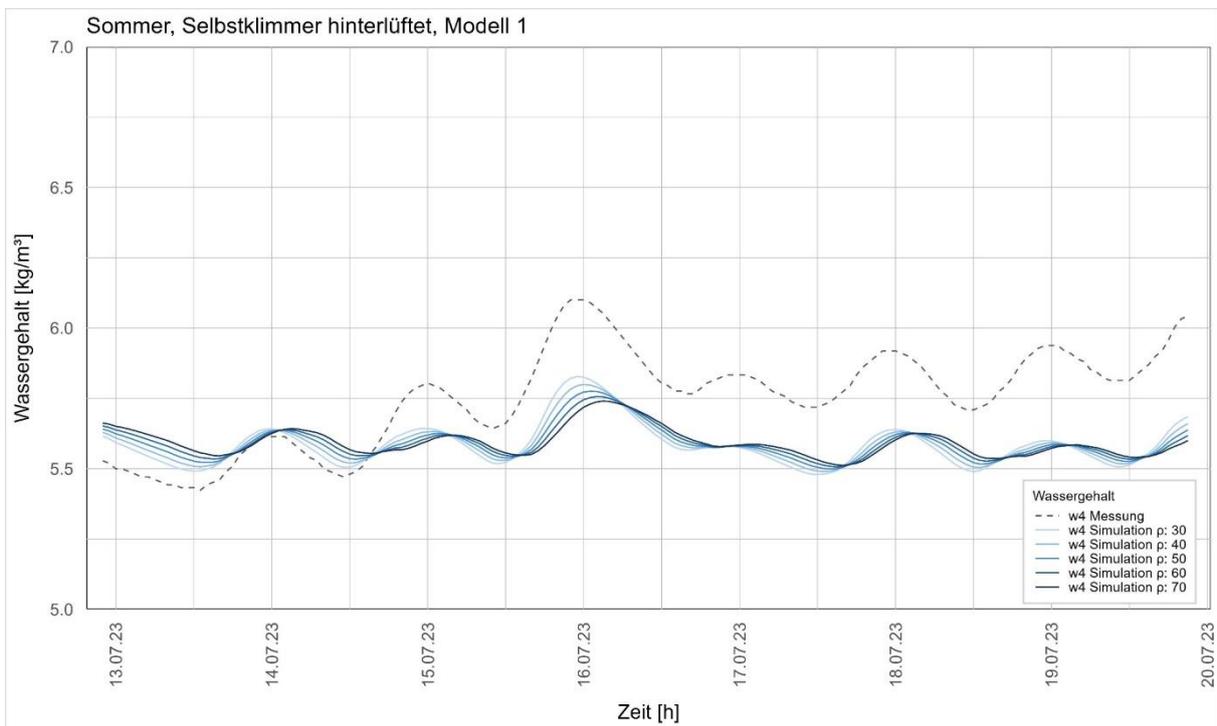


Abbildung A 39 Darstellung des Wassergehalts in Position 4 der Fassade mH, Sommer Dämmung. Varianz der Wärmeleitfähigkeit.

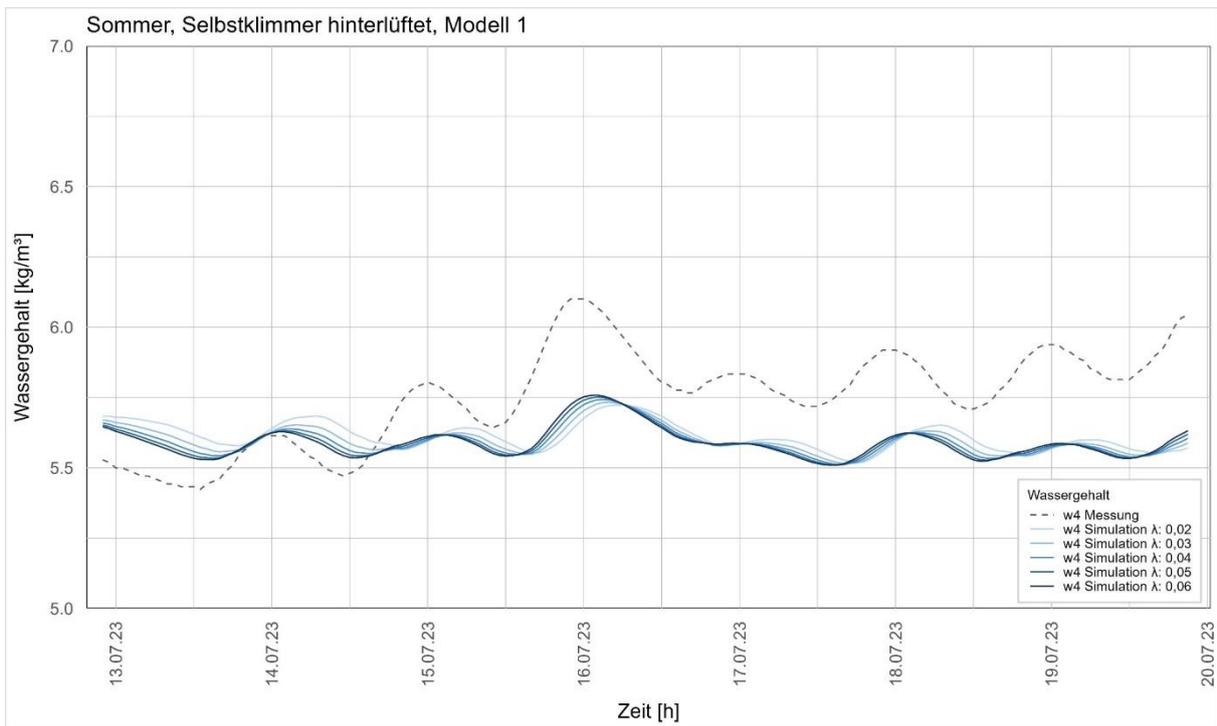


Abbildung A 40 Darstellung des Wassergehalts in Position 2 der Fassade mH, Sommer Dämmung. Varianz des Wasserdampfdiffusionswiderstandes.

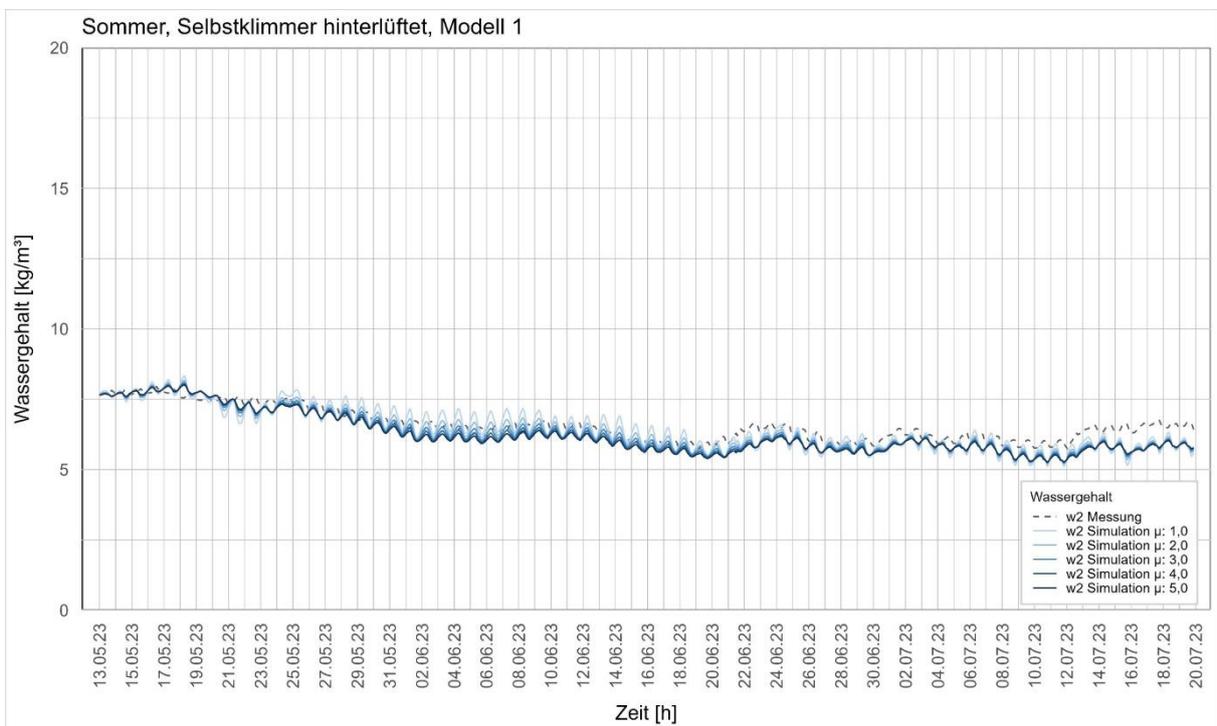


Abbildung A 41 Darstellung des Wassergehalts in Position 4 der Fassade mH, Sommer Dämmung. Varianz des Wasserdampfdiffusionswiderstandes.

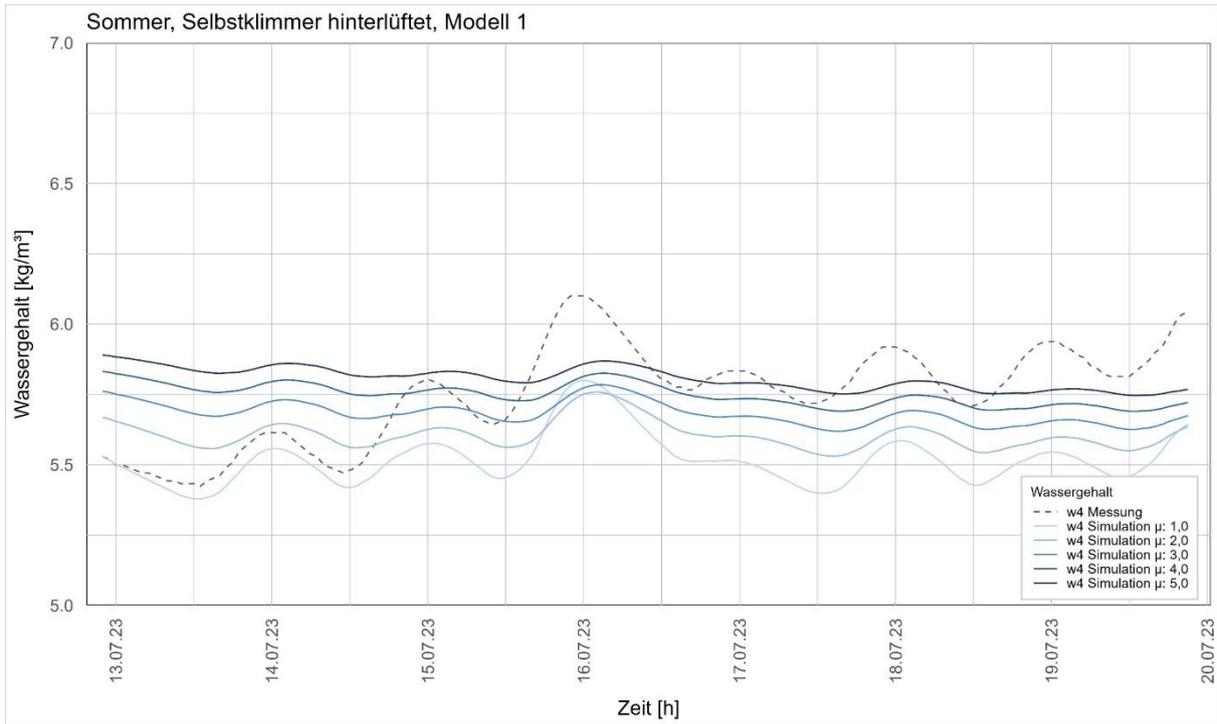


Abbildung A 42 Darstellung des Wassergehalts in Position 4 der Fassade mH, Sommer Dämmung. Varianz des Luftwechsels.

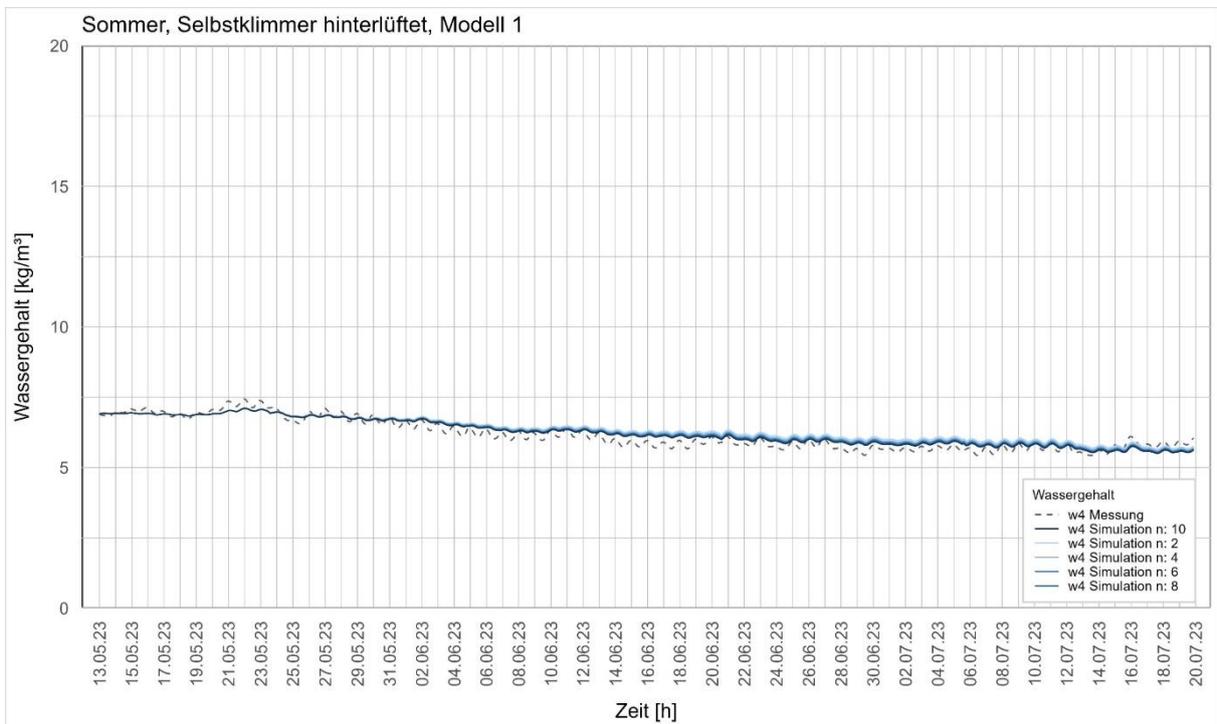


Abbildung A 43 Darstellung der Temperatur in Position 2 der Fassade PV, Sommer Dämmung. Varianz der Wärmequelle in %.

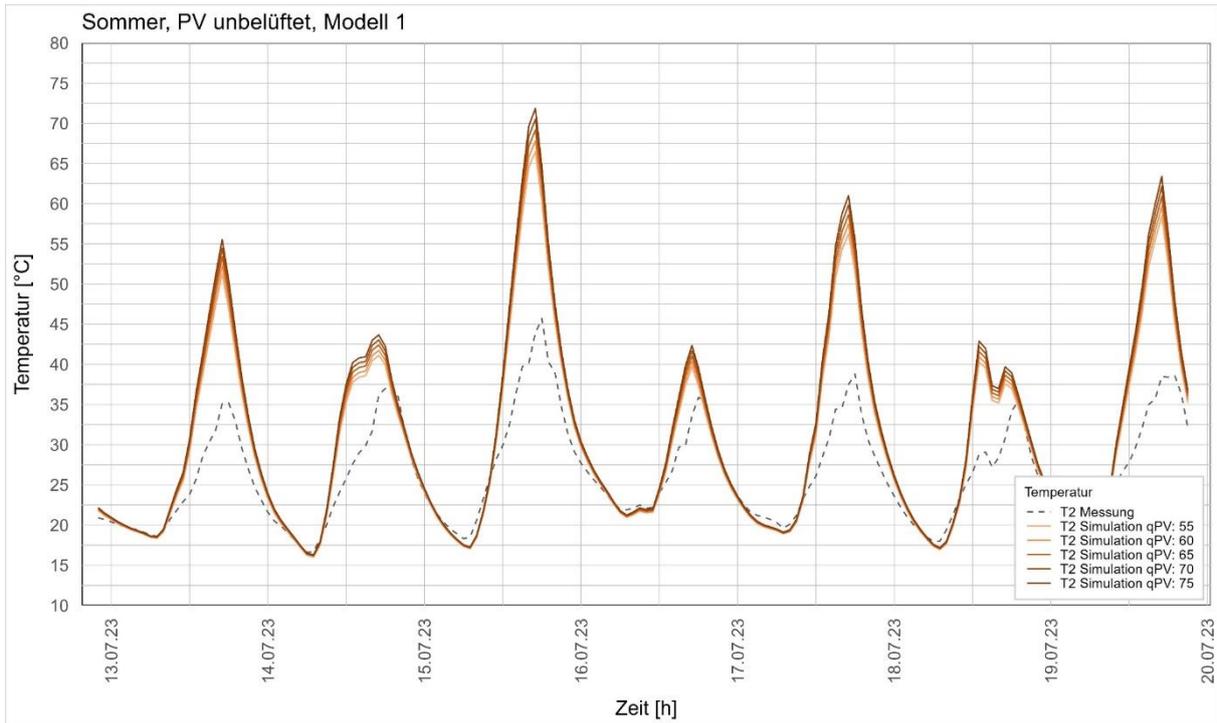


Abbildung A 44 Darstellung des Wassergehalts in Position 2 der Fassade Ref, Sommer Dämmung. Varianz der Regenbelastung in %.

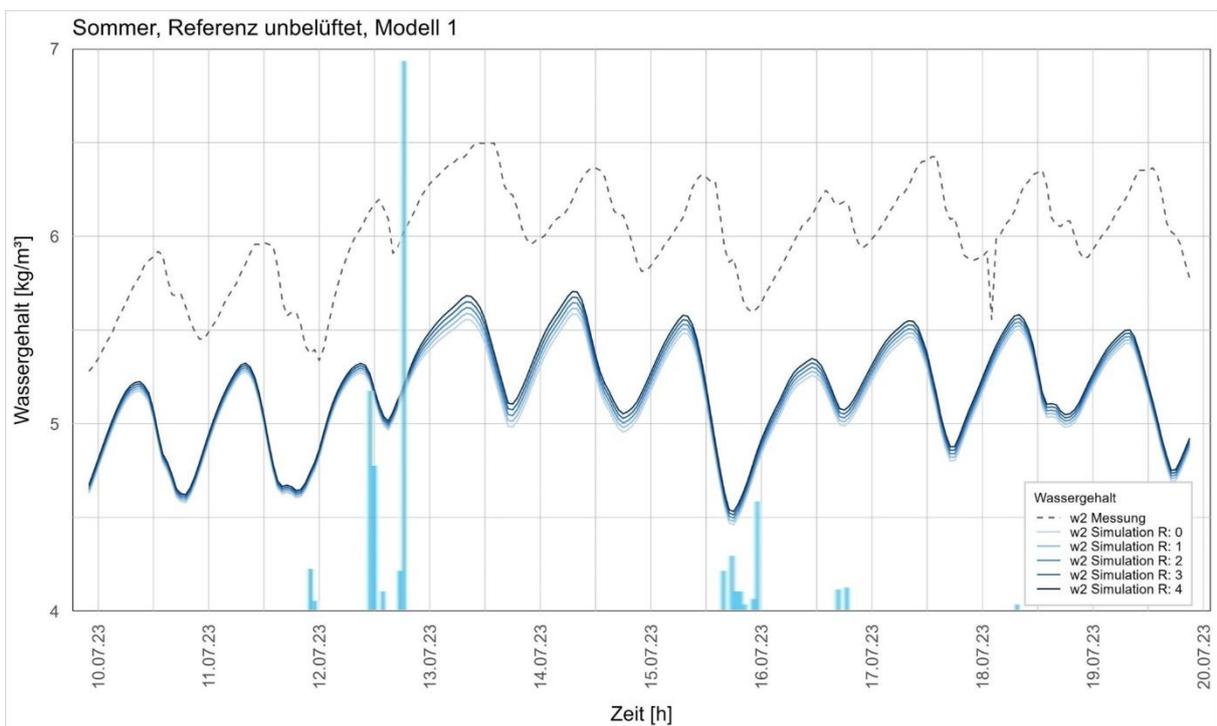


Abbildung A 45 Darstellung des Wassergehalts in Position 2 der Fassade oH, Sommer Dämmung. Varianz der Regenbelastung in %.

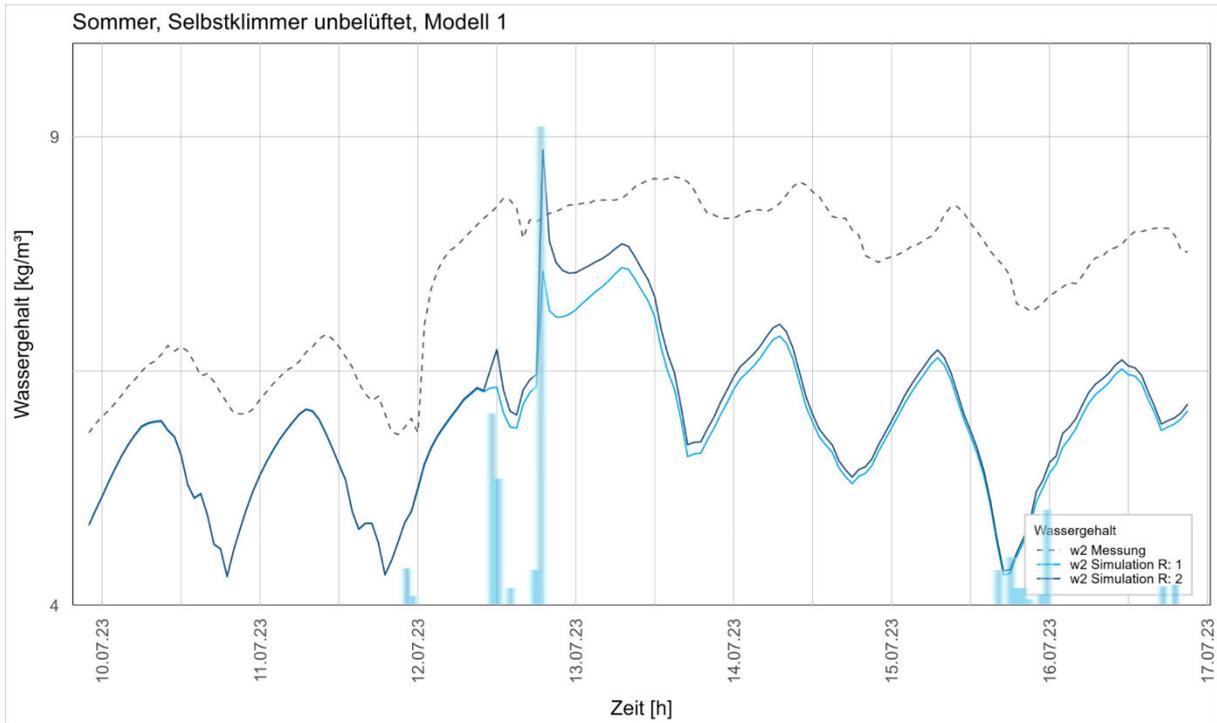


Abbildung A 46 Einbringung einer Feuchtequelle Transpiration in g/(m²a) in der Luftschicht.

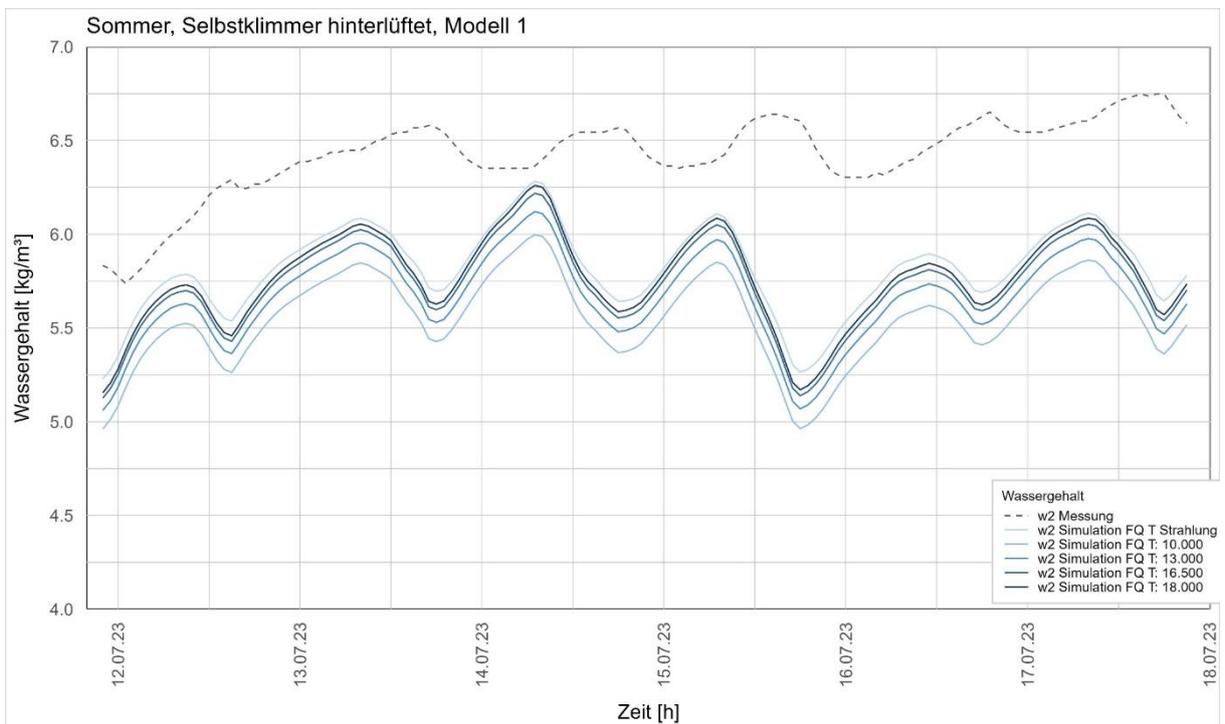


Abbildung A 47 Darstellung des Wassergehalts und der Temperatur in Position 2 der Fassade Ref, Sommer Dämmung. Varianz des Wasserdampfdiffusionswiderstandes der Fermacell Gipsplatte.

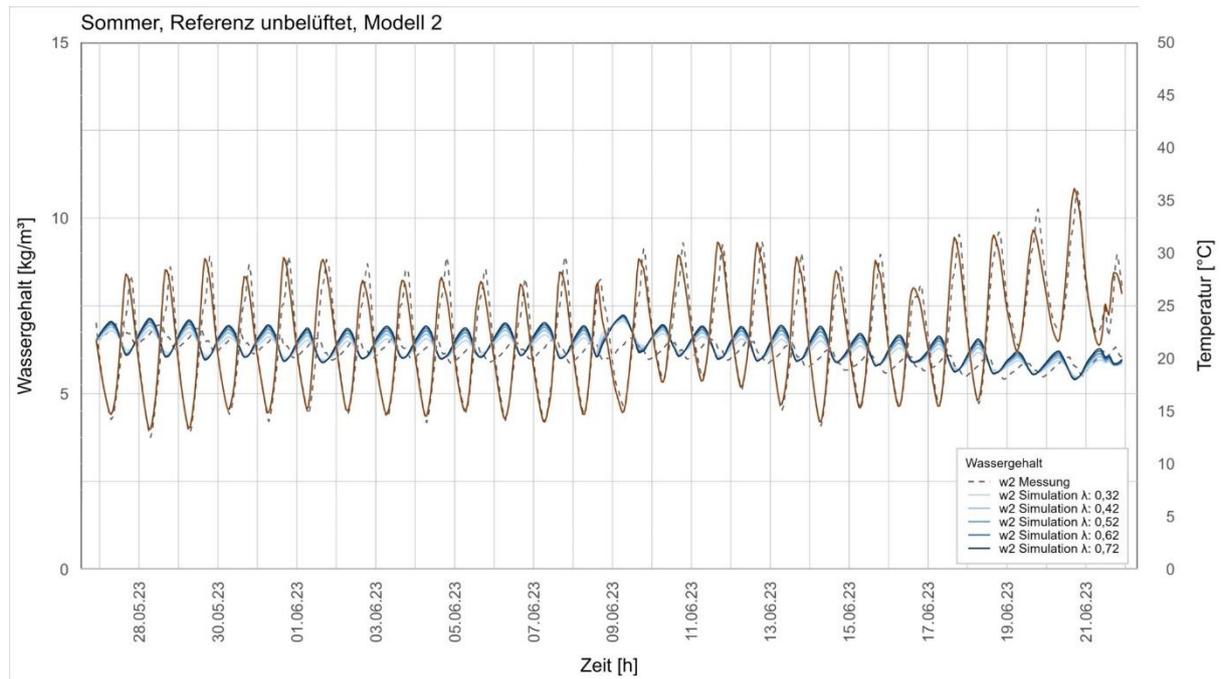
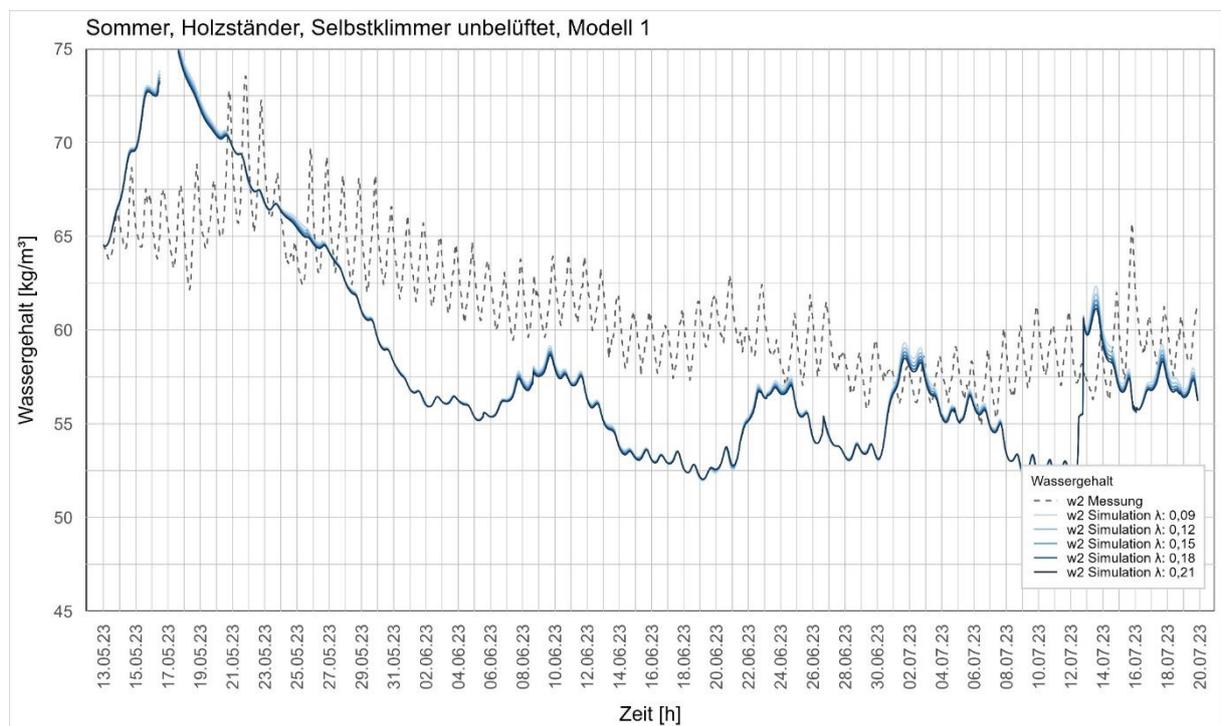


Abbildung A 48 Darstellung des Wassergehalts in Position 2 der Fassade oH, Sommer Holzständer Varianz des Wasserdampfdiffusionswiderstandes der Fermacell Gipsplatte.



A.3 Ergebnisse der Modelloptimierung

Abbildung A 49 Vergleich der Modelloptimierung in TaO von Modell 2 und Modell 3 der Fassade oH.

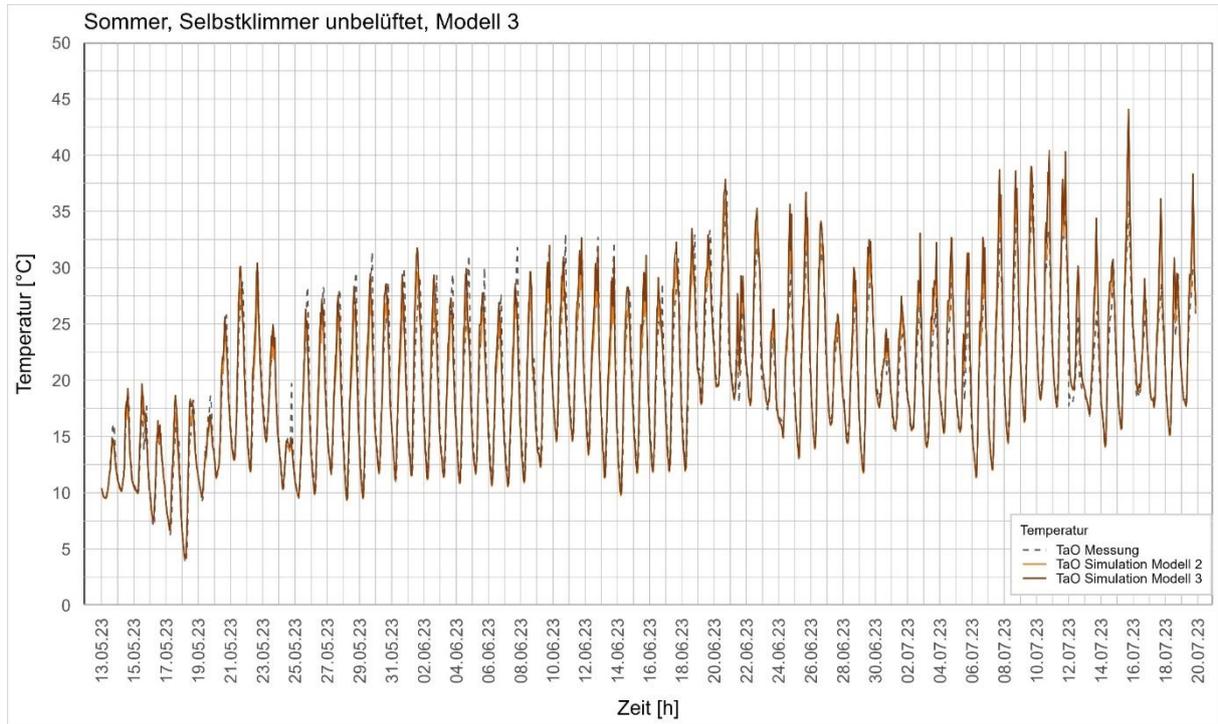


Abbildung A 50 Vergleich der Modelloptimierung in w2 von Modell 2 und Modell 3 der Fassade oH.

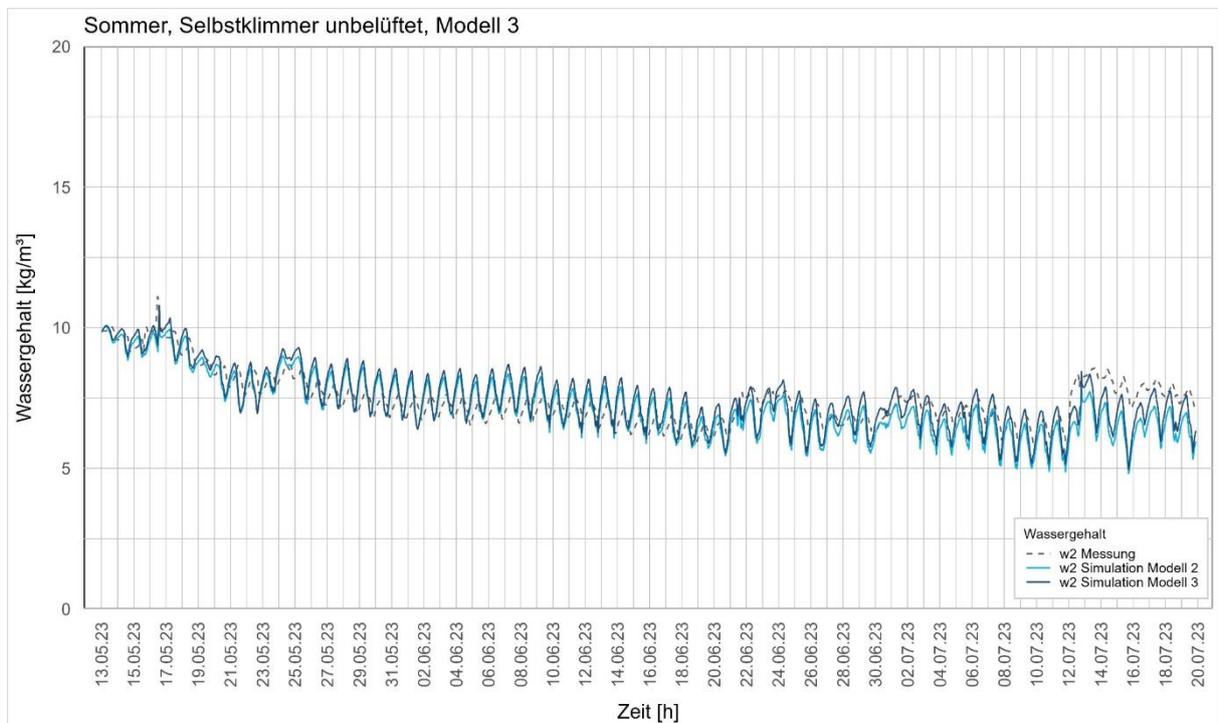


Abbildung A 51 Vergleich der Modelloptimierung in T2 von Modell 2 und Modell 3 der Fassade mH.

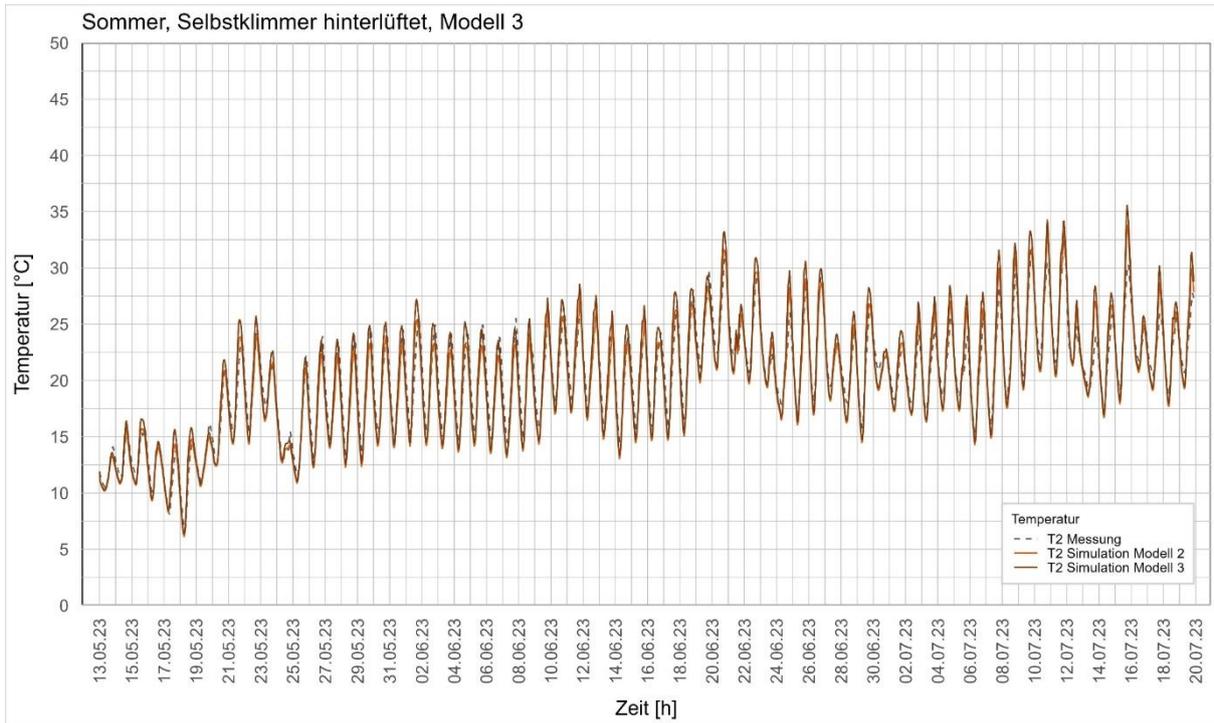


Abbildung A 52 Vergleich der Modelloptimierung in w2 von Modell 2 und Modell 3 der Fassade mH.

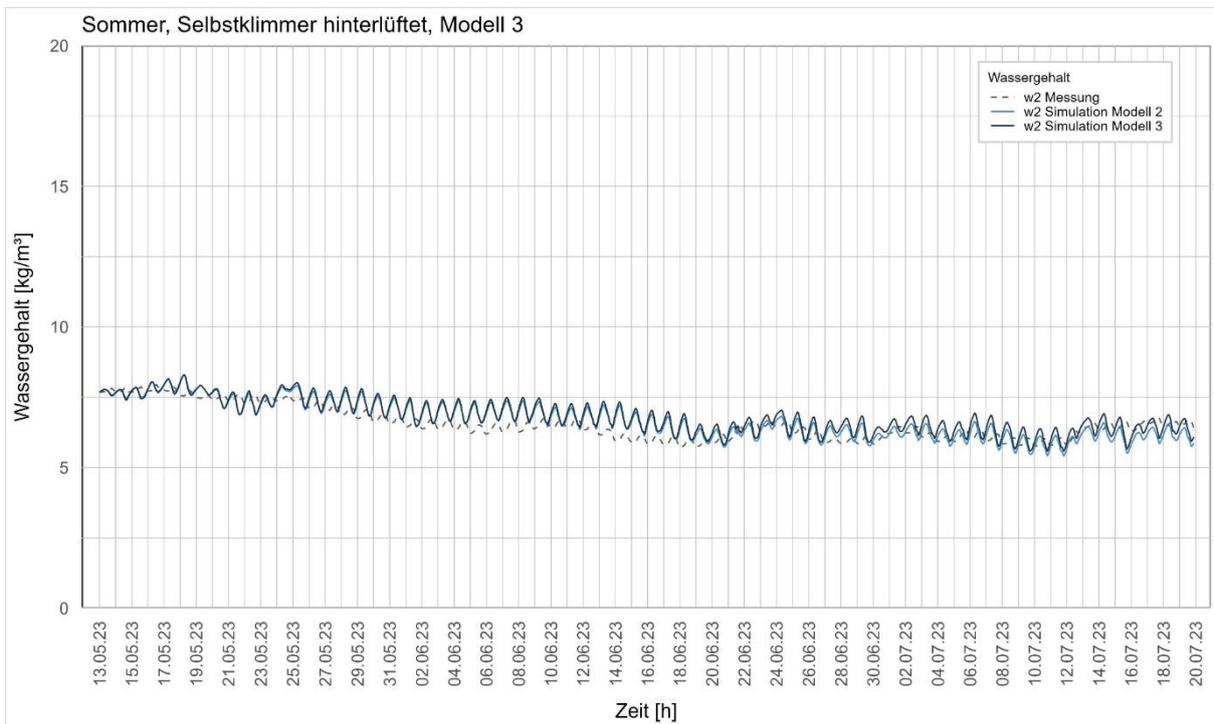


Abbildung A 53 Vergleich der Modelloptimierung in TaO von Modell 2 und Modell 3 der Fassade Ref.

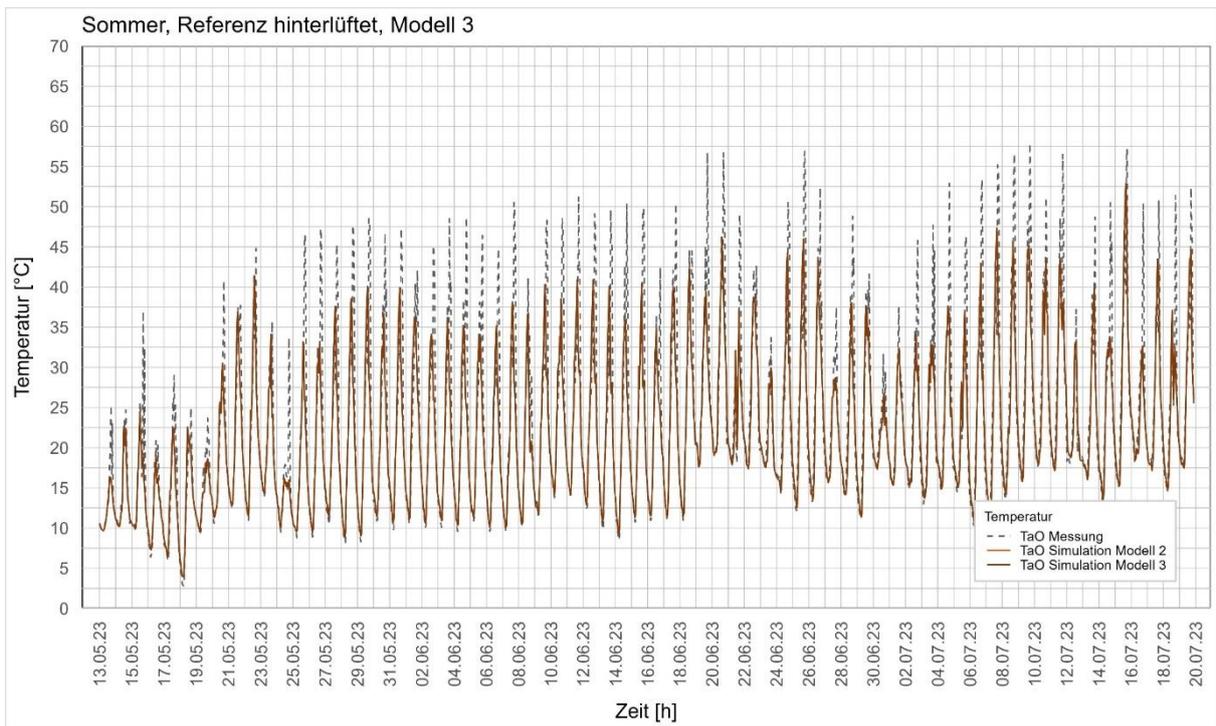


Abbildung A 54 Vergleich der Modelloptimierung in w2 von Modell 2 und Modell 3 der Fassade Ref.

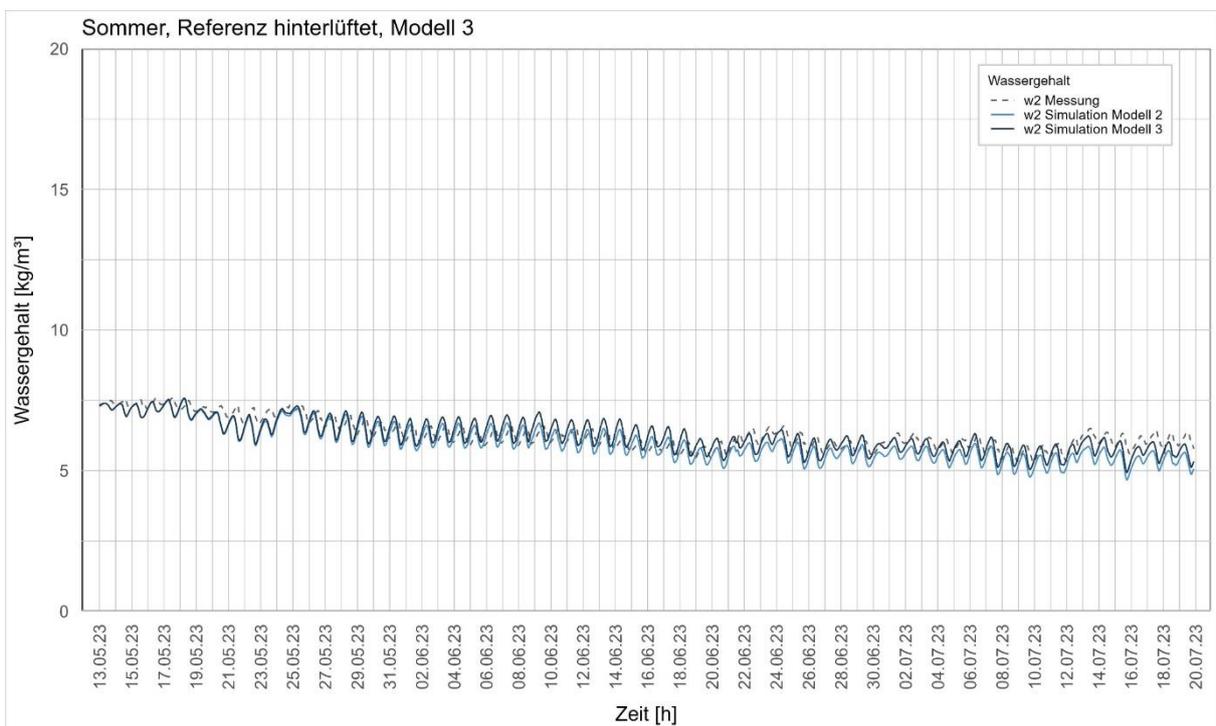


Abbildung A 55 Vergleich der Modelloptimierung in T2 von Modell 2 und Modell 3 der Fassade PV.

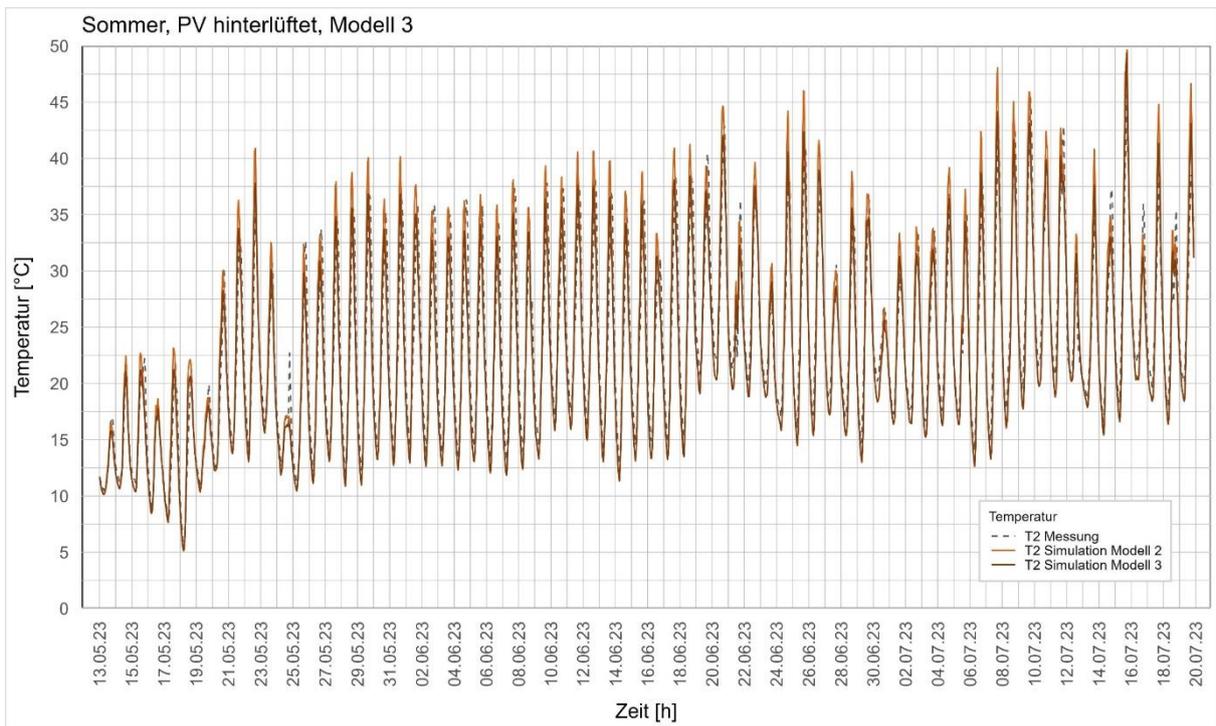
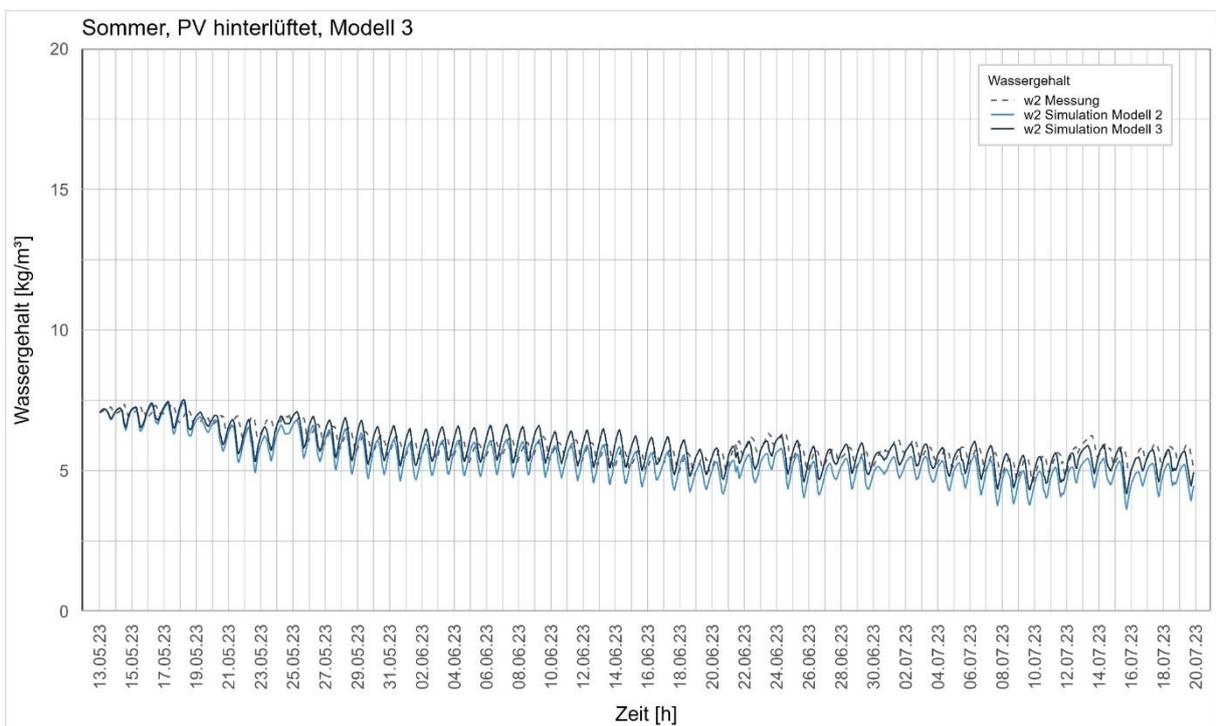


Abbildung A 56 Vergleich der Modelloptimierung in w2 von Modell 2 und Modell 3 der Fassade PV.



A.4 Prüfbericht Durchwärmungsversuch

Der Anhang A.4 kann separat heruntergeladen werden.

A.5 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 1

Der Anhang A.5 kann separat heruntergeladen werden.

A.6 Prüfbericht Fassadenbrandversuch 2

Der Anhang A.6 kann separat heruntergeladen werden.

A.7 Einsatztaktische Stellungnahme der TUM Werkfeuerwehr

Der Anhang A.7 kann separat heruntergeladen werden.

A.8 Bezeichnungen für Baustoffe und Bauteile nach DIN 4102 – Anhang A.1: Baustoffe

Tabelle 37: Zuordnung der bauaufsichtlichen Benennungen von Baustoffen nach DIN 4102-1 [68] und DIN EN 13501-1 [143] in Anlehnung an [144]

Nationale Klasse nach DIN 4102-1	Bauaufsichtliche Anforderung	Europäische Klasse nach DIN EN 13501-1	Zusatzanforderungen	
			Kein Rauch	Kein brennendes Abfallen/-tropfen
A1	Nicht brennbar	A1	X	X
A2	Nicht brennbar	A2 – s1, d0	X	X
B1	Schwer entflammbar	B – s1, d0 oder C – s1, d0	X	X
		A2 – s2, d0 oder A2 – s3, d0		X
		B – s2, d0 oder B-s3, d0		X
		C – s2, d0 oder C – s3, d0		X
		A2 – s1, d1 oder A2 – s1, d2	X	
		B – s1, d1 oder B – s1, d2	X	
		C – s1, d1 oder C – s1, d2	X	
		A2 – s3, d2 oder B – s3, d2 oder C – s3, d2		
B2	Normal entflammbar	D – s1, d0 oder D – s2, d0		X

Nationale Klasse nach DIN 4102-1	Bauaufsichtliche Anforderung	Europäische Klasse nach DIN EN 13501-1	Zusatzanforderungen	
			Kein Rauch	Kein brennendes Abfallen/-tropfen
		D – s3, d0 oder E D – s1, d1 oder D – s2, d1 D – s3, d1 oder D – s1, d2 D – s2, d2 oder D - s3, d2 E – d2		X
B3	Leicht entflammbar	F		

Literaturverzeichnis

- [1] HEGGER, M. ; DREBES, C. ; FAFFLOK, C. ; KELLER, M. ; WURZBACHER DELGADO, S.: *Benefit E - Gebäudeintegrierte solaraktive Systeme. Strategien zur Beseitigung technischer, wirtschaftlicher, planerischer und rechtlicher Hemmnisse*. Forschungsbericht. Stuttgart, 2015
- [2] PRIETO, A. ; KNAACK, U. ; AUER, T. ; KLEIN, T.: *Solar Facades - Main Barriers for Widespread Facade Integration of Solar Technologies*. In: *Journal of Facade Design and Engineering* 5 (2017), Nr. 1, S. 51–62
- [3] BBSR: *Fire-Safe Green : Untersuchung der brandschutztechnischen Anwendbarkeit von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden*. URL <https://www.zukunftbau.de/projekte/forschungsfoerderung/1008187-2146> – Überprüfungsdatum 2023-11-10
- [4] *Aktuell*. URL <https://www.arc.ed.tum.de/holz/forschung/leanwood-1/aktuell/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-12-12 – Überprüfungsdatum 2023-12-12
- [5] GUMPP & MAIER GMBH: *TES : Timber-Based Element System 2019* (2019)
- [6] SCHMAUCK, S.: *Dach- und Fassadenbegrünung - neue Lebensräume im Siedlungsbereich: Fakten, Argumente und Empfehlungen*, 2019 (BfN-Skripten)
- [7] PFOSER, N. ; JENNER, N. ; HENRICH, J. ; HEUSINGER, J. ; WEBER, S.: *Gebäude Begrünung Energie: Potenziale und Wechselwirkungen*. 1. Aufl. : Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau FLL, 2014 (FLL-Schriftenreihe Forschungsvorhaben)
- [8] PREISS, J. ; KRAUS, F. ; SCHARF, B. ; ENZI, V. ; TUDIWER, D.: *Leitfaden Fassadenbegrünung*, 2019
- [9] PFOSER, N.: *Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt. 2016. URL https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5587/1/Dissertation_Pfoser.pdf
- [10] EICKER, Ursula: *Solare Technologien für Gebäude*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [11] WEIHS, P. ; ZAMINI, S. ; KRISPEL, S. ; OSWALD, S. ; PEYERL, M. ; REVESZ, M. ; SCHNEIDER, A. ; TRIMMEL, H.: *Optimierung reflektierender Materialien und Photovoltaik im Stadtraum bezüglich Strahlungsbilanz und Bioklimatik*. In: *Nachhaltig Wirtschaften* (2018). URL https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe_2018-18_pvoptiray.pdf
- [12] HORN, S.: *Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV) - Entwicklung und Bewertung von Fassadensystemen*. Dresden, Technische Universität Dresden. 2017. URL <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A30583/attachment/ATT-0/>
- [13] *Materialfeuchtemessung : Grundlagen, Meßverfahren, Applikationen, Normen*. Renningen-Malmsheim : expert-Verl., 1997 (Kontakt & Studium 513)
- [14] WTA MERKBLATT 6-2: *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*. 2014
- [15] DIN EN ISO 9346:2008-02. 2008. *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden und Baustoffen – Physikalische Größen für den Stofftransport – Begriffe*
- [16] BUTT, Hans-Jürgen: *Physics and chemistry of interfaces*. Weinheim : Wiley-VCH, 2003 (Physics textbook)
- [17] LENGSELD, Kristin ; HOLM, Andreas: *Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI-Plus*. In: *Bauphysik* 29 (2007), Nr. 3, S. 178–186
- [18] BRUNAUER, Stephen ; EMMETT, P. H. ; TELLER, Edward: *Adsorption of Gases in Multimolecular Layers*. In: *Journal of the American Chemical Society* 60 (1938), Nr. 2, S. 309–319

-
- [19] DIN EN ISO 10456:2010-04. 2010. *Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*
- [20] WTA Merkblatt 6-8. 2016. *Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation*
- [21] DIN 4108-3:2018-10. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz*
- [22] DIN 4108-3:2018-10. *Wärme- und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz- Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*
- [23] KOLLMANN, Franz: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Bd. 1: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik Elastizität und Festigkeit*. Zweite, Neu bearbeitete und Erweiterte Auflage : Springer Berlin Heidelberg, 1951
- [24] *DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode_5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten_- Teil_1-1: Allgemeines_- Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN_1995-1-1:2004_+ AC:2006_+ A1:2008*
- [25] DIN 68800-1:2019-06. *Holzschutz - Teil 1: Allgemeines*
- [26] DIN 68800-2:2022-02. *Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*
- [27] K. SEDLBAUER: *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Universität Stuttgart. 2001
- [28] *Bauphysik Kalender*, 2017
- [29] HUCKFELDT, Tobias ; SCHMIDT, Olaf: *Hausfäule- und Bauholzpilze : Diagnose und Sanierung ; mit 77 Tabellen*. Köln : Müller, 2006
- [30] DIN 4108-2:2018-10. *Wärme- und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*
- [31] *Leitfaden zur Bewertung des Schimmelpilzrisikos mit WUFI*. URL https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2017.08_Leitfaden_Schimmelpilzrisiko.pdf
- [32] *DIN/TS 4108-8:2022-09, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden_- Teil_8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden*
- [33] SMITH, Sharron L. ; HILL, S. T.: *Influence of temperature and water activity on germination and growth of Aspergillus restrictus and A. versicolor*. In: *Transactions of the British Mycological Society* 79 (1982), Nr. 3, S. 558–560. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007153682800582>
- [34] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK: *Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen*. 2008
- [35] DIN 4108-3:2001-07. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden*
- [36] CERBE, Günter ; WILHELMS, Gernot: *Technische Thermodynamik : Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*. 19., überarbeitete Auflage. München : Hanser, 2021 (Hanser eLibrary)
- [37] JAMES HARDIE EUROPE GMBH: *fermacell® Gipsfaser-Platte Produktdatenblatt*. URL <https://www.fermacell.de/fermacellapi/downloads/file/de-DE/0690J000004BvY7QAK>
- [38] PFLEIDERER DEUTSCHLAND GMBH: *Technisches Datenblatt LivingBoard P5*. URL https://www.pfleiderer.com/file_pim/Dokumente/technisches-datenblatt-livingboard-p5-im0016360.pdf
- [39] DIN EN ISO 10456:2010-05. 2010. *Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften*
-

- [40] ISOCELL GMBH & Co KG: *ISOCELL - Zellulosefaser*. URL https://www.isocell.com/fileadmin/pim_export/documents/PDBL/PDBL_MA_ZELLULOSE_DE.pdf
- [41] SCHAMONI, Wilfriede Renate (Hrsg.): *GEG 2020: Anforderungen, Planung, Umsetzung*. Kissing : WEKA Media GmbH & Co. KG, 2021 (WEKA Praxislösungen)
- [42] A. APPEL: *Feuchtemessung: Stand der Technik und Forschung*. Technische Universität München. 2020
- [43] RIGGIO, Mariapaola ; ANTHONY, Ronald W. ; AUGELLI, Francesco ; KASAL, Bohumil ; LECHNER, Thomas ; MULLER, Wayne ; TANNERT, Thomas: *In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques*. In: *Materials and Structures* 47 (2014), Nr. 5, S. 749–766
- [44] MOSCHLER, William W. ; HANSON, Gregory R.: *Microwave Moisture Measurement System for Hardwood Lumber Drying*. In: *Drying Technology* 26 (2008), Nr. 9, S. 1155–1159
- [45] TORGOVNIKOV, Grigoriy I.: *Dielectric properties of wood and wood-based materials*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1993 (Springer series in wood science)
- [46] BRISCHKE, Christian ; LAMPEN, Stefan Clemens: *Resistance based moisture content measurements on native, modified and preservative treated wood*. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 72 (2014), Nr. 2, S. 289–292
- [47] C. BRISCHKE ; A. RAPP: *Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufes an ausgewählten Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing* (2007)
- [48] *DIN EN 13183-2:2002-07, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz_- Teil_2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren; Deutsche Fassung EN_13183-2:2002*
- [49] DU, D. ; DARKWA, J. ; KOKOGIANNAKIS, G.: *Thermal management systems for Photovoltaics (PV) installations: A critical review*. In: *Solar Energy* (2013), Nr. 97, S. 238–254
- [50] KÜNZEL, Hartwig: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten W_{or}me- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen. Dissertation. 1994. URL <https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzel%201994%20-%20Verfahren%20zur%20ein-%20und%20zweidimensionalen.pdf> – Überprüfungsdatum 2023-11-16
- [51] *DIN 15026:2022-04. 2022. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*
- [52] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK: *WUFI Pro 6.5 Online-Hilfe*. 2023
- [53] *DIN EN 15026:2022-04. 2022. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*
- [54] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS: *ASHRAE Standard 160: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*
- [55] WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR BAUWERKSERHALTUNG UND DENKMALPFLEGE E. V.: *Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - Vereinfachte Nachweise und Simulation*. 2016
- [56] WTA Merkblatt 6-2. 2014. *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*
- [57] OBERKAMPF, William L. ; ROY, Christopher J.: *Verification and Validation in Scientific Computing* : Cambridge University Press, 2010
- [58] HAÜBER, Frank ; LUCHKO, Yuri: *Mathematische Modellierung mit MATLAB und Octave: Eine praxisorientierte Einführung*. 2. Aufl. : Springer Spektrum, 2019
- [59] SCHUBNELL, Markus: *Validation in Thermal Analyses* : Carl Hanser Verlag, 2022
- [60] ASME: *Guide for verification and validation in computational solid mechanics*. 2006

- [61] UNITED STATES COAST GUARD.: *Verification, validation and accreditation (VV&A) of models and simulations (M&A)*. 2006
- [62] GRAMI, Ali: *Probability, random variables, statistics, and random processes: Fundamentals & applications* : Wiley, 2020
- [63] BELOUFA, Soumia ; OTHERS: *Statistical tools and approaches to validate analytical methods: methodology and practical examples*. In: *International Journal of Metrology and Quality Engineering* 8 (2017), S. 9
- [64] ENGEL, Thomas Maximilian: *Brandschutz für biogene Fassaden*. Technische Universität München. 2023. URL <https://mediatum.ub.tum.de/1715368>
- [65] BAUMINISTERKONFERENZ: *Musterbauordnung (idF v. November 2002) (September 2022)*. URL <https://www.bauministerkonferenz.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=75909860991> – Überprüfungsdatum 2021-11-20
- [66] FAMERS, Gabriele (Hrsg.); WALDMANN, Timm (Hrsg.); RAHM, Wolfdietrich (Mitarb.); KRAUS, Stefan (Mitarb.) : *Bayerische Bauordnung : Kommentar mit einer Sammlung baurechtlicher Vorschriften*. [10. Auflage]. Heidelberg : Rehm, 1990-
- [67] ENGEL, Thomas ; NODER, Julia: *Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht*. In: *Bautechnik* 97 (2020), Nr. 8, S. 549–557
- [68] DIN 4102-1. 1998/05. *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*
- [69] *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise*
- [70] MESSER, Paola: *Musterbauordnung (MBO) : Mit ergänzenden Musterbestimmungen und Begründungen*. 7. Aufl., Stand: Januar 2015. Berlin : Kulturbuch-Verl., 2015
- [71] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 4102-4 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*. 2016
- [72] UL SOLUTIONS: *UL Empowering Trust®*. URL <https://www.ul.com/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-06-06 – Überprüfungsdatum 2024-06-06
- [73] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI: *American National Standards Institute - ANSI Home*. URL <https://www.ansi.org/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-06-06 – Überprüfungsdatum 2024-06-06
- [74] WESSELAK, Viktor (Hrsg.); SCHABBACH, Thomas (Hrsg.); LINK, Thomas (Hrsg.); FISCHER, Joachim (Hrsg.): *Regenerative Energietechnik*. 2., erweiterte und vollständig neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, op. 2013 (Lehrbuch)
- [75] KRISTENSEN: *Experimental study of flame spread underneath photovoltaic (PV) modules*. In: *Fire Saf. J.* (2020)
- [76] KRISTENSEN, Jens Steemann ; FAUDZI, Farah Binte Mohd ; JOMAAS, Grunde: *Experimental study of flame spread underneath photovoltaic (PV) modules*. In: *Fire Safety Journal* 120 (2021), S. 103027. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711220301429>
- [77] KLAUS PRUME, Jochen Viehweg: *Leitfaden zur Bewertung des Brandrisikos in PV-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung*. 2015
- [78] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 4102-20: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 20: Brandschutztechnische Prüfungen von Türen und Fenstern*. 2017
- [79] *DIN EN 1999-1-2:2010-12, Eurocode_9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken_- Teil_1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN_1999-1-2:2007_ + AC:2009*

- [80] KRAUSE, Michael ; FUNTAN, Peter ; MÜLLER, Roland ; ERBAN, Christof: *Erfahrungsbericht PV-HoWoSan: Brandschutztechnische Anforderungen und Lösungsansätze für die Umsetzung von BIPV an einem Wohn-Hochhaus in Frankfurt*. 2021
- [81] REIDAR STØLEN ; TIAN LI ; TROND WINGDAHL ; ANNE STEEN-HANSEN: *Large- and small-scale fire test of a building integrated photovoltaic (BIPV) façade system*. In: *Fire Safety Journal* 144 (2024), S. 104083. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037971122300351X>
- [82] J. Anderson et al., 'European Approach to Assess the Fire Performance of Façades', p. 11
- [83] ANDERSON, J. ; BOSTRÖM, L. ; JANSSON MCNAMEE, R. ; MILOVANOVIĆ, B.: *Experimental comparisons in façade fire testing considering SP Fire 105 and the BS 8414-1*. In: *Fire and Materials* 42 (2018), Nr. 5, S. 484–492
- [84] BURKE, S. ; OTT, S. J. ; LE ROUX, S.: *Hygrothermal Performance of TES Energy Façade at two European residential building demonstrations – Comparison between Field Measurements and Simulations*. In: *10th Nordic Symposium on Building Physics*, 2014
- [85] P. DIETSCH ; S. FRANKE ; B. FRANKE ; A. GAMPER ; S. WINTER: *Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts* (2014)
- [86] DIN 4108-7
- [87] FÜLLE, Claudia ; LEOPOLD, Nadine: *WDVS im Holzbau – Optimierter Nachweis des dauerhaften Witterungsschutzes durch Kombination von Messungen im Wandprüfstand und hygrothermischen Simulationen*. In: *Bauphysik* 38 (2016), Nr. 3, S. 135–146
- [88] A. GAMPER ; P. DIETSCH ; M. MARK: *Schlussbericht für das Forschungsvorhaben: Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen*. 2012
- [89] SCANNTRONIK MUGRAUER GMBH: *Materialfeuchte Gigamodul - Analyse von 8 x Material-, Bau- und Holzfeuchtheiten innerhalb eines außergewöhnlich großen Messbereichs*. URL https://www.scanntronik.de/Produkt_Materialfeuchte_Gigamodul_deu.php
- [90] T. MUGRAUER: *Geschäftsführer Scanntronik Mugrauer GmbH*
- [91] SAUERMANNGMBH: *VT110/VT115 Hitzedraht-Thermo-Anemometer*. URL <https://sauermanngroup.com/de-DE/measuring-instruments/portable-instruments/anemometers/vt-110-vt-115>
- [92] SCANNTRONIK MUGRAUER GMBH: *Hygrofox - Elektronischer Hygrothermograph und Datenlogger*. URL https://www.scanntronik.de/Produkt_Hygrofox_deu.php
- [93] SCANNTRONIK MUGRAUER GMBH: *Thermofox Multisensor 11-Kanal Temperatur Datenlogger*. URL https://www.scanntronik.de/Produkt_Thermofox_Multisensor_deu.php
- [94] SCANNTRONIK MUGRAUER GMBH: *Thermofox Universal - Der schlaue Temperatur-Wächter und Datenlogger*. URL https://www.scanntronik.de/Produkt_Thermofox_deu.php
- [95] SCANNTRONIK MUGRAUER GMBH: *Universal HUB - 4-fach Erweiterungsmodul zur Messung von Luftfeuchte und Temperatur mit unseren Thermo-Hygro-Sensoren*. URL https://www.scanntronik.de/Produkt_Universal_HUB_deu.php
- [96] A. MÜLLER ; B. FRANKE ; S. FRANKE: *Langzeit-Monitoring von Holzbrücken - Erkenntnisse zum Feuchteverhalten im Tragquerschnitt* (2014)
- [97] S. OTT ; S. WINTER ; C.-M. CAPENER ; S. BURKE ; S. LE ROUX: *Feuchteverhalten der TES Holzrahmenbauelemente* (2015)
- [98] S. GÜNTHER: *Langzeit-Monitoring von Wandaufbauten in Holz-Massivbauweise im Wohnbau " _massive_living" in Graz*. Technische Universität Graz. 2015
- [99] CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.: *User Manual WindSonic1 and WindSonic 4*

- [100] CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.: *User Manual HygroVUE5 Digital Temperature and Relative Humidity Sensor*
- [101] CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.: *User Manual 107 Temperatur Probe*
- [102] GRUHN, Konrad: Das vollständige Ohmsche Gesetz für Wechselstrom. In: GRUHN, Konrad (Hrsg.): *Meßtechnische Übungen der Elektrotechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1927, S. 70–72
- [103] SCANNTRONIK MURGRAUER GMBH: *Datenlogger: Produktübersicht*. 2023. URL <https://www.scanntronik.de/Scanntronik%20Katalog%20-%202023.pdf>
- [104] J. PUTZHAMMER: *Bautechniker ISOCELL GmbH*
- [105] STEFAN GRÜNSTEIDL: *Verhalten der Photovoltaikmodule*. (Adressat)
- [106] DIN 4108-3:2018-10. 2018. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz*,
- [107] DIN 68800-2. 2022. *Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*
- [108] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP: *WuFi®Pro*. Stuttgart, 1995. URL <https://wufi.de/de/software/wufi-pro> – Überprüfungsdatum 2023-11-16
- [109] SCHAFACZEK, Beate ; ZIRKELBACH, Daniel: *Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangparametern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten : Abschlussbericht*. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verl., 2013 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 2863)
- [110] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP: *WUFI® Pro 6 Kurzeinführung*. 2019
- [111] KYLE, D. M. ; DESJARLAIS, A. O.: *Assessment of technologies for constructing self-drying low-slope roofs*. 1994
- [112] ETEX BUILDING PERFORMANCE GMBH: *Siniat. Weather Defence: Produktdatenblatt Gipsplatten*
- [113] ISOCELL GMBH & CO KG.: *OMEGA WD Winddichtung: Produktdatenblatt*.
- [114] KIEBL, K. ; RATH, J.: *Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf den Wärme- und Feuchtehaushalt von Außenwänden und Schadensrisiko*. Holzkirchen, 1989 (Bau- und Wohnforschung)
- [115] ARLT, M. ; HILGART, C.: *Pflanzenforschung für die Bioökonomie*. 2013 (GENOMXPRESS SCHOLAE)
- [116] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP: *Leitfaden zur Berechnung von extensiv begrünten Dächern (generisch): WUFI®*. 2020
- [117] KEHL, Daniel ; WEBER, Heinz ; HAUSWIRTH, Severin: *Ist die Hinterlüftung von Holzfassaden ein Muss?* In: *Bauphysik* 32 (2010), Nr. 3, S. 144–148
- [118] GRÜNER, Edith: *Die Reproduzier- und Vergleichbarkeit von Messdaten unterschiedlicher Messgeräte zur Messung der Transpiration und des Wasserdampfdiffusionswiderstandes*. Wien, Universität Wien. Diplomarbeit. 2012
- [119] ÖNORM 81 10-2:2020. 2020. *Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvektion und Kondensationsschutz*
- [120] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP: *Handhabung typischer Konstruktionen: WUFI® Tutorials 2020*. 2020
- [121] JOSCAK, Matus ; SONDEREGGER, Walter ; NIEMZ, Peter: *Vergleichende Untersuchungen zum Feuchte- und Wärmeverhalten in unterschiedlichen Holzwandelementen*. 2011. URL <https://wufi.de/literatur/Joscak,%20Sonderegger%20et%20al%202011%20-%20Vergleichende%20Untersuchungen%20zum%20Feuchte.pdf>
- [122] TUDIWER, David ; OTHERS: *Abbildung der Wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem Simulationsmodell*. 2019

- [123] PETERSEN, Solof Mundt ; HARDERUP, Lars-Erik: *Validation of a One-Dimensional Transient Heat and Moisture Calculation Tool under Real Conditions*. 2013. URL
<https://portal.research.lu.se/en/publications/validation-of-a-1d-transient-heat-and-moisture-calculation-tool-u>
- [124] PETERSEN, Solof Mundt ; ARFVIDSSON, Jesper: *Comparison of Field Measurements and Calculations of Relative humidity and Temperature in Wood Framed Walls*. 2010. URL
<https://lup.lub.lu.se/search/files/5974170/5212267.pdf>
- [125] BARBOSA, F. C. ; FREITAS, V. P. de ; GUEDES DE ALMEIDA, Manuela: *Temperature validation of an advanced hygrothermal model: Statistical analysis*. In: 2386-8198 (2020). URL
<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/71900>
- [126] ZIRKELBACH, D. ; OTHERS: *Energieoptimiertes Bauen: Klima- und Oberflächenübergangsbedingungen für die hygrothermische Bauteilsimulation: Kurztitel: Klimamodelle*. 2016. URL
<https://wufi.de/literatur/Zirkelbach,%20Sch%C3%B6ner%20et%20al.%20Juli%202016%20-%20Energieoptimiertes%20Bauen%20Klima-%20und%20Oberfl%C3%A4chen%C3%BCbergangsbedingungen.pdf>
- [127] SALTELLI, Andrea ; OTHERS: *Global sensitivity analysis: The primer*. Chichester, England and Hoboken, NJ : John Wiley, 2008
- [128] DIEFENBACH, Nikolaus ; OTHERS: *Datenbasis Gebäudebestand: Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohnungsgebäudebestand*. Darmstadt, 2010
- [129] DIN 4108-2. 2013. *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*
- [130] KÖHLER, M. ; KAISER, D.: *Wasserverbrauch von Cubico 30 „Hydro Profi-Line“ im Vergleich zu einem konventionellen Kunststoff-Blumentopf: Hydro_Profi_Line_Forschungsantrag*. Hochschule Neubrandenburg. 2018
- [131] HÄUPL, Peter ; OTHERS: *Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. 8. Aufl. Wiesbaden und Heidelberg : Springer Vieweg, 2017
- [132] PETER, Mandy ; WINTER, STEFAN, HRSG.: *Holzbau-Taschenbuch: Grundlagen*. 10. Aufl., 2021
- [133] KAMPMEIER, Björn: *Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau*. Universitätsbibliothek Braunschweig. 2008
- [134] BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG: *Fire-Safe Green : Untersuchung der brandschutztechnischen Anwendbarkeit von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden*. URL
<https://www.zukunftbau.de/projekte/forschungsfoerderung/1008187-2146>
- [135] AVANCIS GMBH: *SKALA Technisches Datenblatt*. n.d. URL
https://www.avancis.de/_Resources/Persistent/d/d/8/e/dd8e122269974fa85489a898b5da556e28d378b1/SKALA%20Datenblatt%20V4.6.81.pdf
- [136] AVANCIS GMBH: *Mechanische und Elektrische Spezifikationen - SKALA-Modul*. November 2022. 2022, %
Setzen Sie das tatsächliche Erscheinungsjahr des Dokuments ein
- [137] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 60584-1, Thermolemente - Teil 1: Referenztablelle*. Berlin, 1989
- [138] DIN EN 1363-1. *Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1363-1:2020*
- [139] DIN 201212. *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*

-
- [140] ENGEL, Thomas ; WERTHER, Norman: *Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design*. In: *Fire Technology* 59 (2023), Nr. 1, S. 117–151
- [141] HERMANN KAUFMANN, WOLFGANG HUB, SANDRA SCHUSTER, MANFRED STIEGLMEIER: *leanWOOD* (2013). URL <https://www.arc.ed.tum.de/fileadmin/w00cgv/holz/leanWood/leanWOOD-Broschuere.pdf>
- [142] TAE YOUNG KIM: *Klimaneutralität in der energetischen Sanierung der Gebäudehülle : Ökobilanzieller Vergleich des Einsatzes vorgefertigter Holzbau-Fassadenelemente am Beispiel eines Bestandsgebäudes* 2023
- [143] *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2018*
- [144] LUTZ BATTRAN, Achim Linhardt: *Brandschutz Kompakt 2017/2018*. In: *Feuertrutz*