

F 3030

Katrin Riesner

**Materialfeuchte-Monitoring an
hochgedämmten Holzbauteilen
des „Effizienzhaus Plus mit
Elektromobilität“ in der
Fasanenstraße 87 in 10623 Berlin**

F 3030

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0008-1

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Abschlussbericht

Materialfeuchte-Monitoring an hochgedämmten Holzbauteilen des „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“ in der Fasanenstraße 87 in 10623 Berlin

im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“

Durchgeführt im Auftrag
des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für
Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Projektlaufzeit:
27. Juli 2011 bis 31. März 2017

Dieser Bericht umfasst
75 Seiten Text und 37 Seiten Anhang
24 Tabellen
126 Abbildungen

Dr. Katrin Riesner
Wismar, 30.01.2016

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für
Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF-10.08-18.7.-11.16 / II3-F40-11-1-003)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Inhalt

Kurzfassung	5
1 Einleitung.....	6
2 Zielstellung	7
3 Das Gebäude	8
3.1 Gebäudenutzung und Architekturkonzept.....	8
3.2 Bauweise	9
3.3 Wärme- und Feuchteschutz	9
4 Untersuchungsziele	10
4.1 Überblick	10
4.2 Nachweis der natürlichen Konvektion in Außenwand-Gefachdämmungen.....	10
4.3 Bewertung des Innenraumklimas.....	11
4.4 Feuchtelast im Kriechkeller	12
5 Untersuchungsmethoden.....	13
5.1 Einführung	13
5.2 Grundzüge zum Monitoringkonzept	13
5.3 Natürliche Konvektion.....	15
5.3.1 Messung des Temperaturfeldes im Dämmstoff [6]	15
5.3.2 Messung der relativen Luftfeuchte im Dämmstoff [6].....	16
5.3.3 Materialfeuchtemessung im Dämmstoff [6], [4].....	17
5.3.4 Materialfeuchtemessung in der kaltseitigen Gefachbeplankung [6]	17
5.3.5 Tauwasserausfall und Schimmelpilzwachstum [6].....	17
5.4 Untersuchungsmethoden zu weiteren bauphysikalischen Größen	17
5.4.1 Lufttemperatur und relative Luftfeuchte	17
5.4.2 Temperatur- und Materialfeuchtemessungen in der kaltseitigen Gefachbeplankung.	18
5.4.3 In-situ-Messungen der Wärmestromdichten in Außenwänden	18
6 Messprogramm – untersuchte Bauteile und Messverfahren	19
6.1 IR-Thermografie des Gebäudes.....	19
6.2 NNO-Außenwand	20
6.3 SSW-Außenwand	25
6.4 Bodenplatte.....	26
6.5 Dachplatte	27

7	Untersuchungsergebnisse	29
7.1	Ergebnisse der thermischen Bauabnahme mit IR-Thermografie	29
7.2	Außenklima in der Hinterlüftungsschicht der NNO-Fassade	30
7.3	Klima im Kriechkeller und hygrothermische Messwerte in der außenseitigen Bepankung der Bodenplatte über dem Kriechkeller	31
7.4	Innenraumklima	34
7.4.1	Messergebnisse und deren Bewertung nach DIN 4108-2	34
7.4.2	Weitere Messergebnisse zur Behaglichkeit des Wohnraumes im Erdgeschoss und zur Feuchtelast im Innenraum	36
7.5	Lufttemperaturdifferenzen zwischen dem Innenraum- und dem Außenklima	39
7.6	Der Einfluss der opaken Bauteile auf die sommerliche Überhitzung des Innenraumklimas	42
7.7	Der Einfluss von vorgehängten Photovoltaikerelementen auf den Wärmeeintrag in die darunterliegenden Bauteile	51
7.8	Der effektive U-Wert für die NNO-Außenwand und die SSW-Außenwand	52
7.9	Nachweis des Wärme- und Feuchtetransports aus natürlicher Konvektion in der Außenwand-Gefachdämmung des Erdgeschosses	53
7.9.1	Feuchteverhalten der außenseitigen Gefachbepankungen der Holztafelelemente von NNO-Außenwand und SSW-Außenwand	54
7.9.2	Wärme- und Feuchteverhalten der Zellulose-Gefachdämmung	58
7.10	Materialfeuchte-Monitoring der opaken Außenbauteile	61
7.10.1	Feuchteverhalten der außenseitigen Gefachbepankungen der Holztafelelemente der Außenwände im Vergleich zu Dach und Bodenplatte über dem Kriechkeller	61
7.10.2	Temperaturen und relative Luftfeuchte in der Gefachdämmung der opaken Außenbauteile zur Bewertung des hygrothermischen Verhaltens	62
8	Zusammenfassung.....	64
	Literatur und weitere Quellen	67
	Verzeichnis der Abbildungen.....	69

9	Anhang	76
9.1	Untersuchte Bauteile mit der Lage und Bezeichnung von Messfühlern.....	76
9.2	Ermittlung von Widerstandskennlinien verwendeter Holzwerkstoffe und von Fichte zur Anwendung der elektrischen Holzfeuchtemessung.....	87
9.3	Fotos und Untersuchungsergebnisse von Vor-Ort-Besichtigungen	91
9.4	Ausgewählte Messergebnisse	96
9.4.1	Außenklima in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand	96
9.4.2	Materialfeuchte in der außenseitigen Gefachbeplankung	98
9.4.3	Relative Luftfeuchte in der Dämmung der opaken Außenbauteile	104
9.4.4	Temperaturen in der Dämmung der opaken Außenbauteile.....	108
9.4.5	Massebezogene absolute Luftfeuchte in der Dämmung der opaken Außenbauteile	110

Kurzfassung

Ein Effizienzhaus Plus weist einen negativen Jahres-Primärenergiebedarf und einen negativen Jahresendenergiebedarf auf. Neben einer hoch energieeffizienten Haustechnik und eigenen regenerativen Energiequellen im und am Gebäude ist dafür eine dauerhaft hochdämmende Gebäudehülle erforderlich. Am Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität in Berlin / Fasanenstraße bot sich über mehrere Jahre die Gelegenheit für ein messtechnisches Monitoring.

Das hygrothermische Verhalten und die Dauerbeständigkeit der Gebäudehülle sowie das Innenraumklima wurde von Dezember 2011 bis Oktober 2016 mit 58 Messfühlern untersucht. Die Gebäudenutzung wechselte mehrfach im Untersuchungszeitraum, so dass Einflüsse aus dem Nutzerverhalten in die Untersuchungen eingebunden werden konnten. Untersuchungsziele dieses Monitorings waren:

- eine thermische Bauabnahme mit einer IR-Thermografie nach Gebäudefertigstellung,
- der Einfluss des Außenklimas auf das Innenraumklima mit Aussagen zur Behaglichkeit und zum sommerlichen Wärmeschutz,
- der U-Wert der opaken Außenwände,
- die Materialfeuchte der außenseitigen Gefachbeplankungen an Außenwänden, der Bodenplatte über dem Kriechkeller sowie am Dach außerhalb und im Bereich von Photovoltaikelementen,
- die natürliche Konvektion in der Außenwanddämmung der NNO-Fassade, untersucht über deren Feuchteprofil sowie über Temperaturprofile im Dämmstoff,
- Aussagen, ob hygrothermische Bedingungen für Schimmelpilzbefall nachweisbar sind sowie
- die hygrothermischen Klimabedingungen im Kriechkeller.

Alle Messergebnisse bestätigen hygrothermische Bedingungen in den opaken Bauteilen, die kein Feuchteschadensrisiko im Untersuchungszeitraum von fast 5 Jahren aufzeigen. Ein Schwerpunkt weiterer Untersuchungen sollte die Vermeidung von Innenraumüberhitzungen bei langfristig anhaltenden Hitzeperioden mit energieeffizienten Mitteln sein.

1 Einleitung

Im Jahr 2011 hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) in Berlin, Fasanenstraße 87b ein Modellgebäude als „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“ (EH P-EM) im Rahmen der „Forschungsinitiative Zukunft Bau“ errichten lassen. Ziel der „Forschungsinitiative Zukunft Bau“, seit 2014 vom Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) betreut, ist die Förderung von Forschungsthemen an diesem und weiteren energetisch hoch effizienten Gebäuden im „Effizienzhaus Plus“-Standard.

Ein Effizienzhaus Plus weist einen negativen Jahres-Primärenergiebedarf und einen negativen Jahresendenergiebedarf auf. Daher sind diesen Gebäuden neben einer hochdämmenden Gebäudehülle und einer hoch energieeffizienten Haustechnik eigene regenerative Energiequellen im und am Gebäude zugeordnet. Die über den Energiebedarf des Gebäudes hinausgehenden Energiegewinne werden zum Beispiel in örtliche Energienetze eingespeist.

Das „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“ in der Fasanenstraße in Berlin ist als zukunftsweisendes Projekt darauf ausgelegt, Energiegewinne aus Photovoltaikanlagen für die Ladestation der zum Haushalt gehörenden Elektrofahrzeuge mit zu nutzen.

Ein wesentliches Ziel von Forschungsprojekten der betreuenden „Forschungsinitiative Zukunft Bau“ ist das Monitoring der verschiedenen technischen Konzeptkomponenten an den Modellgebäuden im Netzwerk „Effizienzhaus Plus“. Es ist zu untersuchen, inwieweit getroffene Annahmen und Ergebnisse der architektonischen, bauphysikalischen und anlagentechnischen Planungen mit Messdaten während der Gebäudenutzung korrelieren. Dies dient zugleich der Qualitätssicherung für die hochgedämmte Gebäudehülle und der Effizienz der Anlagentechnik im Nutzungszustand. Ergebnisse des Monitorings sind eine sinnvolle Voraussetzung zur Anpassung der Anlagentechnik auf die Nutzergewohnheiten.

Die bewerteten Ergebnisse aller Konzeptkomponenten sind eine Basis für die Weiterentwicklung von Gebäuden im „Effizienzhaus Plus Standard“ und sollen diese Bauweise für eine breite Anwendung evaluieren.

Mit dem evaluierten „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“ in der Fasanenstraße in Berlin wird ein Beitrag für die Verwirklichung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2050 geleistet. [2] Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse eines der Teilprojekte im wissenschaftlichen Begleitprogramm dieses Gebäudes vor.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich beim Bauherr, den am Bau Beteiligten, der ZEBAU und den Mietern bedanken, die mir den Zugang zum Gebäude während der Nutzungszeiten unbürokratisch ermöglicht haben. Mein besonderer Dank gilt dem fachlichen Berater des vorliegenden Projektes, Herrn Guido Hagel vom BBR.

2 Zielstellung

Ziel des vorliegenden Projektes sind Messdatenerhebungen an der Gebäudehülle des Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität (EH P-EM), um die Korrelation bauphysikalischer Planungen mit der Gebäudenutzung zu untersuchen. Dieses Monitoring zum Wärme- und Feuchteschutz der Holztafelbauweise ist auf einen Erkenntnisgewinn zur Qualitätssicherung ausgerichtet und kann eine Basis für Weiterentwicklungen in der Anlagentechnik für diesen Gebäudetyp sein.

Vorangegangene Untersuchungen [4], [5], [6] haben gezeigt, dass für den Wärme- und Feuchteschutz in hochgedämmten Holzaußenwänden mit Dicken von 200mm bis 400mm der Einfluss einer natürlichen Konvektion innerhalb der Gefachdämmung in kalten Wintermonaten zu beachten ist. Im Ergebnis wurde als Konstruktionsregel die Einhaltung eines Verhältnisses der innen- und außenseitigen Beplankungs-Diffusionswiderstände von $s_{di} / s_{de} \geq 10 \dots 100$ in Abhängigkeit von der Dämmdicke, der Luftdurchlässigkeit und der Feuchtekapazität der Gefachdämmung empfohlen.

Das planende Büro Werner Sobek Engineering & Design hat diese Empfehlung umgesetzt. Ein Schwerpunkt des bauphysikalischen Bauteilmonitorings sind daher Untersuchungen zum Einfluss von natürlicher Konvektion auf Holzaußenwand-Gefachdämmungen im „Feldversuch“ - am bewohnten Gebäude.

Des Weiteren wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber Untersuchungen am Flachdach und der Bodenplatte über dem Kriechkeller in das Messprogramm eingebunden.

Das hygrothermische Verhalten und die Dauerbeständigkeit der Gebäudehülle sowie das Innenraumklima wurde von Dezember 2011 bis Oktober 2016 mit 58 Messfühlern untersucht. Die Gebäudenutzung wechselte mehrfach im Untersuchungszeitraum. Es gab drei Perioden mit öffentlichen Ausstellungen, die sich mit zwei Perioden der Wohnnutzung durch zwei „Testfamilien“ abwechselten.

Untersuchungsziele waren:

- die IR-Thermografie nach Gebäudefertigstellung,
- der Einfluss des Außenklimas auf das Innenraumklima mit Aussagen zur Behaglichkeit und zum sommerlichen Wärmeschutz,
- der U-Wert der opaken Außenwände
- die Materialfeuchte der außenseitigen Gefachbeplankungen an Außenwänden, der Bodenplatte über dem Kriechkeller sowie am Dach außerhalb und im Bereich von Photovoltaikerelementen,
- die natürliche Konvektion in der Außenwanddämmung der NNO-Fassade, untersucht über deren Feuchteprofil sowie über Temperaturprofile im Dämmstoff
- Aussagen, ob hygrothermische Bedingungen für Schimmelpilzbefall nachweisbar sind sowie
- die hygrothermischen Klimabedingungen im Kriechkeller.

3 Das Gebäude

3.1 Gebäudenutzung und Architekturkonzept

Das „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“ ist in der Funktion ein Einfamilienhaus, das durch eine hochgedämmte Gebäudehülle in Holztafelbauweise, eine moderne Haustechnik und durch nahezu vollflächig in die Südfassade und in das Flachdach integrierte Photovoltaikelemente charakterisiert ist.

Wesentliches Gestaltungselement des kubischen Baukörpers (L x B x H = 12,14m x 12,69m x 6,32m) ist das Vordach (L x B = 5,14m x 12,40m). An der Südfassade und auf dem Flachdach des Baukörpers sind vollflächig Photovoltaikelemente zur Energiegewinnung angeordnet.

Die Ost- und Westfassaden sind vollflächig verglast. Das straßenseitig angeordnete Vordach dient als Unterstand mit Ladestation für die Elektrofahrzeuge und als Sonnenschutz für die Westfassade. An der vollverglasten gartenseitigen Ostfassade sichert ein Baum und die benachbarte Bebauung eine Teilverschattung.

Das Architekturkonzept von Werner Sobek Engineering & Design sieht eine funktionelle Dreiteilung vor. Straßenseitig liegt das „Schaufenster“ – das großflächige Vordach mit Parkflächen und Ladestation für Elektrofahrzeuge sowie mit Informations-Displays für die interessierte Öffentlichkeit. Hinter der westseitigen Glasfassade liegt der „Technikern“ des Gebäudes, der zugleich Sichtbarriere zum garten- und ostseitig dahinterliegenden „Wohnkern“ ist. BILD 3-1 gibt einen Überblick über diese Funktionen. Im Erdgeschoss des „Wohnkerns“ sind die Funktionen Eingangsbereich, Wohnen, Essen und Küche untergebracht. Im Obergeschoss befinden sich 2 Kinderzimmer und Schlafzimmer. Zum „Technikern“ gehören im Erdgeschoss die offene Treppe, ein WC, der nur von außen zugängliche Technikraum und im Obergeschoss das Bad und der Hauswirtschaftsraum.

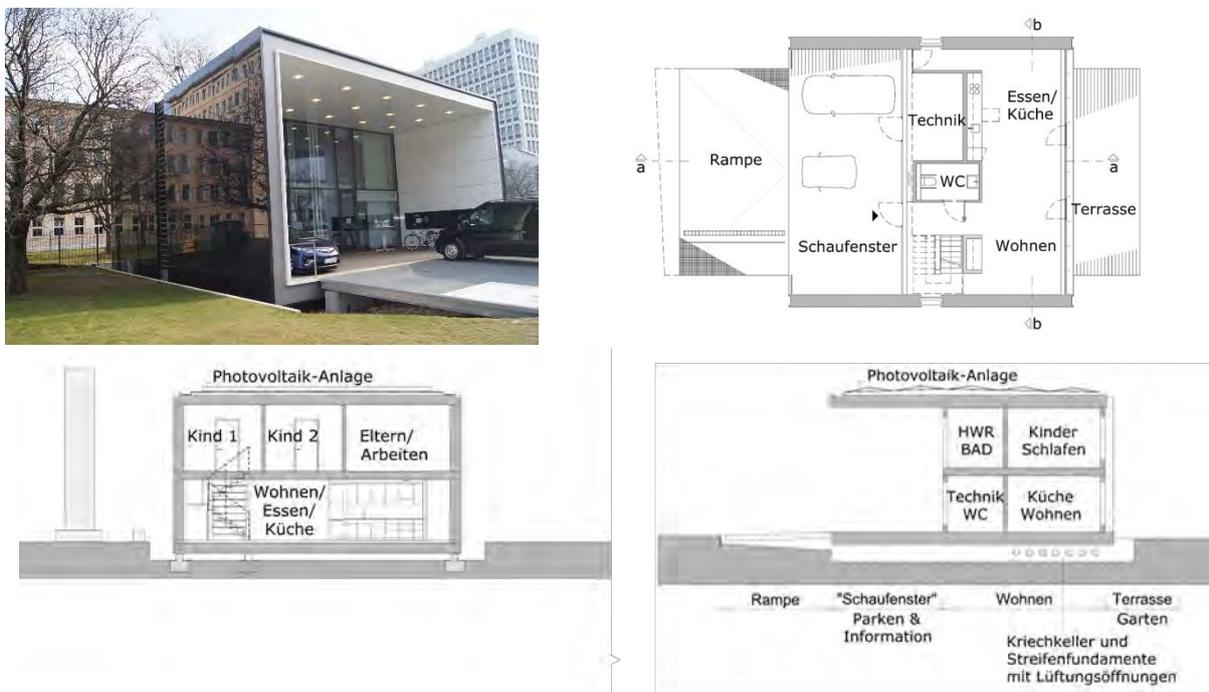


BILD 3-1 DAS „EFFIZIENZHAUS PLUS MIT ELEKTROMOBILITÄT IN BERLIN“ – FOTO UND ÜBERSICHTSZEICHNUNGEN

3.2 Bauweise

Die opake Gebäudehülle des kubischen Baukörpers ist in Holztafelbauweise errichtet. Über dem gut belüfteten Kriechkeller, begrenzt von Streifenfundamenten mit Lüftungsöffnungen, liegen Holztafel-Bodenplatten mit einer 400 mm dicken Zellulosedämmung ($U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$). In den Fußbodenaufbau integriert ist außenseitig eine feuchtigkeitsresistente Spanplatte (zementgebunden), eine Aluminiumverbunddampfbremse und eine wasserführende Fußbodenheizung. Die Gesamtdicke des Bodenaufbaus beträgt ca. 52 cm.

Die NNO- und SSW-Außenwände ($U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$) bestehen aus 400 mm dicken Holztafel-Außenwandplatten mit 360 mm dicker Zellulose-Gefachdämmung. Innenraumseitig liegen eine PE-Folie ($s_d \geq 100\text{m}$) und eine 60 mm dicke Hanfdämmung in der Installationsebene. Außenseitig grenzen an die 22 mm dicke OSB-Gefachbeplankung eine diffusionsoffene Regenschutzbahn, eine hinterlüftete Schicht von 30mm und die Vorhangfassade. Diese besteht an der SSW-Außenwand aus Dünnschicht-Photovoltaikmodulen (73 m^2) und an der NNO-Fassade in den gleichen Paneelabmessungen aus schwarzen Glaspaneelen.

Das Flachdach ($U = 0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$) besteht ebenfalls aus Holztafelelementen, innen- und außenseitig mit 20...25 mm dicken OSB-Platten beplankt und mit einer 400 - 520 mm dicken Zellulosedämmung in den Gefachen zwischen FJI 45-Trägern gedämmt. Innenseitig liegen eine PE-Dampfbremse mit $s_d \geq 100\text{m}$ und eine Unterdecke mit einem mindestens 100 mm hohen Deckenhohlraum sowie einer 50 mm dicken Hanfmatte auf raumseitigen Gipskartonbeplankung. An die außenseitige Gefachbeplankung aus 20 mm dicken OSB-Platten grenzen die Dachabdichtung und nahezu über die gesamte Dachfläche aufgeständerte und damit hinterlüftete Photovoltaikmodule an.

Die Schichtenaufbauten der untersuchten Gefache sind in TABELLE 9.1-1 und TABELLE 9.1-2 und in [1] aufgeführt.

3.3 Wärme- und Feuchteschutz

Betrachtet werden ausschließlich die im Monitoring untersuchten opaken Bauteile der Gebäudehülle im Wohn- und Technikern – Außenwand, Boden und Dach. Die wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken der an die Gefachdämmungen angrenzenden Schichten sind nach [7]

- $s_{de} \sim 4,5 \text{ m}$ und $s_{di} \sim 105 \text{ m}$ für die Außenwände ($s_{di} / s_{de} \sim 24$),
- $s_{de} \sim 0,75 \text{ m}$ und $s_{di} \sim 1506 \text{ m}$ für die Bodenplatte ($s_{di} / s_{de} \sim 2000$) und
- $s_{de} \sim 304 \text{ m}$ und $s_{di} \sim 105 \text{ m}$ für die Dachplatte ($s_{di} / s_{de} \sim 0,3$).

Die Planer haben in Anlehnung an [4] und [6] bewusst auf eine raumseitig diffusionsoffene Dampfbremse verzichtet, um einen Feuchtetransport aus natürlicher Konvektion innerhalb der Gefachdämmung auf ein vernachlässigbares Maß zu unterbinden. Während der Bauausführung wurde auf einen kontrolliert trockenen Einbau der Holzwerkstoffe und Dämmstoffe geachtet.

In der Bauphase wurden zu Untersuchungszwecken drei NNO-Außenwandwandgefache mit folgenden s_{di} / s_{de} -Verhältnissen ausgeführt: Gefach 1 mit $s_{di} / s_{de} \leq 12,1\text{m} / 0,2\text{m}$, Gefach 2 mit $s_{di} / s_{de} = 4,6\text{m} / 0,2 \text{ m}$ und Gefach 3 mit $s_{di} / s_{de} = 4,6\text{m} / 4,5\text{m}$, siehe TABELLE 9.1-1. Dazu wurden an den Gefachen 1 und 2 außenseitig eine diffusionsoffene Gefachbeplankung, innenraumseitig an Gefach 1 eine feuchteadaptive Dampfbremse sowie an Gefach 2 und 3 keine Dampfbremse angeordnet.

4 Untersuchungsziele

4.1 Überblick

Ein den Planungen entsprechender geringer Energiebedarf von Gebäuden wird als ein Indikator für eine hohe Bauausführungsqualität angesehen. Die jährlichen Energiekosten dienen indirekt als Indiz, dass die hochgedämmte Gebäudehülle keine signifikanten Wärmebrücken und Luftundichtigkeiten aufweist. Dies ermöglicht jedoch keine Ortung von thermisch-hygrischen Schwachstellen in der Gebäudehülle oder Analysen zum thermisch-hygrischen Verhalten einzelner Bauteile im Nutzungszustand. Hier setzt das vorliegende messtechnische Monitoring an.

Gegenstand der messtechnischen Untersuchungen sind

- die thermische Bauabnahme mittels IR-Thermografie und Blower Door nach Gebäudefertigstellung als Maßnahme der Qualitätskontrolle,
- das thermisch-hygrische Monitoring einzelner Außenbauteile für Analysen zur Dauerbeständigkeit infolge thermisch-hygrischer Beanspruchungen,
- die Erfassung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte in einzelnen Innenräumen und in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand zur Analyse der Messwerte von Sensoren in Außenbauteilen.

Ziele der Untersuchungen sind Bewertungen

- zum Außenklima im Vergleich zu Referenzjahren,
- zum thermisch-hygrischen Verhalten der Holztafelbauteile in der NNO-Außenwand, der SSW-Außenwand, der Bodenplatte und in der Dachplatte (im Bereich der PV-Module und nahe der Traufe ohne PV-Module),
- zur Behaglichkeit des Wohnbereiches im Erdgeschoss im Sommer und im Winter,
- von berechneten effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten auf der Basis von gemessenen Wärmestromdichten,
- zum Außenklima im Kriechkeller und damit zur Wirksamkeit der durch Lüftungsöffnungen in den Streifenfundamenten gewährleisteten Querlüftung, einer Empfehlung aus dem Forschungsvorhaben von [10] zur Vermeidung von Tauwasserschäden an Holzbauteilen über Kriechkellern.

4.2 Nachweis der natürlichen Konvektion in Außenwand-Gefachdämmungen

Bisherige Versuchsreihen und Simulationen an Holzrahmen-Außenwanddämmungen [4], [5], [6] haben aufgezeigt, dass bei heute üblichen Bauweisen und Dämmdicken von 200mm bis 400mm sowie Temperaturdifferenzen auf den Oberflächen der Holztafeln von mindestens 30 Kelvin (z.B. +24°C / -6°C) ein Wärme- und Feuchtetransport durch natürliche Konvektion innerhalb der offenporigen Gefachdämmung auftritt.

Die Antriebskraft der natürlichen Konvektion ist die Druckdifferenz aus thermischen Auftrieb, verursacht durch hohe Lufttemperaturunterschiede an der Innen- und Außenseite des Bauteils. Hierbei entsteht bei luftdichten Gefachbeplankungen eine entsprechend dem Strömungswiderstand im Dämmstoff langsame Luftwalze. Wie diese langsame Luftwalze im offenporigen Dämmstoff das Temperaturfeld und das Materialfeuchtefeld in Außenwanddämmungen beeinflusst, zeigt BILD 3-1.

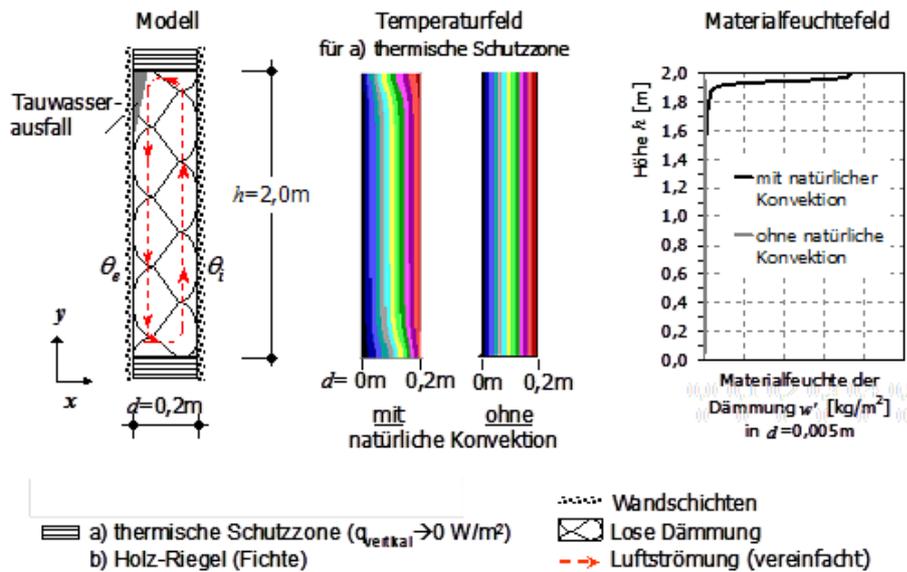


BILD 4-1 AUSWIRKUNGEN VON NATÜRLICHER KONVEKTION AUF DAS TEMPERATUR- UND MATERIALFEUCHTEFELD IN OFFENPORIGEN AUßENWANDDÄMMUNGEN [4], [6]

Die natürliche Konvektion überlagert sich dem Wärme- und Feuchtetransport des Bauteils und kann je nach Bauweise und Klimabedingungen zu einem Tauwasserschadensrisiko und zu Schimmelpilzwachstum innerhalb von Gefachen führen – strömungsbedingt keilförmig in der oberen kalten Ecke. Davon sind auch nach geltenden Bauvorschriften, z.B. nach DIN 4108-3, ausgeführte hochgedämmte Holzaußenwandgefache nicht ausgeschlossen.

Richtlinien zur Vermeidung von Feuchteschäden infolge von natürlicher Konvektion gibt es bisher nur für industrielle Dämmungen, zum Beispiel für kältetechnische Anlagen. Insbesondere an Behälterdämmungen traten Feuchteschäden durch natürliche Konvektion auf.

Für den Nachweis der in der Gebäudebauphysik bisher wenig beachteten natürlichen Konvektion werden die konvektiv bedingten „Auslenkungen“ im Temperaturfeld und im Materialfeuchtefeld messtechnisch erfasst und kritische Materialfeuchten bewertet.

4.3 Bewertung des Innenraumklimas

Zur Gebrauchstauglichkeit eines Gebäudes gehört die thermische Behaglichkeit. Nach [9] liegt ab einer Raumtemperatur von 26°C der Leistungsabfall im Bereich von 2% bis 5% pro Kelvin Temperaturanstieg. Die Gefahr der Überhitzung von hochgedämmten Gebäuden in den Sommermonaten ist in Fachkreisen bekannt. Die Richtlinien für Plusenergiehäuser fordern die Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes. Die DIN 4108-2 [26] akzeptiert für den Standort Berlin als oberen Grenzwert 26°C und bis zu 1200 Übertemperaturgradstunden pro Kalenderjahr (Kh/a).

Die relative Luftfeuchtigkeit ist ein weiteres Merkmal zur Bewertung der klimatischen Behaglichkeit in Wohnräumen. Sie hängt vor allem von der Außenluft, von der Feuchteproduktion in der Wohnung sowie von der Feuchtespeicherfähigkeit der Bauteile und Wohnungseinrichtungen ab und stellt sich ohne feuchtegeregelte Raumklimatisierung im unregulierten Gleichgewicht von selbst im Raum ein.

Der Beitrag von hohen relativen Luftfeuchten über 70% auf die Förderung von mikrobiellem Wachstum ist allgemein anerkannt. Der Einfluss niedriger relativer Luftfeuchten auf gesundheitliche Beschwerden (Haut, Atemwege, Allergien und Augen) wird jedoch von Fachleuten kontrovers diskutiert. Eine

aktuelle Auswertung der Fachliteratur [11], [12] behandelt die voneinander abweichenden Empfehlungen aktuell gültiger Regelwerke und Merkblätter. Ein anerkannt empfohlener Bereich für die relative Luftfeuchte ist in der DIN EN 15251:2012 mit Werten zwischen 30% und 65% (11,5g/kg) ausgewiesen. Gelegentliche Überschreitungen auf < 75% und Unterschreitungen bis 20% werden als tolerierbar eingeordnet. Die Schweizer Norm SIA 180:2014 weist dazu aus, dass die untere Grenze von 30% und die obere Grenze von 15,2g/m³ zu maximal 10% der Zeit unter- bzw. überschritten werden kann. Die niedrigen Raumluftheuchten treten im Winter bei Fensterlüftung und bei Lüftungsanlagen mit hohem Außenluftstrom auf, da die einströmende kalte Außenluft eine niedrige absolute Feuchte aufweist. Im Sommer werden Raumluftheuchten >65% bei Raumtemperaturen >24°C als schwül empfunden.

Bestandteil des vorliegenden Monitorings an vier Außenbauteilen (NNO-Außenwand, SSW-Außenwand, Bodenplatte über dem Kriechkeller und Dachplatte) sind auch Sensoren zur Luftfeuchte und Lufttemperatur im Innenraum. Die Messergebnisse dieser Sensoren werden zur Bewertung des Innenraumklimas herangezogen. Eine Analyse zur Effizienz der Gebäudelüftungstechnik wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

4.4 Feuchtelast im Kriechkeller

Die Holztafel-Bodenplatte des Plusenergiehauses ist auf Streifenfundamenten gelagert und liegt damit über einem Kriechkeller mit einem Luftraum von 22cm Höhe. Die Feuchtelasten in Kriechkellern resultieren aus Faktoren wie Außenklima, der Verdunstungsfeuchte aus dem Erdreich, der Höhe des Luftraumes, der Wasserdampfdiffusion durch die Bodenplatte sowie den Abdeckungs- und Lüftungsverhältnissen. Die relative Luftfeuchte im Kriechkeller ist soweit zu begrenzen, dass insbesondere im Sommer kritische Tauwasserschäden durch Befall mit holzerstörenden Pilzen oder Schimmelpilzbefall nicht auftreten. Die Materialfeuchten der Holzwerkstoffe in der Bodenplatte sollen 20 M.-% nicht überschreiten. Untersuchungen zu klimatischen Verhältnissen in Kriechkellern mit Holzbodenplatte für Deutschland [10] empfehlen einen Belüftungsquerschnitt von 10 – 20 cm²/ m² in den Streifenfundamenten, bezogen auf die Grundfläche. Am „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“ wurden nach Aussagen des Bauherren diese Empfehlungen umgesetzt, siehe BILD 4-2.



BILD 4-2 KRIECHKELLER IN DER BAUPHASE UND NACH GEBÄUDEFERTIGSTELLUNG – LÜFTUNGSÖFFNUNGEN IN DEN STREIFENFUNDAMENTEN

Bestandteil des vorliegenden Monitorings ist die Messung und Bewertung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte im Kriechkeller in Bezug auf Tauwasserschadensrisiken.

5 Untersuchungsmethoden

5.1 Einführung

Schwerpunkt des vorliegenden Projektes sind in-situ-Messungen zum thermisch-hygrischen Verhalten von Außenbauteilen in Holztafelbauweise des „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“

- als eine Maßnahme der Qualitätssicherung und
- für den Erkenntniszugewinn in Bezug auf das thermisch-hygrische Bauteilverhalten von Holztafelkonstruktionen in verschiedenen Einbausituationen
 - Boden über dem Kriechkeller,
 - NNO-Außenwand mit einer hinterlüfteten Fassade aus schwarzen Glaspaneelen,
 - SSW-Außenwand mit einer hinterlüfteten Fassade aus Dünnschicht- Photovoltaikpaneelen,
 - Flachdach im Bereich von aufgeständerten Photovoltaikelementen
 - Flachdach nahe der Traufe – außerhalb des Bereiches der Photovoltaikelemente.

Hierfür wurde bei vorgegebenem finanziellen Budget und unter Beachtung der Anforderungen aus dem Bauprozess, den Raumfunktionen und der Vermietung an „Testfamilien“ ein Messkonzept für das ca. dreijährige Langzeitmonitoring entwickelt. Dieses Konzept sieht die Einbindung von Sensoren zur Messung von

- Temperaturen in Gefachdämmungen und an Schichtgrenzen,
- Temperaturen und relativen Luftfeuchten in Gefachdämmungen und im Innen- und Außenklima,
- Materialfeuchten für Holzwerkstoffe sowie
- Wärmeströmen

vor und ist auf die in Abschnitt 4 erläuterten Untersuchungsziele ausgerichtet.

5.2 Grundzüge zum Monitoringkonzept

Der Begriff Materialfeuchte-Monitoring im Projekttitel zeigt an, dass sich dieses Vorhaben mit der systematischen Messwertaufnahme von Messgrößen, Fotos und Beobachtungen zur Bestimmung und Bewertung von Materialfeuchte beschäftigt. Darüber hinaus wurden thermische Messgrößen erfasst. Alle Messdaten wurden im Langzeitmonitoring über fast 5 Jahre in festgelegten Zeitabständen aufgenommen.

Aus technischen Gründen und aus Gründen der Nutzung (Bewohnen durch 2 Testfamilien, öffentliche Ausstellung) galt es, die Messtechnik nahezu „unsichtbar“ in diesem Gebäude anzuordnen. Es wurden 58 Messfühler während der Vorfertigung der Bauteile und während der Bauphase im Gebäude installiert. Davon bleiben 52 Messfühler fest in den untersuchten Bauteilen eingebaut und wurden auf insgesamt sieben Datenlogger der Firma AHLBORN und der Firma SCANNTRONIK im Technikraum und unter der Treppe im Erdgeschoss aufgeschaltet. Die gespeicherten Messdaten in diesen Datenloggern wurden über drei Modems via Datenfernübertragung ausgelesen und auf einen Messcomputer übertragen. Das Speicherintervall der Messdaten betrug je nach Sensortyp und Messperiode 10 Minuten, 15 Minuten, 30 Minuten oder eine Stunde. Bei der Anordnung der Messfühler und Anschlusskabel in den gedämmten Gefachen wurde darauf geachtet, dass eine Beeinflussung der Kabel und Sensoren auf die Messergebnisse weitgehend auszuschließen ist. Die Sensoren waren vor dem

Einbau gegen Alterung durch Staub und Betauung für die mehrjährige Laufzeit zu schützen. Die Anschlußkabel wurden während der Bauphase in Berlin im Fußboden und in Wänden „versteckt“ und „geschützt“ verlegt. Ein Einfluss der Ladestationen für die E-Mobilität konnte vor Beginn des Messprogramms nicht untersucht werden.

Da die Verfügbarkeit und Kompatibilität von Messdaten zum Innenraumklima und zum Außenklima zu Beginn des Langzeitmonitorings nicht gesichert war, wurden sechs Datenlogger der Firma EBRO in das Messprogramm aufgenommen. Diese Logger messen die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte und waren ca. vierteljährlich vor Ort auszulesen.

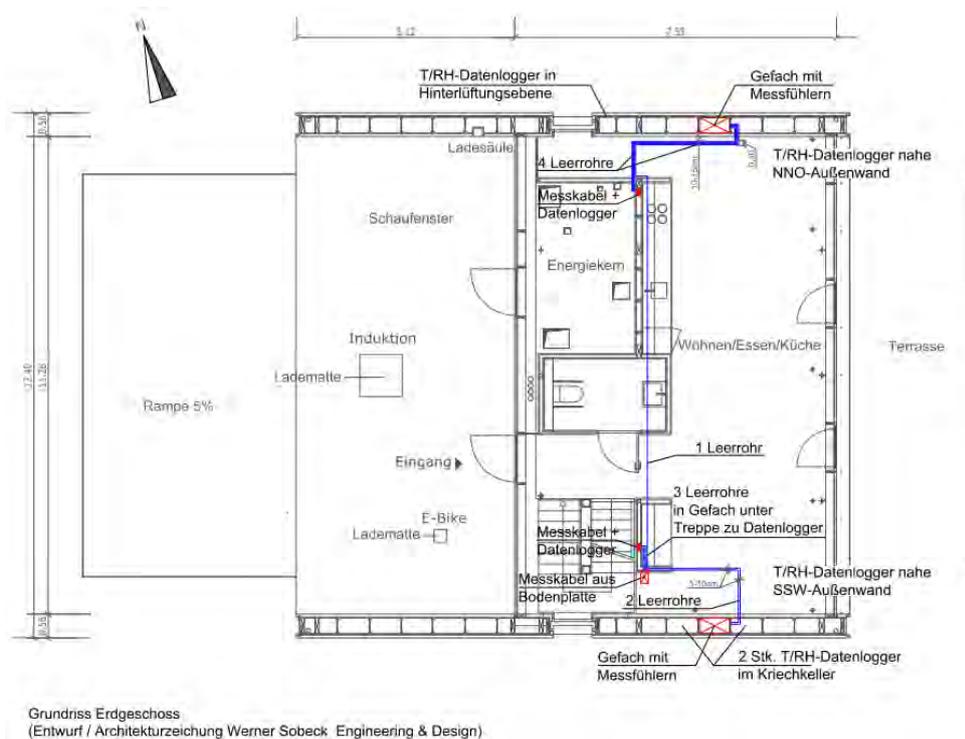


BILD 5-1 ÜBERSICHTSZEICHNUNG ZUR ANORDNUNG VON MESSFÜHLERN IN BAUTEILEN DES ERDGESCHOSSES, DER LAGE DER MESSKABEL IM FUßBODEN ERDGESCHOSS UND DER LAGE DER DATENLOGGER

Die Anordnung und Bezeichnung aller Messfühler ist aus Abschnitt 6 und aus Anhang 9.1 ersichtlich. Die Messbereiche, die Messunsicherheiten und die Maßnahmen gegen Messfehler durch die Einbausituationen sind in Abschnitt 6 aufgeführt.

Die Messdaten der Logger wurden mit der jeweils firmenspezifischen Logger-Software (Ahlborn, Scantronik, Ebro) ausgelesen und als csv-Datei oder im Excelformat exportiert. Die numerische Datenanalyse und die grafische Visualisierung der Ergebnisse erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm MS EXCEL.

Während der Bauphase wurden Maßnahmen zur kurzzeitigen Demontage einzelner Glaspaneele der NNO-Außenwand vereinbart, die eine temporäre Kontrolle der Betauung der außenseitigen Beplankung (OSB-Platte, UDP-Platte) der Holzrahmen-Außenwand an 5 Gefachen ermöglichte. Dazu wurden mit dem Steckdosenbohrer kreisrunde „Bohrkerne“ der außenseitigen Gefachbeplankung entnommen und wieder eingesetzt. Diese Maßnahme ermöglichte die Begutachtung der potentiellen Tauwasserebenen, der Schichtgrenze Gefachdämmung / außenseitige Gefachbeplankung. Die Anordnung dieser Entnahmestellen ist in BILD 6-1 aufgeführt. Da die Glaspaneele für dieses Kurzzeitmonitoring von einer extern zu beauftragenden Firma abzubauen und nach den Untersuchungen wieder anzubauen waren, waren nur fünf Untersuchungen in 4 Jahren möglich.

Lose eingeblasene Dämmstoffe können verarbeitungsbedingt zu nachträglichen Sackungen neigen [4], die in Holzrahmen-Außenwänden einen geschlossenen Luftspalt zwischen Dämmung und oberem Gefachrand erzeugen. Die Dokumentation der Einblas-Rohdichte der Zellulosedämmung und Beobachtungen zu nachträglichen Sackungen während die temporären Begutachtungen der Entnahmeprobe zeigen diesen Zusammenhang unter Nutzungsbedingungen auf.

Ergänzend zum Langzeitmonitoring von Bauteilen der Gebäudehülle wurden im Dezember 2011 vor und während einer Differenzdruckprüfung mit der Blower Door Infrarot-Thermografmessungen durchgeführt. Diese Art der thermischen Bauabnahme ermöglicht eine Analyse der Gebäudehülle

- auf Wärmebrücken (geometrisch, materialbedingt, umgebungsbedingt und konstruktionsbedingt)
- und auf Luftleckagen (flächige Hinterströmungen, linienförmige Luftleckagen und punktförmige Luftleckagen an Durchdringungen).

5.3 Natürliche Konvektion

5.3.1 Messung des Temperaturfeldes im Dämmstoff [6]

In vorherigen Untersuchungen ([4], [5], [6]) sowie in BILD 4-1 wurde ein für natürliche Konvektion typischer Temperaturverlauf über die Höhe einer Außenwand-Gefachdämmung aufgezeigt und mit dem Temperaturverlauf ohne Einfluss von natürlicher Konvektion verglichen. Typisch für natürliche Konvektion im Außenwand-Gefachdämmstoff ist, dass nahe der oberen warmseitigen Ecke die Temperaturen höher und nahe der unteren kaltseitigen Ecke die Temperaturen niedriger als bei der reinen Wärmeleitung ist, vorausgesetzt es tritt kein Wärmestrom am oberen und unteren Gefachrand auf. Damit treten

- geringe Oberflächentemperaturdifferenzen $\Delta\theta_{s\uparrow} = f(h)$ und
- vergleichsweise ausgeprägte Temperaturdifferenzen in halber Dämmstoffdicke $d/2$, beschrieben durch $\Delta\theta_{d/2\uparrow} = f(h)$

über die Gefachhöhe h auf, wenn natürliche Konvektion in Gefachdämmungen gegeben ist.

Je größer die Temperaturdifferenz der Temperaturkurve $\Delta\theta_{d/2\uparrow} = f(h)$ ist, desto ausgeprägter ist die natürliche Konvektion im offenporigen Dämmstoff. Holzriegel als Gefachbegrenzung sind übliche materialbedingte Wärmebrücken, die die Temperatursenkung am oberen und am unteren Gefachrand verringern / unterbrechen. Luftleckagen und Rohdichteschwankungen bzw. Fehlstellen im Dämmstoff können diese für natürliche Konvektion typische Temperaturverteilung verändern.

Temperaturprofil über den Querschnitt $d \times h$ der Gefachdämmung – Messwerte in halber Gefachdämmung $d/2$, siehe Bild 4-1

In den Vorversuchen ([4], [6]) wurde zudem festgestellt, dass sich in offenporigen Gefachdämmungen mit Dämmstoff-Luft-Permeabilitäten k_l von $360E-10 \text{ m}^2$ bis $3E-10 \text{ m}^2$ das für natürliche Konvektion im offenporigen Dämmstoff typische Temperaturfeld (z.B. orangefarbene Kurve im Diagramm von BILD 5-2) erst bei Lufttemperaturdifferenzen größer 20K einstellt. An Zellulose-Außenwandgefachdämmungen der Dicke von 200mm und mit der Luftdurchlässigkeit von $75E-10 \text{ m}^2$ bis $3E-10 \text{ m}^2$ wurde bei einer Lufttemperaturdifferenz von 42 K eine Temperaturdifferenz von 4,5K im Temperaturprofil über die Höhe nach BILD 5-2 festgestellt. Dies ist im Vergleich zu anderen Dämmstoffen eine geringe Ausprägung (orange Linie), die in der niedrigen Luft-Permeabilität von Zellulose hoher Einbaurohdichte begründet ist.

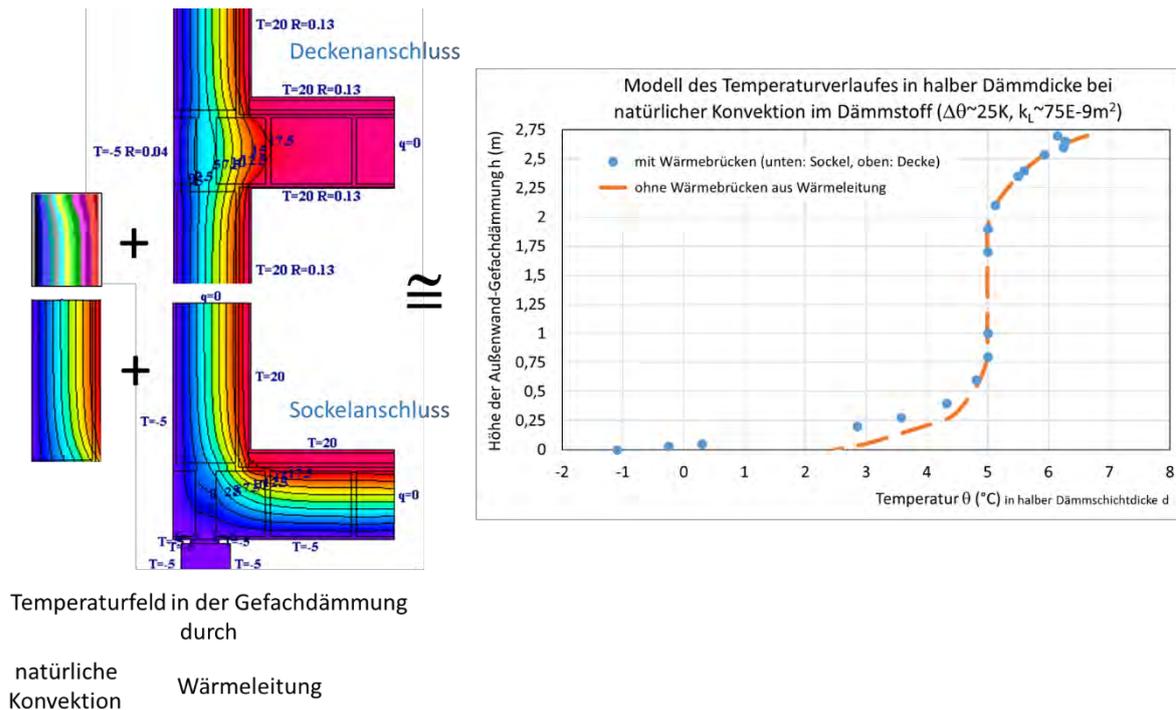


BILD 5-2 VEREINFACHTES TEMPERATURFELD-MODELL FÜR DIE AUßENWAND-GEFACHDÄMMUNG MIT DEN SICH ÜBERLAGERNDEN WÄRMETRANSPORTANTEILEN WÄRMELEITUNG UND NATÜRLICHE KONVEKTION

Am untersuchten Gebäude überlagern sich in der Außenwand-Gefachdämmung die Temperaturfelder aus natürlicher Konvektion und aus Wärmeleitung infolge konstruktionsbedingter Wärmebrücken am Sockel und am Deckenanschluss. Dies wurde in BILD 5-2 grob vereinfacht als Addition beider Wärmetransportanteile dargestellt, obwohl beide Anteile miteinander gekoppelt sind. Zudem beeinflussen die täglichen Temperaturschwankungen des Außen- und Innenklimas und übliche Messabweichungen der Sensoren dieses Temperaturfeld. Durch diese Überlagerungen lässt sich für die untersuchte Gefachdämmung die natürliche Konvektion am Temperaturfeld nur sehr eingeschränkt aufzeigen. Da der Wärme- und Feuchtetransport gekoppelt sind, hat dies auch Einfluss auf den Feuchtetransport durch natürliche Konvektion in der Dämmung.

Am Modell in BILD 5-2 wird deutlich, dass sich bauartabhängig einzelne Wärmebrücken durch die Addition beider Wärmetransportanteile verstärken (hier: Sockel) oder abmindern (hier: Deckenanschluss) können. Bei der vorliegenden Bauart der 2D-Wärmebrücke Bodenplatte / Außenwand wird sich das Feuchtefeld derart verändern, dass durch diese konstruktive Wärmebrücke ein erhöhter Materialfeuchtegehalt in dieser Ecke und im unteren Bereich des gedämmten Gefaches auftreten wird.

5.3.2 Messung der relativen Luftfeuchte im Dämmstoff [6]

Ziel ist es, über die Messung der massebezogenen Luftfeuchte lageabhängig und zeitabhängig Ergebnisse zur konvektiven Feuchteumverteilung zu erhalten. Bei einer Feuchteumverteilung im Dämmstoff durch natürliche Konvektion nach dem Modell in BILD 4-1 ist mit einer höheren massebezogenen absoluten Luftfeuchte x [g/kg] und ggf. mit einer höheren relativen Luftfeuchte ϕ [%] an der oberen kalten Gefachecke im Vergleich zur unteren kalten Gefachecke zu rechnen.

5.3.3 Materialfeuchtemessung im Dämmstoff [6], [4]

Bei natürlicher Konvektion führt die im Dämmstoff zirkulierende Luft Wasserdampf mit sich, der nahe der oberen kalten Ecke im Dämmstoff tauend ausfällt oder gefrieren kann und dort eine Feuchteakkumulation verursacht. Dieser konvektive Feuchtetransport ist dem in Richtung des Wärmestroms vorhandenen Diffusionsstrom überlagert und führt zu einem konvektiven Feuchtegefälle von

$$(u_{kalt, oben} > u_{kalt, mittig} > u_{kalt, unten}) > (u_{warm, oben} \cong u_{warm, mittig} \cong u_{warm, unten})$$

das vom diffusionsbedingten Feuchteprofil

$$(u_{kalt, oben} = u_{kalt, mittig} = u_{kalt, unten}) > (u_{warm, oben} = u_{warm, mittig} = u_{warm, unten})$$

abweicht.

Mit dem Darr-Wäge-Verfahren nach DIN EN ISO 12570 wird der massebezogene Feuchtegehalt u [kg/kg] bestimmt.

5.3.4 Materialfeuchtemessung in der kaltseitigen Gefachbeplankung [6]

Bei einer ausgeprägten Feuchteumverteilung in der Gefachdämmung durch natürliche Konvektion ist zu erwarten, dass die Materialfeuchte der kaltseitigen Holzwerkstoffplatten nahe dem oberen Gefachrand höher ist als nahe dem unteren Gefachrand. Dies gilt nur, wenn an den oberen und unteren Gefachrändern keine Unterschiede im Wärmetransport infolge unterschiedlicher Wärmebrücken und / oder Luftleckagen auftreten.

5.3.5 Tauwasserausfall und Schimmelpilzwachstum [6]

In vorangegangenen Bauteilversuchen in einer Doppelklimakammer und in Simulationsrechnungen wurden Schimmelpilzbefall bzw. ein Schimmelpilzwachstumsrisiko durch Feuchteanreicherung in der oberen kaltseitigen Gefachecke infolge natürlicher Konvektion im Dämmstoff aufgezeigt. Mit einem derartigen Schimmelpilzbefall innerhalb des Gefaches ist zu rechnen, wenn nach der Tauperiode (Winter) das im Gefach ausgefallene Tauwasser durch eine hohe Feuchtespeicherfähigkeit der betauten Baustoffe nur langsam im Frühjahr bei warmen Außentemperaturen austrocknen kann. Untersuchungen zum Schimmelpilzbefall wurden an der Schichtgrenze der außenseitigen Gefachbeplankungen (OSB4 und UDP-Platten) zur Gefachdämmung durch ein Labor für mikrobielle Prozess durchgeführt.

5.4 Untersuchungsmethoden zu weiteren bauphysikalischen Größen

5.4.1 Lufttemperatur und relative Luftfeuchte

Mit sechs Sensoren wurden nahe der untersuchten Bauteile die Lufttemperatur und relative Luftfeuchte des Innen- und Außenklimas gemessen. Dies ermöglicht

- die Bewertung der Messergebnisse zur Untersuchung der natürlichen Konvektion in Außenwand-Gefachdämmungen und des thermisch-hygrischen Bauteilverhaltens von Dach und Bodenplatte über dem Kriechkeller,

- eine Bewertung des Kriechkellers in Bezug auf Tauwasserschadensrisiken an der darüber liegenden Bodenplatte (Holztafelelemente),
- eine Aufzeichnung des Temperaturverlaufes in der nordseitigen Hinterlüftungsebene sowie
- eine Bewertung des Innenraumklimas.

5.4.2 Temperatur- und Materialfeuchtemessungen in der kaltseitigen Gefachbeplankung

Neben der Erfassung der Materialfeuchte in der außenseitigen Gefachbeplankung nahe der potentiellen Tauwasserebene in der NNO-Außenwand – in einem Gefach mit Messfühlern zum Nachweis der natürlichen Konvektion – wurden zu Vergleichszwecken die Materialfeuchten in den außenseitigen Gefachbeplankungen der Holztafelelemente in

- der SSW-Außenwand,
- der Bodenplatte sowie
- in zwei Gefachen des Daches (Traufbereich ohne darüber liegender PV-Elemente, Bereich mit darüber liegenden PV-Elementen)

gemessen. Diese vergleichenden Messungen geben Auskunft zu den täglichen und jährlichen Temperaturamplituden der verschiedenen Bauteile mit dunklen Oberflächen und einer Hinterlüftung.

5.4.3 In-situ-Messungen der Wärmestromdichten in Außenwänden

Eine Erfassung des effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen ist mit in-situ-Messungen der Wärmestromdichten sowie der Oberflächentemperaturen über einen langen Zeitraum möglich. Diese Messungen zum tatsächlichen thermischen Verhalten sind Bestandteil der Qualitätssicherung des Außenwandaufbaus und wurden an je einem Gefach in der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand durchgeführt.

6 Messprogramm – untersuchte Bauteile und Messverfahren

6.1 IR-Thermografie des Gebäudes

Die Infrarot-Thermografie wurde ergänzend zu einer vom Bauherrn im Rahmen der thermischen Bauüberwachung beauftragten Blower-Door-Messung durchgeführt. Ziel der eigenen thermografischen Untersuchung ist der Nachweis des Wärmeschutzes der Gebäudehülle im Bereich von untersuchten Bauteilen. Die zweimalige Untersuchung gleicher Bereiche mittels

- Thermografie bei atmosphärischem Luftdruck vor Sonnenaufgang und vor Beginn der Luftdichtigkeitsuntersuchung mit der Blower Door sowie
- Thermografie bei ca. 40 Pa Unterdruck im Gebäude, erzeugt mit der Blower Door

ermöglicht die Unterscheidung von Wärmebrücken und Luftleckagen. Für nahezu stationäre Temperaturverhältnisse in den Bauteilen wurde das Gebäude durch den Auftraggeber mindestens 6 Stunden vor Messbeginn gleichmäßig beheizt. Aus den raumweise gemessenen Lufttemperaturen und der Außenlufttemperatur wurden kritische Oberflächentemperaturen für jeden Raum nach Gl. (6-1) ermittelt.

Zur Erläuterung:

Es steht die Frage, ob an Bauteilen der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2: 2013-02 eingehalten ist. Bauteile erfüllen die Mindestanforderungen, wenn auf deren Innenoberfläche die Gefahr der Tauwasserbildung nicht besteht. Dies ist der Fall, wenn an jeder Stelle der Temperaturfaktor $f_{Rsi} = (\theta_{si} - \theta_e) / (\theta_i - \theta_e) \geq 0,70$ ist. Unter Normklimabedingungen entspricht das einer raumseitigen Oberflächentemperatur von $\theta_{si} \geq +12,6^\circ\text{C}$. Fenster sind davon ausgenommen. Für sie gilt die DIN EN ISO 13788: 2013-05.

Als Normklima sind für die Außenlufttemperatur $\theta_e = -5^\circ\text{C}$, für das Innenraumklima $\theta_i = +20^\circ\text{C}$ und $\phi = 50\%$ und für die Wärmeübergangswiderstände $R_{si} = 0,25\text{m}^2\text{K/W}$ (beheizte Räume) und $R_{se} = 0,04\text{m}^2\text{K/W}$ anzusetzen.

Da Normklima bei Messungen an Gebäuden im Allgemeinen nicht vorliegt, wird für die Bewertung des Mindestwärmeschutzes ein Bezug zwischen Normklima und tatsächlichen Klima notwendig, siehe Gl. (6-1). [18]

$$\theta_{si,min-ist} = \theta_{e-vorhanden} + \frac{(\theta_{si,min-Norm} - \theta_{e-Norm}) \cdot (\theta_{i-vorhanden} - \theta_{e-vorhanden})}{(\theta_{i-Norm} - \theta_{e-Norm})} \quad (6-1)$$

$$\theta_{si,min-ist} = \theta_{e-vorhanden} + \frac{(12,6^\circ\text{C} + 5^\circ\text{C}) \cdot (\theta_{i-vorhanden} - \theta_{e-vorhanden})}{(20^\circ\text{C} + 5^\circ\text{C})}$$

$\theta_{si,min-ist}$	raumseitige kritische Oberflächentemperatur ($^\circ\text{C}$)
$\theta_{si,min-Norm}$	raumseitige Oberflächentemperatur, die nach DIN 4108-2 auf kapillaraktiven Oberflächen nicht unterschritten werden darf, $\theta_{si,min-Norm} = 12,6^\circ\text{C}$
$\theta_{e-vorhanden}$	Außenlufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung ($^\circ\text{C}$)
$\theta_{i-vorhanden}$	Raumlufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung ($^\circ\text{C}$)
θ_{e-Norm}	Norm- Außenlufttemperatur, $\theta_{e-Norm} = -5^\circ\text{C}$
θ_{i-Norm}	Norm- Innenlufttemperatur, $\theta_{i-Norm} = 20^\circ\text{C}$

Ist die mit der IR-Thermografie gemessene Oberflächentemperatur höher als die für den Raum ermittelte kritische Oberflächentemperatur, dann ist der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 eingehalten.

Die IR-Thermografiemessung erfolgte mit der Infrarotkamera FLIR B425 mit 320x240 Pixel, mit 45° Objektiv, f=10mm, einem Messbereich von -20°C bis $+350^\circ\text{C}$, einer Temporauflösung von 50 mK und einem maximalen Messfehler von 2%.

6.2 NNO-Außenwand

In der NNO-Außenwand wurden 5 Gefache unterschiedlicher Wandaufbauten (siehe Abschnitt 3.3 und Anhang 9.2) in die Untersuchungen auf Tauwasserausfall und Schimmelpilzbefall (siehe Abschnitt 5.3.5) eingezogen. Die Gefache 1 bis 4 haben in der außenseitigen Gefachbeplankung kreisrunde Entnahmestellen (d~70mm) nahe dem oberen Gefachrand und nahe dem unteren Gefachrand. In Gefach Nr. 5 ist eine Entnahmestelle angeordnet. Die Lage und Bezeichnungen der einzelnen Öffnungsstellen sind in Bild 6-1 dargestellt.

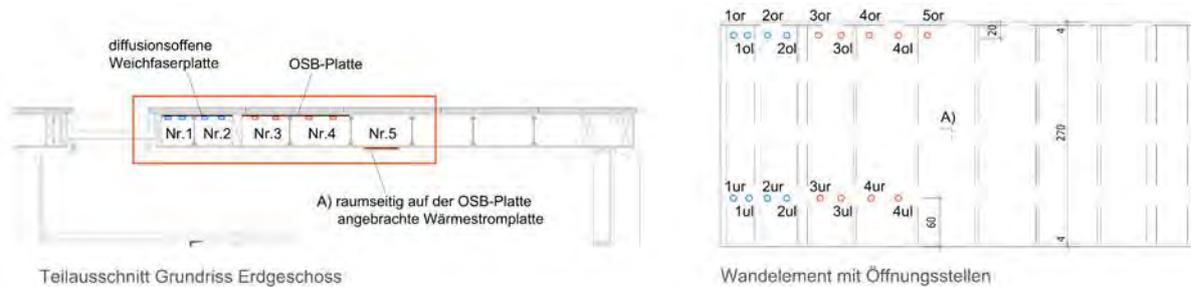


BILD 6-1 ÜBERSICHTSZEICHNUNG ZUR ANORDNUNG VON „ENTNAHMESTELLEN“ IN DEN AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNGEN IN DER NNO-AUßENWAND DES ERDGESCHOSSES

Das Monitoring auf Tauwasserausfall fand an folgenden Tagen statt: 27.4.2012, 24.01.2013, 18.04.2013 und am 04.03.2015. Für die Schimmelpilzdiagnostik wurden Abklatschproben und zum Teil Klebefilmproben und Materialproben an die Fa. MICOR geliefert. Die Probenentnahmen erfolgten am 27.4.2012, 18.04.2013 und am 04.03.2015.

Die Messfühler in Gefach Nr. 5 der NNO-Außenwand dienen vorrangig dem Nachweis des Wärme- und Feuchtetransports aus natürlicher Konvektion. BILD 6-2 zeigt die Anordnung von Temperaturfühlern in verschiedenen Höhen in halber Dämmdicke – dem Bereich der größten Temperatursenkung bei ausgeprägter natürlicher Konvektion im Vergleich zum Temperaturfeld ohne natürliche Konvektion in der Dämmung.

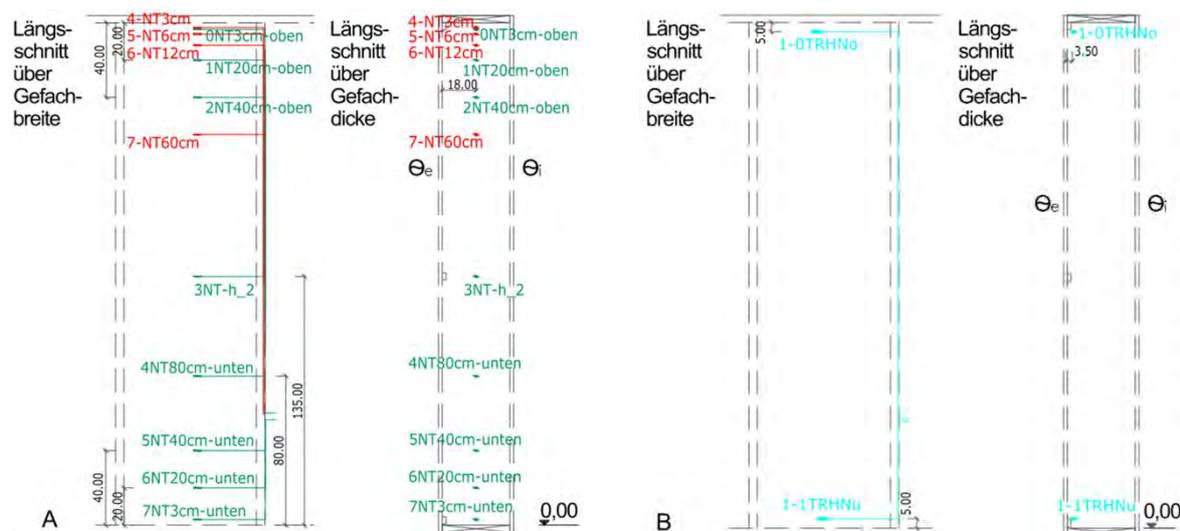


BILD 6-2 ÜBERSICHTSZEICHNUNGEN A) ZUR ANORDNUNG VON TEMPERATURFÜHLERN IN DER GEFACHDÄMMUNG UND B) ZUR ANORDNUNG VON FÜHLERN ZUR MESSUNG DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE UND DER TEMPERATUR IN DER GEFACHDÄMMUNG

TABELLE 6.2-1 weist die Höhen und Kurzbezeichnungen der Temperaturmessfühler im gedämmten Gefach Nr. 5 aus, siehe auch BILD 6-2. Da die Temperaturen auf dieser vertikalen Achse in halber

Gefachbreite und in halber Dämmdicke mit zwei verschiedenen Datenloggern gemessen werden, ist ein Messpunkt mit zwei Sensoren belegt. Dies sichert den Abgleich des Messfehlers zwischen beiden Loggern. Zum Einsatz kommen

- NTC-Fühler Typ N (Messbereich: -20°C ... +100°C, max. Abweichung: von -20° ...0°C: ± 0,4K; 0°C ... +70°C: ±0,1K) und Datenlogger ALMEMO 2890-9 der Fa. Ahlborn,
- NTC-Fühler (Messbereich: -30°C ... +120°C, max. Abweichung: ±1K) und Datenlogger Thermofox und Multisensor der Firma Scanntronik.

Ein erneutes Kalibrieren der Messkette während der ca. dreijährigen Laufzeit des Messprogrammes war aufgrund des festen Einbaus der Sensoren in den Bauteilen nicht möglich.

TABELLE 6.2-1 LAGE UND BEZEICHNUNG DER TEMPERATURFÜHLER IN DER ZELLULOSE-EINBLASDÄMMUNG VON GEFACH NR. 5 IN DER NNO-WAND, GELEGEN AUF DER VERTIKALEN ACHSE IN HALBER GEFACHBREITE UND HALBER DÄMMDICKE (BEZUGSHÖHE: UNTERKANTE GEFACHDÄMMUNG)

Lage und Beschreibung des Sensors	Kurzbezeichnung	Höhe (m) im Gefach	Messsystem der Firma
NNO-Wand, Temperatur, <u>3cm</u> von <u>oben</u> (Steckplatz <u>0</u>)	0-NT3cm-oben	2,67	Ahlborn
NNO-Wand, Temperatur, <u>3cm</u> von <u>oben</u> (Steckplatz <u>4</u>)	4-NT3cm	2,67	Scanntronik
NNO-Wand, Temperatur, <u>6cm</u> von <u>oben</u> (Steckplatz <u>5</u>)	5-NT6cm	2,64	Scanntronik
NNO-Wand, Temperatur, <u>12cm</u> von <u>oben</u> (Steckplatz <u>6</u>)	6-NT12cm	2,58	Scanntronik
NNO-Wand, Temperatur, <u>20cm</u> von <u>oben</u> Steckplatz <u>1</u>)	1-NT20cm-oben	2,50	Ahlborn
NNO-Wand, Temperatur, <u>40cm</u> von <u>oben</u> Steckplatz <u>2</u>)	2-NT40cm-oben	2,30	Ahlborn
NNO-Wand, Temperatur, <u>60cm</u> von <u>oben</u> (Steckplatz <u>7</u>)	7-NT60cm	2,10	Scanntronik
NNO-Wand, Temperatur, in halber Wandhöhe Steckplatz <u>3</u>)	3-NT-h_2	1,35	Ahlborn
NNO-Wand, Temperatur, <u>80cm</u> von <u>unten</u> Steckplatz <u>4</u>)	4-NT-80cm-unten	0,80	Ahlborn
NNO-Wand, Temperatur, <u>40cm</u> von <u>unten</u> Steckplatz <u>5</u>)	5-NT-40cm-unten	0,40	Ahlborn
NNO-Wand, Temperatur, <u>20cm</u> von <u>unten</u> Steckplatz <u>6</u>)	6-NT-20cm-unten	0,20	Ahlborn
NNO-Wand, Temperatur, <u>3cm</u> von <u>unten</u> Steckplatz <u>7</u>)	7-NT-3cm-unten	0,03	Ahlborn

Ergänzend dazu wurden nahe dem oberen und dem unteren Gefachrand in der Zellulose-Einblasdämmung je ein kapazitiver Miniatur-Feuchtefühler vom Typ FHAD46-0 der Firma Ahlborn eingebaut. Der Einsatzbereich dieser werkseitig kalibrierten Sensoren zur Messung von relativer Luftfeuchte und Temperatur liegt bei -30°C ... +100°C und 5%...98% relativer Luftfeuchte. Als maximale Abweichungen sind herstellerseitig ausgewiesen ± 0,4K bei -20° ...0°C und ± 0,1K bei 0°C ... +70°C sowie ± 2% im Bereich < 90% relativer Luftfeuchte.



BILD 6-3 A) TEMPERATURFÜHLER IM DÄMMSTOFF, B) DER KAPAZITIVEN LUFTFEUCHTEFÜHLER (SCHUTZVLIES GEGEN STAUB) IM DÄMMSTOFF, C) FÜHLER AM FUßPUNKT VON GEFACH NR. 5 DER NNO-AUßENWAND - A) UND B) IN LAGE GEHALTEN AN GESPANNTEM FADEN

Tabelle 6.2-2 weist die Koordinaten und Kurzbezeichnungen der kapazitiven Miniatur-Feuchtefühler im gedämmten Gefach Nr. 5 aus, siehe auch BILD 6-2. Diese Fühler wurden vor dem Einbau mit einem Staubschutzvlies ausgerüstet und sind über gespannte Fäden in ihrer Lage fixiert.

TABELLE 6.2-2 LAGE UND BEZEICHNUNG DER KAPAZITIVER MINIATUR-FEUCHTEFÜHLER IN GEFACH NR. 5 IN DER NNO-WAND, GELEGEN IN HALBER GEFACHBREITE (BEZUGSHÖHE: UNTERKANTE GEFACHDÄMMUNG)

Lage und Beschreibung des Sensors	Kurzbezeichnung	Höhe (m) im Gefach	Dicke (mm) im Gefach*)
Temperatur und relative Luftfeuchte (RH), NNO-Wand, <u>oben</u> , (Steckplatz <u>0</u>)	0-TRHNo	2,65	35mm (Achismaß)
Temperatur und relative Luftfeuchte (RH), NNO-Wand, <u>unten</u> , (Steckplatz <u>1</u>)	1-TRHNu	0,05	35mm (Achismaß)

*) Schichtgrenze außenseitige Gefachbeplankung / Zellulose-Einblasdämmung: 0,0mm

Auf der innenraumseitigen OSB-Platte von Gefach Nr. 5 wurden in der Schichtgrenze zur Hanfdämmung (Installationsebene) eine Silikon-Wärmeflussplatte vom Typ 118CSI der Firma Ahlborn (5% maximale Abweichung bei 25°C) mit der Fühlerkurzbezeichnung $q-N$ und ein NTC-Oberflächentemperaturfühler (T_s-N) der Firma Ahlborn in halber Gefachhöhe und in halber Gefachbreite angeordnet. Zusammen mit den Temperaturfühlern 2-NTMF (siehe TABELLE 6.2-3) und 3-NT-h_2 (siehe TABELLE 6.2-1) sowie den Lufttemperaturfühlern innen und außen sind damit Auswertungen zum effektiven U-Wert in der Außenwand möglich.

Die Messfühler der Firma Ahlborn sind auf drei miteinander vernetzte Datenloggern vom Typ 2890-9 aufgeschaltet. Die Messdaten aller drei Logger werden über ein Modem drahtlos übertragen.

Die Materialfeuchte der außenseitigen Gefachbeplankung wird in-situ mit dem Leitfähigkeitsverfahren ermittelt – einer anerkannten Messmethode für Holz und Holzwerkstoffe. Hierbei wird im Bereich zwischen zwei teilisolierten Einstechelektroden der elektrische Widerstand bestimmt, der von dem Materialfeuchtegehalt abhängt. Je feuchter das Material desto geringer ist der Widerstand. Für eine Vielzahl von Materialien, z.B. Fichte, liegen hierfür Messkurven vor, die temperaturabhängig dem gemessenen Widerstand eine Materialfeuchte zuweisen. Für OSB-Platten wurde diese Beziehung experimentell zusammen mit dem Dahlberg-Institut Wismar [26] selbst ermittelt (siehe Anhang 9.2), da herstellungsbedingt die Materialzusammensetzungen von OSB-Platten stark variieren können und dies Einfluss auf die Materialfeuchte als Funktion des Widerstandes hat.

Zur Messung der Materialfeuchte in der außenseitigen OSB-Platte wurden Edelstahlschrauben-Paare nach DIN 7981 (3,5 x 13mm) eingeschraubt, die bis auf die Spitze mittels Lacküberzug und Dichtscheiben (d=1mm) abgedichtet wurden. Edelstahl-Federringe nach DIN 127 (d=4,1mm) sichern

die Anpressung der angeschlossenen Messleitung, siehe BILD 6-4 a, b. Mit dieser Konfiguration erfolgt die Messung der Materialfeuchte in halber Plattendicke der OSB-Platte.



BILD 6-4 FOTOS ZUR BAUWEISE UND ANORDNUNG DER ELEKTRODEN ZUR MATERIALFEUCHTEMESSUNG IN OSB-PLATTEN UND IN FICHTENHOLZ (A, B) SOWIE ZUR LAGE DER ZUGEORDNETEN NTC-FÜHLER ZUR TEMPERATURMESSUNG (C)

Jeweils 8 Messleitungen sind an einem Messgerät „Materialfeuchte Gigamodul“ der Fa. Scantronik angeschlossen. Dies ist ein Erweiterungsmodul mit 8 Messeingängen für den Datenlogger „Thermofox“, der die stündlich erzeugten Messwerte speichert. Zu Vergleichszwecken wurde nahe den OSB-Materialfeuchtemessstellen ein Elektrodenpaar quer zur Faser in ein auf die OSB-Platte innenseitig aufgeklebtes Fichtenholz (L x B x D= 70mm x 50mm x 10mm) geklebt, siehe BILD 6-4 c. Da die einer Materialfeuchte zuzuordnenden Widerstände auch von der Temperatur abhängen, befindet sich je ein Oberflächentemperaturfühler vom Typ NTC nahe den Materialfeuchtemessstellen (siehe BILD 6-4 c), um eine Referenztemperatur zur Temperaturkompensation zur Verfügung zu haben. Die NTC-Fühler sind an das 8-kanalige Erweiterungsmodul „Multisensor“ angeschlossen.

Die Messwerte werden in einem weiteren Datenlogger „Thermofox“ stündlich gespeichert. Die gesamte Messeinheit für 8 Materialfeuchtemessstellen mit zugeordneten Temperaturfühlern ist in BILD 6-5 dargestellt.

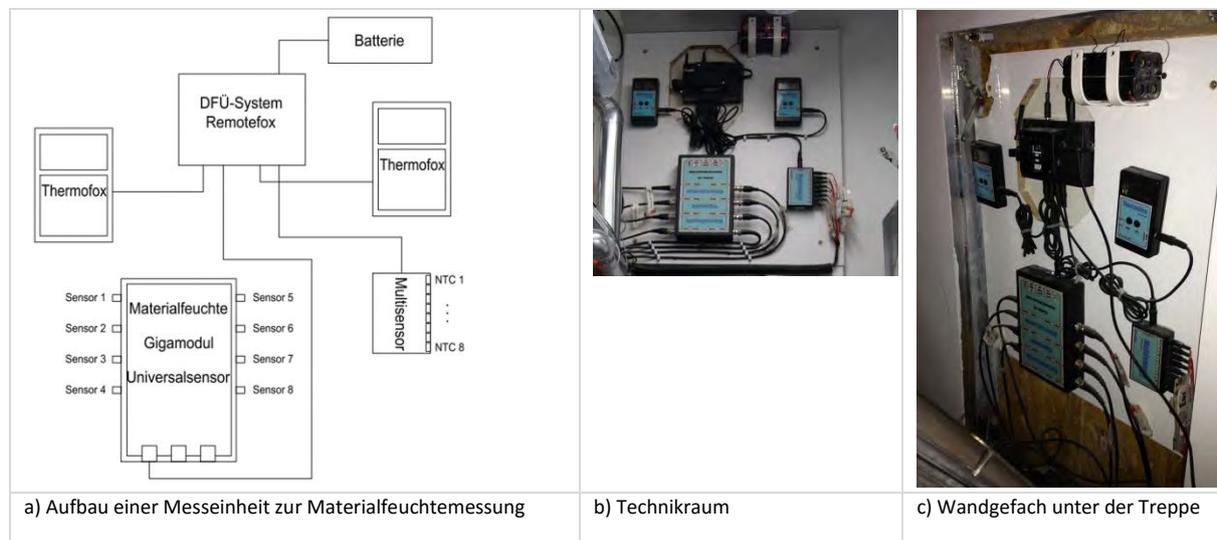


BILD 6-5 PRINZIPISSKIZZE UND FOTOS ZUM AUFBAU EINER MESSEINHEIT ZUR DATENERFASSUNG, DATENSPEICHERUNG UND DATENFERNÜBERTRAGUNG FÜR 8 MATERIALFEUCHTEMESSTELLEN UND 8 NTC-TEMPERATURFÜHLER

Bedingt durch die Gebäudeausstattung und Gebäudenutzung ist eine Anordnung der Datenlogger zur Messung der Materialfeuchte nahe den Messstellen nicht möglich. Die Messleitungen zwischen Einschlagelektroden-Paar und Messgerät sind daher bis zu 10m lang. Da während der Analyseintervalle zur Ermittlung der Materialfeuchte sehr niedrige elektrische Ströme im Bereich von Pico-Ampère durch das Material fließen, beeinflussen benachbarte Stromleitungen und andere elektrische Störquellen wie die Ladestationen für die E-Mobilität das Messsignal. Daher wurde mit den am Bau Beteiligten die

Messleitungsführung und die eingeschränkt mögliche Lage der Messeinheiten abgestimmt. Messfehler, resultierend aus der Nähe zu elektrischen Störquellen, können nicht ausgeschlossen werden. Messzeiträume ohne Gebäudenutzung (Vermietung, Ausstellung) werden als Referenz herangezogen. Eine Kalibrierung während der Messphase war nicht möglich. In der Literatur wird für die Holzfeuchtemessung nach dem Leitfähigkeitsverfahren ein Messbereich von 6% bis 28% Holzfeuchte angegeben. Je trockener das Holz, desto höher sind Einflüsse aus elektrostatischen Kräften. Verfahrenstypische Messfehler variieren nach Literaturangaben zwischen $\pm 1,3\%$ und $\pm 3,5\%$. TABELLE 6.2-3 und BILD 6-6 zeigen die Anordnungen der Materialfeuchte-Messstellen und der zur Temperaturkompensation zugeordneten Temperaturfühler.

TABELLE 6.2-3 LAGE UND BEZEICHNUNG DER MATERIALFEUCHTEFÜHLER UND ZUGEORDNETEN OBERFLÄCHENTEMPERATURFÜHLER IN GEFACH NR. 5 IN DER NNO-WAND, GELEGEN NAHE DER HALBEN GEFACHBREITE (BEZUGSHÖHE: UNTERKANTE GEFACHDÄMMUNG)

Lage des Sensors	Kurzbezeichnung	Höhe (m) im Gefach	Messgröße
NNO-Wand, EG, Gefach Nr. 5, außenseitige OSB-Platte	1-NFFo	2,45	Materialfeuchte in halber Plattendicke
	3-NFFm	1,35	
	5-NFFu	0,25	
NNO-Wand, EG, Gefach Nr. 5, Fichtenholz von L x B x D = 80mm x 50mm x 10mm innenseitig auf die außenseitige OSB-Platte geklebt	2-NFOo	2,45	Materialfeuchte in halber Plattendicke
	4-NFOm	1,35	
	6-NFOu	0,25	
NNO-Wand, EG, Gefach Nr. 5	1-NTOF	2,45	Oberflächentemperatur
	2-NTMF	1,35	
	3-NTUF	0,25	

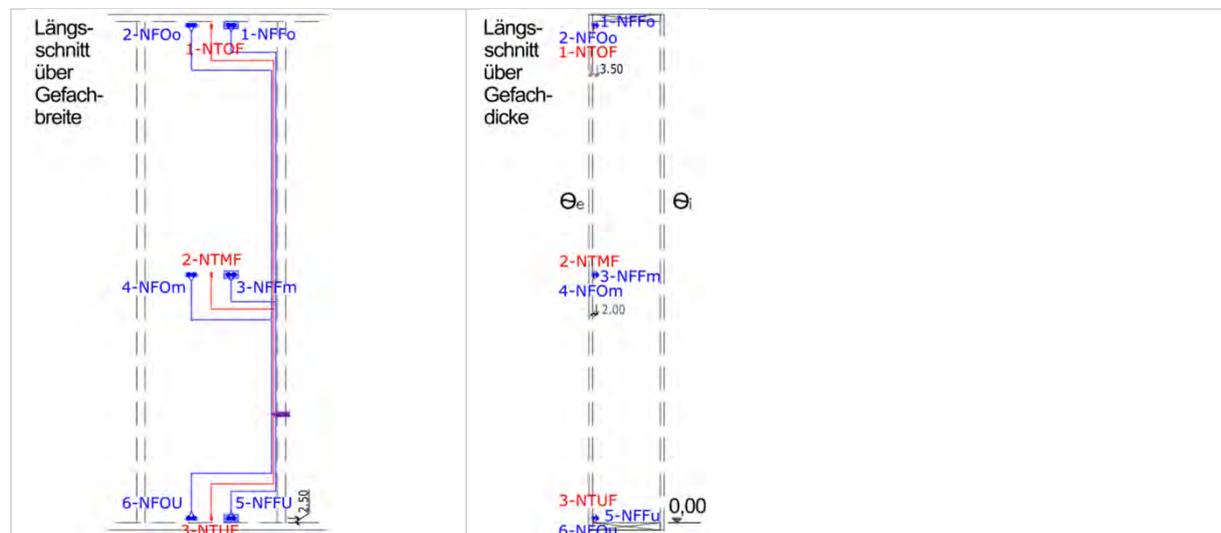


BILD 6-6 ÜBERSICHTSZEICHNUNGEN ZUR ANORDNUNG VON EINSCHLAGEELEKTRODEN IN DIE AUßENSEITIGE OSB-PLATTE UND IN FICHTENHOLZ-ADAPTER VON GEFACH NR. 5 DER NNO-AUßENWAND SOWIE ZUR ANORDNUNG DER ZUGEORDNETEN TEMPERATURFÜHLER ZWECKS TEMPERATUR-KOMPENSATION DER WIDERSTANDSMESSUNG

Alle in Gefach Nr. 5 der NNO-Außenwand eingebauten Messfühler sind in Anhang 9.1, BILD 9-4 und BILD 9-5 dargestellt.

Das Einblasen der Zellulosedämmung in Gefach Nr. 5 der NNO-Wandtafel erfolgte zu Versuchszwecken vor dem Straßentransport der Bauteile nach Berlin (ca. 700 km). Ziel der Untersuchungen waren Nachweis zur Setzungssicherheit der Einblasdämmung nach einem Straßentransport. Alle weiteren Dämmarbeiten wurden auf der Baustelle durchgeführt.

6.3 SSW-Außenwand

In der SSW-Außenwand wurde ein Gefach mit Messfühlern ausgestattet, welches im Grundriss Erdgeschoss direkt gegenüber dem Gefach Nr. 5 der NNO-Außenwand liegt, siehe BILD 5-1.

Die Ausstattung dieses Gefaches mit Messfühlern ist bis auf eine Reduzierung der Temperaturfühler in halber Gefachdicke von 12 Stück (NNO-Außenwand) auf 3 Stück (SSW-Außenwand) identisch zu Gefach Nr. 5 der NNO-Außenwand, siehe TABELLE 6.3-1, TABELLE 6.3-2 und TABELLE 6.3-3.

TABELLE 6.3-1 LAGE UND BEZEICHNUNG DER TEMPERATURFÜHLER IN DER ZELLULOSE-EINBLASDÄMMUNG VON GEFACH NR. 5 IN DER SSW-WAND, GELEGEN AUF DER VERTIKALEN ACHSE IN HALBER GEFACHBREITE UND HALBER DÄMMDICKE (BEZUGSHÖHE: UNTERKANTE GEFACHDÄMMUNG)

Lage und Beschreibung des Sensors	Kurzbezeichnung	Höhe (m) im Gefach	Messsystem der Firma
<u>SSW-Wand, Temperatur, 5cm von oben</u> (Steckplatz 4)	4-SToT	2,65	Scantronik
<u>SSW-Wand, Temperatur, in halber Wandhöhe</u> (Steckplatz 5)	5-STmT	1,35	Scantronik
<u>SSW-Wand, Temperatur, 5cm von unten</u> (Steckplatz 6)	6-STuT	0,05	Scantronik

TABELLE 6.3-2 LAGE UND BEZEICHNUNG DER KAPAZITIVEN MINIATUR-FEUCHTEFÜHLER IN GEFACH NR. 5 IN DER SSW-WAND, GELEGEN IN HALBER GEFACHBREITE (BEZUGSHÖHE: UNTERKANTE GEFACHDÄMMUNG)

Lage und Beschreibung des Sensors	Kurzbezeichnung	Höhe (m) im Gefach	Dicke (mm) im Gefach*)
<u>Temperatur und relative Luftfeuchte (RH), SSW-Wand, oben</u> , (Steckplatz 2)	1-2TRHSo	2,65	35mm (Achismaß)
<u>Temperatur und relative Luftfeuchte (RH), SSW-Wand, unten</u> , (Steckplatz 3)	1-3TRHSu	0,05	35mm (Achismaß)

*) Schichtgrenze außenseitige Gefachbeplankung / Zellulose-Einblasdämmung: 0,0mm

TABELLE 6.3-3 LAGE UND BEZEICHNUNG DER MATERIALFEUCHTEFÜHLER UND ZUGEORDNETEN OBERFLÄCHENTEMPERATURFÜHLER IN GEFACH NR. 5 IN DER SSW-WAND, GELEGEN NAHE DER HALBEN GEFACHBREITE (BEZUGSHÖHE: UNTERKANTE GEFACHDÄMMUNG)

Lage des Sensors	Kurzbezeichnung	Höhe (m) im Gefach	Messgröße
<u>SSW-Wand, EG, Material-Feuchte, Fichtenholz</u> von L x B x D = 80mm x 50mm x 10mm innenseitig auf die außenseitige OSB-Platte geklebt, <u>oben</u> / <u>mittig</u> , <u>unten</u> , (Steckplätze 1, 3 5)	1-SFFo	2,45	Materialfeuchte in halber Plattendicke
	3-SFFm	1,35	
	5-SFFu	0,25	
<u>SSW-Wand, EG, Gefach Nr. 5, Material-Feuchte, außenseitige OSB-Platte, oben</u> / <u>mittig</u> , <u>unten</u> , (Steckplätze 2, 4, 6)	2-SFOo	2,45	Materialfeuchte in halber Plattendicke
	4-SFOm	1,35	
	6-SFOu	0,25	
<u>SSW-Wand, EG, Gefach Nr. 5, Oberflächen-Temperaturfühler, oben</u> / <u>mittig</u> , <u>unten</u> , (Steckplätze 1, 2, 3)	1-SToF	2,45	Oberflächentemperatur
	2-STmF	1,35	
	3-STuF	0,25	

Analog zur NNO-Außenwand wurde auf der innenraumseitigen OSB-Platte von Gefach Nr. 5 in der Schichtgrenze zur Hanfdämmung (Installationsebene) eine Wärmestromplatte (q -S) und ein Oberflächentemperaturfühler (T_s -S) in halber Gefachhöhe und in halber Gefachbreite angeordnet. Zusammen mit den Temperaturfühlern 2-STmF (siehe TABELLE 6.3-3) und 5-STmT (siehe TABELLE 6.3-1)

sowie dem Lufttemperaturfühler innen sind damit Auswertungen zum effektiven U-Wert in der SSW-Außenwand möglich.

Alle in diesem Gefach der SSW-Außenwand eingebauten Messfühler sind in Anhang 9.1 (BILD 9-6 und in BILD 9-7) dargestellt.

6.4 Bodenplatte

Ziel der Messungen in der Bodenplatte sind die Materialfeuchten nahe der außenseitigen Holzzementplatte (in dem Fichteholzstück an der Schichtgrenze Holzzementplatte / Dämmung gelegen), in der Gefachdämmung und in den Kerto-Gurten der TJI-Träger. Dazu wurden

- Materialfeuchtemessungen nach dem Leitfähigkeitsverfahren mit Messtechnik der Fa. Scantronik (siehe Abschnitt 6.1) und
- Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Dämmstoff nahe der Schichtgrenze zur außenseitigen Holzzementplatte mit kapazitiven Miniatur-Feuchtefühlern vom Typ FHAD46-0 der Firma Ahlborn

durchgeführt. Ergänzend erfolgten Messungen zu den Lufttemperaturen und den relativen Luftfeuchten im Kriechkeller und im Wohnbereich des Erdgeschosses. BILD 9-2 in Anhang 9.1 weist die Lage der Messfühler im Bodengefach aus, ebenso BILD 9-3, TABELLE 6.4-1 und TABELLE 6.4-2.

TABELLE 6.4-1 LAGE UND BEZEICHNUNG DER KAPAZITIVEN FEUCHTEFÜHLER IM BODENGEFACH (BEZUGSHÖHE: UNTERKANTE GEFACHDÄMMUNG)

Lage und Beschreibung des Sensors	Kurzbezeichnung	Breite (m) im Gefach	Höhe (mm) im Gefach*)
<u>Temperatur und relative Luftfeuchte (RH), Bodengefach, mittig (Steckplatz 4)</u>	1-4TRHBm	mittig	5mm (Achismaß)
<u>Temperatur und relative Luftfeuchte (RH), Bodengefach, nahe Kerto-Gurt (Steckplatz 5)</u>	1-5TRHBk	randnah	5mm (Achismaß)

*) Schichtgrenze außenseitige Gefachbeplankung / Zellulose-Einblasdämmung: 0,0mm

TABELLE 6.4-2 LAGE UND BEZEICHNUNG DER MATERIALFEUCHTEFÜHLER UND ZUGEORDNETEN OBERFLÄCHENTEMPERATURFÜHLER IN DER BODENPLATTE (BEZUGSHÖHE: UNTERKANTE GEFACHDÄMMUNG)

Lage des Sensors	Kurzbezeichnung	Breite im Gefach	Messgröße, Lage
<u>Bodengefach, Material-Feuchte, Fichtenholz von L x B x D = 80mm x 50mm x 10mm innenseitig auf die außenseitige Holzzementplatte geklebt, (Steckplatz 6)</u>	6-BFF	mittig	Materialfeuchte in halber Plattendicke Fichte
<u>Bodengefach, Material-Feuchte, Kertogurt, (Steckplatz 6 und 7), Südost oder Südwest gelegen, siehe BILD 9-3</u>	7-BFK1-SO	randnah	Materialfeuchte 5mm über der Schichtgrenze
	8-BFK1-SW	randnah	
<u>Bodengefach, Oberflächen-Temperaturfühler zur Temperaturkompensation der Materialfeuchtemessung (Steckplätze 7 und 8)</u>	7-BTF	nahe Fichtenholz	Oberflächen-temperatur
	8-BTK-SW	nahe Kerto-Gurt	

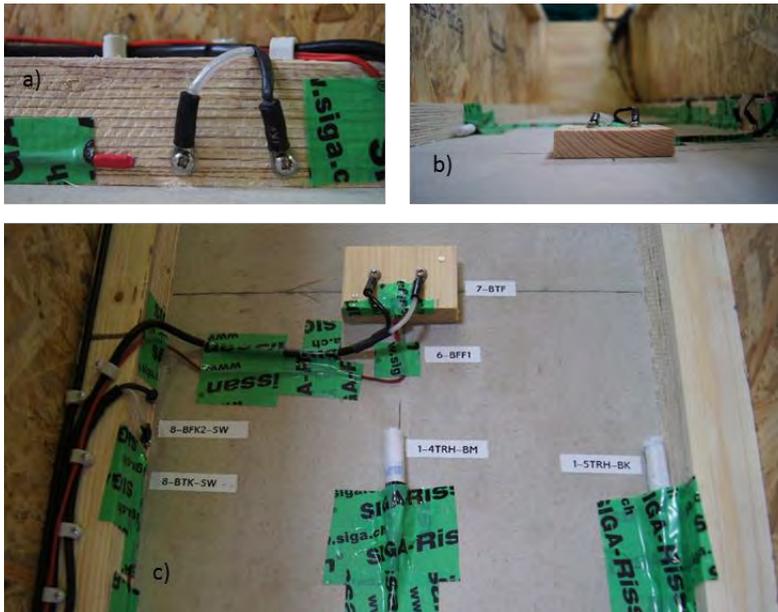


BILD 6-7 FOTOS ZUR BAUWEISE UND ANORDNUNG DER MESSFÜHLER IM BODENGEFACH: A) EINSCHLAGEELEKTRODEN IN KERTO-GURT UND ZUGEHÖRIGER TEMPERATURFÜHLER ZUR TEMPERATURKOMPENSATION DER MATERIALFEUCHTE, B) EINSCHLAGEELEKTRODEN IN FICHTENHOLZ, C) ÜBERBLICK ÜBER DIE LAGE DER MESSFÜHLER

6.5 Dachplatte

Ziel der Messungen in der Dachplatte sind die Temperaturen und Materialfeuchten in der außenseitigen OSB-Platte und in der Gefachdämmung nahe der außenseitigen Schichtgrenze. Dazu wurden

- Materialfeuchtemessungen nach dem Leitfähigkeitsverfahren mit Messtechnik der Fa. Scantronik (siehe Abschnitt 6.1)
- Temperaturmessung an der Schichtgrenze Gefachdämmung / außenseitige OSB-Platte (Fa. Scantronik) und
- Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte in der Gefachdämmung mit 5mm Abstand zur außenseitigen Schichtgrenze mit kapazitiven Miniatur-Feuchtefühlern vom Typ FHAD46-0 der Firma Ahlborn

durchgeführt. Ergänzend erfolgten Messungen zu den Lufttemperaturen und relativen Luftfeuchten im Hauswirtschaftsraum nahe der Dachplatte. BILD 9-8 und BILD 9-9 weisen die Lage der Messfühler in der Dachplatte aus, ebenso TABELLE 6.5-1, TABELLE 6.5-2, BILD 6-8 und BILD 6-9.

TABELLE 6.5-1 BEZEICHNUNG DER KAPAZITIVEN FEUCHTEFÜHLER IM BODENGEFACH (BEZUGSHÖHE: UNTERKANTE GEFACHDÄMMUNG), LAGE: SIEHE BILD 9-9

Lage und Beschreibung des Sensors	Kurzbezeichnung	Breite (m) im Gefach	Höhe (mm) im Gefach*)
<u>Temperatur und relative Luftfeuchte (RH), Dachgefach, mit PV-Modul (Steckplatz 6)</u>	1-6TRH-DPV	mittig	5mm (Achismaß)
<u>Temperatur und relative Luftfeuchte (RH), Dachgefach, ohne PV-Modul (Steckplatz 7)</u>	1-7TRH-DoPV	mittig	5mm (Achismaß)

*) Schichtgrenze außenseitige OSB-Platte/ Zellulose-Einblasdämmung: 0,0mm

TABELLE 6.5-2 LAGE UND BEZEICHNUNG DER MATERIALFEUCHTEFÜHLER UND DER ZUGEORNETEN OBERFLÄCHENTEMPERATURFÜHLER IN DER DACHPLATTE (BEZUGSHÖHE: OBERKANTE GEFACHDÄMMUNG)

Lage des Sensors	Kurzbezeichnung	Breite im Gefach	Messgröße
Dachgefach, Materialfeuchte in halber Plattendicke der außenseitigen OSB-Platte nahe N-Außenwand im Bereich der PV-Module (Steckplatz 7)	7-DO-N-PV	mittig	Materialfeuchte
Dachgefach, Materialfeuchte in halber Plattendicke der außenseitigen OSB-Platte nahe N-Außenwand ohne PV-Modul – traufnah (Steckplatz 8)	8-DO-N-oPV	mittig	Materialfeuchte
Dachgefach, Oberflächen-Temperaturfühler zur Temperaturkompensation der Materialfeuchtemessung zugeordnet zu 7-DO-N-PV	8-DT-PV	mittig	Oberflächentemperatur



Grundriss Obergeschoss
(Entwurf / Architekturzeichnung Werner Sobeck Engineering & Design)

BILD 6-8 ÜBERSICHTSZEICHNUNG GRUNDRISS OBERGESCHOSS MIT KENNZEICHNUNG DER LAGE VON GEFACHEN MIT INSTALLIERTEN MESSFÜHLERN IN DER DACHPLATTE

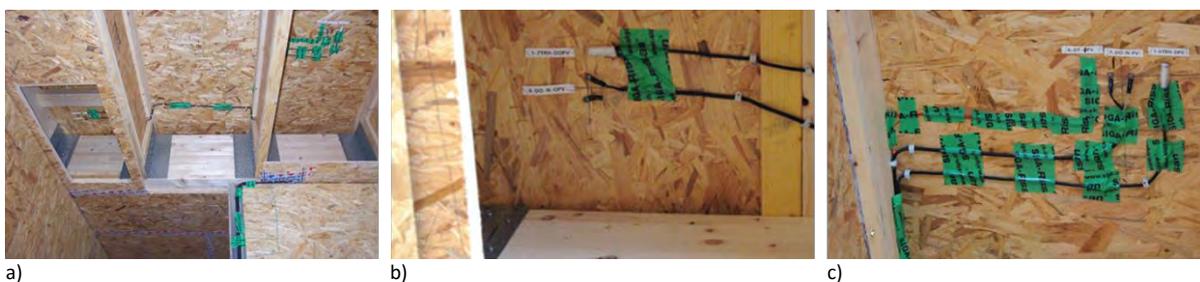


BILD 6-9 FOTOS ZUR BAUWEISE UND ANORDNUNG DER MESSFÜHLER IN DER DACHPLATTE a) ÜBERSICHT, b) EINSCHLAGELEKTRODEN UND ZUGEHÖRIGE TEMPERATURFÜHLER ZUR TEMPERATURKOMPENSATION DER MATERIALFEUCHTE IN DER AUßENSEITIGEN OSB-PLATTE IM TRAUFNAHEN BEREICH OHNE PV-MODULE B) DTO., ZUDEM MIT OBERFLÄCHENTEMPERATURFÜHLER ZUR TEMPERATURKOMPENSATION DER MATERIALFEUCHTE – ALLE MESSFÜHLER IM BEREICH VON PV-MODULEN

7 Untersuchungsergebnisse

7.1 Ergebnisse der thermischen Bauabnahme mit IR-Thermografie

Eine Thermografie der mit Messfühlern und Entnahmeöffnungen ausgestatteten Gefache war nach Gebäudefertigstellung aufgrund der Zugänglichkeit nur an der NNO-Außenwand und SSW-Außenwand möglich. Die Gefache in der Bodenplatte und in der Dachplatte waren durch Möblierung nicht einsehbar.

Die thermografischen Untersuchungen bei natürlichem Luftdruck und bei ca. 40 Pa Unterdruck im Gebäude zeigen im Vergleich mit der Konstruktionszeichnung, dass

- an der Kante Außenwand / Bodenplatte (Sockelbereich) eine geometrische und konstruktive Wärmebrücke (geringfügig) ohne Unterschreitung der kritischen Oberflächentemperatur von 15,6°C gegeben ist,
- an der Kante SSW-Außenwand / Bodenplatte geringfügige Luftleckagen auftraten,

siehe BILD 7-1 und BILD 7-2.



BILD 7-1 IR-THERMOGRAMME UND ZUGEORDNETE FOTOS VON DER NNO-AUßENWAND IM ERDGESCHOSS BEI NATÜRLICHEM LUFTDRUCK IM GEBÄUDE MIT KENNZEICHNUNG VON GEFACH 5 MIT MESSFÜHLERN

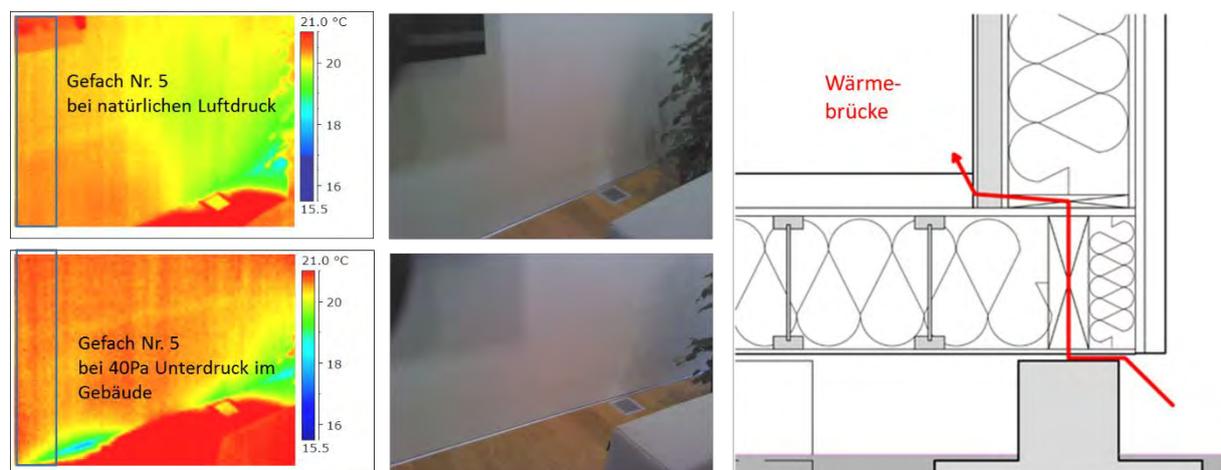


BILD 7-2 IR-THERMOGRAMME UND ZUGEORDNETE FOTOS VON DER SSW-AUßENWAND IM ERDGESCHOSS BEI NATÜRLICHEM LUFTDRUCK IM GEBÄUDE UND BEI 40 PA UNTERDRUCK IM GEBÄUDE MIT KENNZEICHNUNG VON GEFACH 5 MIT MESSFÜHLERN

Des Weiteren wurden Unterschreitungen der kritischen Oberflächentemperatur (der Mindestwärmeschutz ist nicht eingehalten) festgestellt:

- an den Ecken NNO-Außenwand / vollverglaste O-Außenwand / Bodenplatte (Wärmebrücke), SSW-Außenwand / vollverglaste O-Außenwand / Bodenplatte (Wärmebrücke) sowie SSW-Außenwand / vollverglaste W-Außenwand / Bodenplatte (Wärmebrücke)
- an der Kante NNO-Außenwand / vollverglaste O-Außenwand im Erdgeschoss, insbesondere auf dem Fensterrahmen (umgebungsbedingte Wärmebrücke mit vorhängender Gardine)
- an der Fensterbank des vertikalen Fensterbandes
- an der Kante SSW-Außenwand / Bodenplatte, insbesondere im Bereich der Treppe (Luftleckage).

Weitere Randbedingungen zu den thermografischen Untersuchungen und weitere Ergebnisse sind in [19] enthalten.

Die IR-Innenthermografien belegen den hohen Wärmedämmstandard der opaken Bauteile. Für die Messungen zum Nachweis von natürlicher Konvektion in Außenwanddämmungen relevant ist die geringfügige Wärmebrücke an der Fuge Bodenplatte über dem Kriechkeller zu den Außenwänden, siehe BILD 7-2. Die architektonisch gewollten Anschlüsse von Metallrahmen der Fenster, Türen und Festverglasungen an die Außenbauteile in Holztafelbauweise sind relevante Wärmebrücken.

7.2 Außenklima in der Hinterlüftungsschicht der NNO-Fassade

Über den Messzeitraum vom Mai 2012 bis September 2015 lagen die Außenlufttemperaturen in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand bis auf März 2013 über den mittleren monatlichen Außenlufttemperaturen der EnEV 2014, siehe BILD 7-3. Dies bestätigen auch Messwerte des IBP [13], die über eine Messstation am Gebäude ermittelt wurden sowie die Wetteraufzeichnungen der Wetterstation Berlin-Tegel, siehe [24] und TABELLE 7.2-2. Die Messwerte der eigenen Messungen in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand sind zu den Messergebnissen des IBP und der Wetterstation kompatibel.

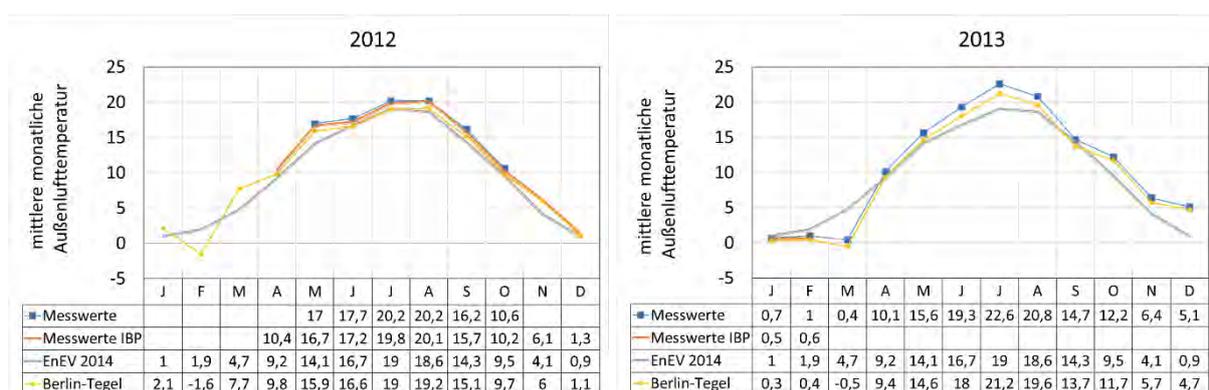
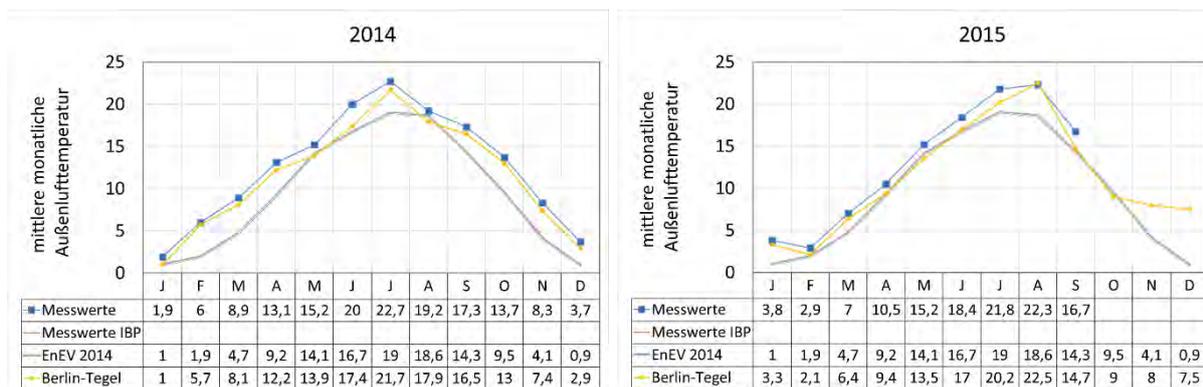


BILD 7-3 GEMESSENE MONATLICHE AUßENLUFTTEMPERATUREN IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND VON 2012 BIS 2013 UND BEZUG ZU DEN DATEN DER ENEV 2014 SOWIE DER WETTERSTATION BERLIN-TEGEL



(ANMERKUNG: JUNI 2014 MIT DEM MESSZEITRAUM 01.-09.06.2014; JULI 2014 MIT DEM MESSZEITRAUM 10.-31.07.2014)

BILD 7-4 GEMESSENE MONATLICHE AUßENLUFTTEMPERATUREN IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND VON 2014 BIS 2015 UND BEZUG ZU DEN DATEN DER ENEV 2014 SOWIE DER WETTERSTATION BERLIN-TEGEL

In den heißesten Sommermonaten waren im Monatsmittel die Außentemperaturen von 2013 bis 2015 um 3,6K bis 4,3K höher als in der EnEV. Bezogen auf den Jahresmittelwert lagen die Außenlufttemperaturen im Messzeitraum um 1,6 K bis 2,3K höher als in der EnEV, siehe TABELLE 7.2-1.

TABELLE 7.2-1 MITTELWERTE DER GEMESSENEN AUßENLUFTTEMPERATUREN BEZOGEN AUF DEN JÄHRLICHEN MESSZEITRAUM UND IM VERGLEICH ZU DEN AUßENTEMPERATURDATEN DER ENEV2014

Quelle		Mittelwerte der Außenlufttemperatur			
		Mai-Nov. 2012	Jan.-Dez. 2013	Jan.-Dez. 2014	Jan.-Sept. 2015
Eigene Messung (Hinterlüftungsebene)	(1)	17,0°C	11,5°C	11,8°C	13,2°C
IBP [13]	(2)	16,6°C			
EnEV2014	(3)	15,4°C	9,5°C	9,5°C	11,1°C
Differenz	(1) – (3)	1,6 K	2,0 K	2,3 K	2,1 K

TABELLE 7.2-2 DURCHSCHNITTSTEMPERATUREN UND ABWEICHUNGEN VOM MITTELWERT DER KLIMAAUFZEICHNUNGEN VON 1961-1990 ODER VON 1981-2010 FÜR DEN WINTER UND DEN SOMMER DER JAHRE 2012 BIS 2016 NACH [24] FÜR BERLIN

Winter	Durchschnittstemperatur	Abweichung zu MW (1,4°C) aus 1981-2010	Sommer	Durchschnittstemperatur	Abweichung zu MW (18,7°C) aus 1981-2010
2011/2012	1,8	+0,4	2012	18,3	-0,4
2012/2013	0,6	-0,8	2013	19,6	+0,9
2013/2014	3,8	+2,4	2014	19,0	+0,3
2014/2015	2,8	+1,4	2015	19,9	+1,2
2015/2016	4,0	+2,6	2016	19,5	+0,8

7.3 Klima im Kriechkeller und hygrothermische Messwerte in der außenseitigen Beplankung der Bodenplatte über dem Kriechkeller

Die in TABELLE 7.3-1 dargestellten jährlichen Mittelwerte und Maximalwerte für zwei Messfühler im Kriechkeller und einen Messfühler in der Hinterlüftung der NNO-Außenwand zeigen, dass die Feuchtelast im Kriechkeller, ausgewiesen über das Mischungsverhältnis (g Wasser /kg trockene Luft), der in der Hinterlüftungsebene vergleichbar ist. Die ebenfalls jährlich ausgewiesenen Mittel- und Maximalwerte für die relative Luftfeuchte und Lufttemperatur verdeutlichen, dass der Kriechkeller sehr gut durchlüftet ist und keine erhöhte Feuchtelast gegeben ist.

TABELLE 7.3-1 MITTELWERTE UND MAXIMALWERTE VON TEMPERATUR, RELATIVER LUFTFEUCHTE UND MISCHUNGSVERHÄLTNIS IM KRIECKKELLER UND IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND VON 2012 BIS 2015

Mischungsverhältnis *	2012		2013		2014		2015	
	20.04.-31.12.2012		01.01.-31.12.2013		01.01.-31.12.2014		01.01.2015-16.09.2015	
Sensor Nr.	Mittelwert (g/kg)	Max (g/kg)	Mittelwert (g/kg)	Max (g/kg)	Mittelwert (g/kg)	Max (g/kg)	Mittelwert (g/kg)	Max (g/kg)
1 - Kriechkeller	10,5	23,3	8,0	25,8	9,7 ¹³	22,2 ¹³	11,8 ¹⁴	26,7 ¹⁴
2 - Kriechkeller	10,7	29,4	9,9 ¹²	26,2 ¹²	9,8	24,6	11,1 ¹⁵	28,2 ¹⁵
6- Hinterlüftung Nordfassade	12,3 ¹¹	27,6 ¹¹	9,6	29,8	9,5 ¹³	28,8 ¹³	10,6	33,5

Relative Luftfeuchte	2012		2013		2014		2015	
	20.04.-31.12.2012		01.01.-31.12.2013		01.01.-31.12.2014		01.01.2015-16.09.2015	
Sensor Nr.	Mittelwert (%)	Max (%)	Mittelwert (%)	Max (%)	Mittelwert (%)	Max (%)	Mittelwert (%)	Max (%)
1 - Kriechkeller	71,4	96,8	74,2	97,2	77 ¹³	100 ¹³	64,8 ¹⁴	93,8 ¹⁴
2 - Kriechkeller	71,8	98,1	74,4 ¹²	100	74,7	100	67,7 ¹⁵	96,5 ¹⁵
6- Hinterlüftung Nordfassade	67,7 ¹¹	92,7 ¹¹	72,7	96,1	75,1 ¹³	95,8 ¹³	68,1	97,9

Lufttemperatur	2012		2013		2014		2015	
	20.04.-31.12.2012		01.01.-31.12.2013		01.01.-31.12.2014		01.01.2015-16.09.2015	
Sensor Nr.	Mittelwert (°C)	Max (°C)	Mittelwert (°C)	Max (°C)	Mittelwert (°C)	Max (°C)	Mittelwert (°C)	Max (°C)
1 - Kriechkeller	13,7	27,7	9,1	29,5	12,5 ¹³	26,9 ¹³	15,7 ¹⁴	30,1 ¹⁴
2 - Kriechkeller	14	31,7	12,6 ¹²	29,7 ¹²	12,4	28,7	14,1 ¹⁵	31,0 ¹⁵
6- Hinterlüftung Nordfassade	16,5 ¹¹	30,5 ¹¹	11,5	32,0	11,8 ¹³	31,4 ¹³	13,1	34,1

¹¹ 20.04.-15.11.12 ¹² 01.01.-24.01.13, 18.04.-31.12.13 ¹³ 01.01.-09.06.;10.07.-31.12.2014 ¹⁴ 04.03.-16.09.15
¹⁵ 01.01.-04.03.; 16.4.-21.9.15

* Beim Mischungsverhältnis bezieht man temperaturunabhängig die absolute Feuchtigkeit in Gramm auf ein Kilogramm trockene Luft.

Dies bestätigt die Empfehlungen von WINTER et al. (2008) [10] zur Durchlüftung von Kriechkellern, die an diesem Gebäude umgesetzt wurden.

Die in BILD 7-5 bis BILD 7-8 dargestellten jahresweise aufgetragenen Messergebnisse für den Kriechkeller zeigen, dass in halber Höhe im Kriechkeller nur sehr selten 100% relative Luftfeuchte in den Jahren 2012 bis 2015 auftrat und die Lufttemperatur im Kriechkeller nahe der Außenlufttemperatur liegt.

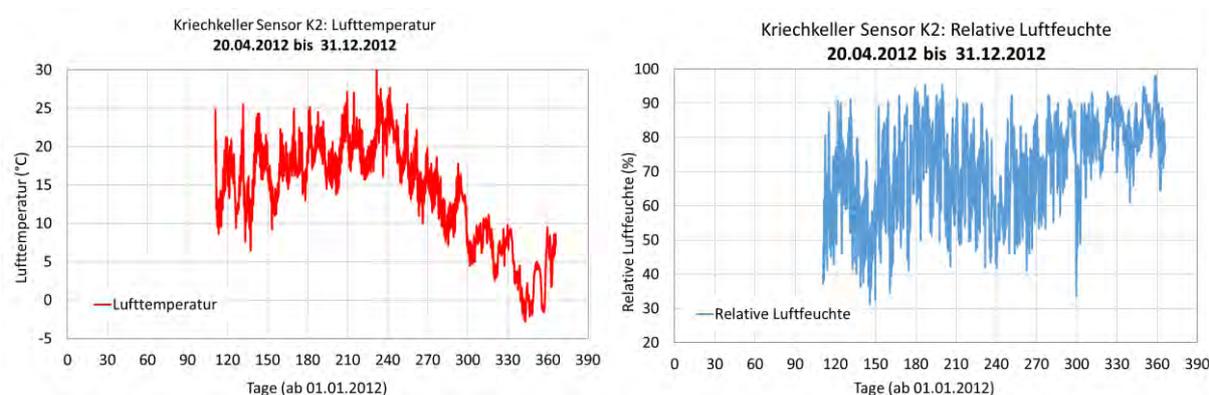


BILD 7-5 GEMESSENE TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN IM KRIECKKELLER VOM 20.04.2012 BIS 31.12.2012

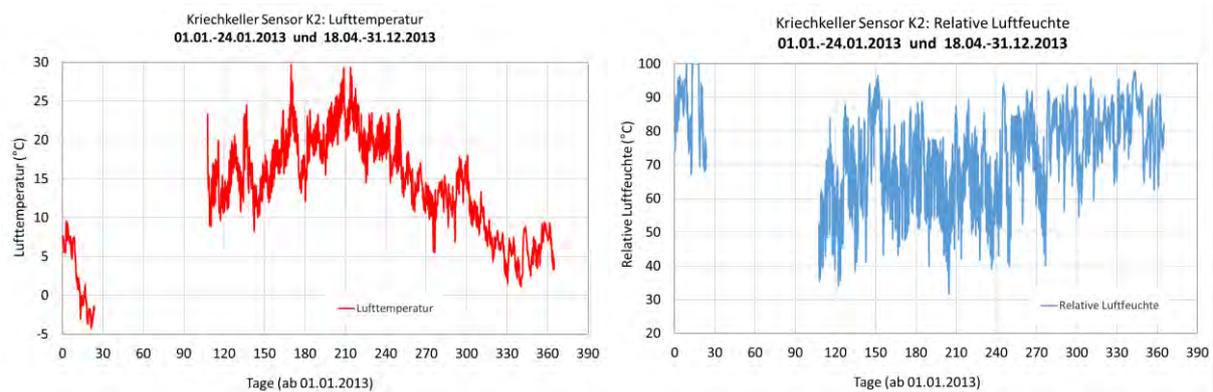


BILD 7-6 GEMESSENE TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN IM KRIECHKELLER VON 2013

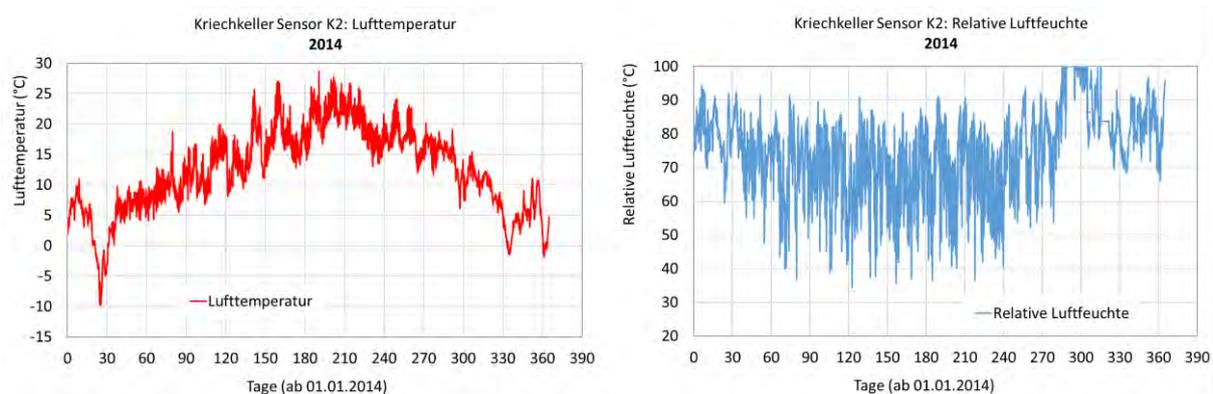


BILD 7-7 GEMESSENE TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN IM KRIECHKELLER VON 2014

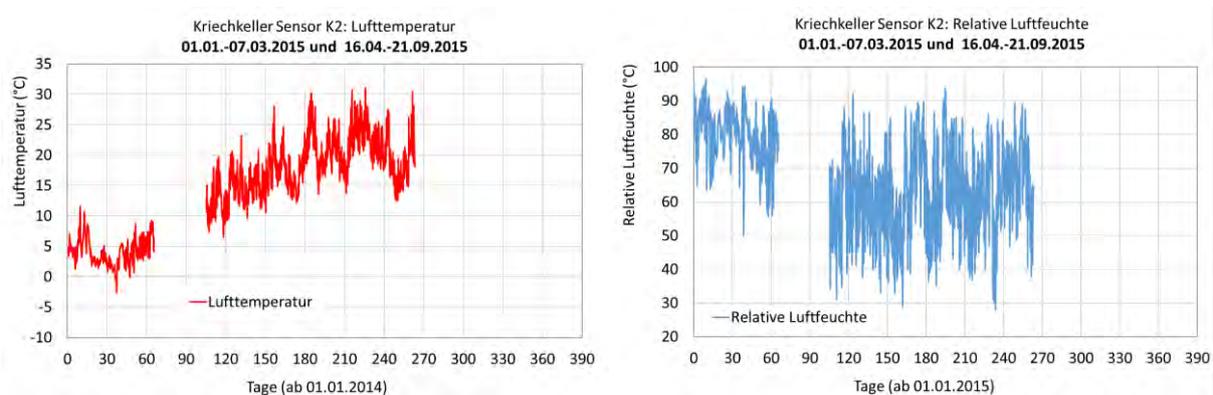


BILD 7-8 GEMESSENE TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN IM KRIECHKELLER VON 2015

Aus diesen Messergebnissen und dem Fußbodenaufbau über dem Kriechkeller wird geschlussfolgert, dass die außenseitige Zementfaserplatte keiner höheren Feuchtelast als in den Außenwänden ausgesetzt ist. Dies bestätigen auch die Messergebnisse zur Materialfeuchte nahe dieser außenseitigen Gefachbeplankung, dargestellt in Diagrammen in den Abschnitten 9.4.2 und 9.4.3 (Anhang).

7.4 Innenraumklima

7.4.1 Messergebnisse und deren Bewertung nach DIN 4108-2

Die Messungen zum Innenraumklima erfolgten mit den Ebro-Loggern vom Typ EBI20-TH1 (-30 ...+60°C mit $\pm 0,5 \dots 0,8^\circ\text{C}$, 0... 100% r.F. mit $\pm 3\%$ r.F.).

In den Sommermonaten von 2013 und 2015 wurde trotz permanenter Querlüftung in der Nutzungszeit als öffentliche Ausstellung (Mi-So von 12:00 – 18:00 Uhr) eine erhebliche Überhitzung des Gebäudes registriert. Die Messergebnisse zeigen für 2013 und 2015 mit deutlich mehr als den nach DIN 4108-2 zulässigen 1200 Übertemperaturgradstunden, dass der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nicht eingehalten ist, siehe TABELLE 7.4-1.

TABELLE 7.4-1 JÄHRLICHE ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN BEI RAUMLÜFTTEMPERATUREN VON ÜBER 26°C FÜR DIE SOMMERMONATE VON 2012 BIS 2015

Jahr	Gebäudenutzung in den Sommermonaten	NNO-AW (Hinterlüftung)	Erdgeschoss (Wohnen)			
			Übertemperatur-Gradstunden	Überschreitung von 1200 Std. um (%)	Stunden	Tage
2012	Vermietung Familie 1	461,5	242		173	7,2
2013	für öffentliches Publikum	485,9	1840	53%	753	31,4
2014	Vermietung Familie 2	405,5	444,5		359	14,9
2015	für öffentliches Publikum	1015,0	2292,6	91%	883	36,8

TABELLE 7.4-2 MITTELWERTE DER GEMESSENEN AUßENLUFTTEMPERATUR BEZOGEN AUF DEN SOMMERLICHEN MESSZEITRAUM UND IM VERGLEICH ZU DEN AUßENTEMPERATURDATEN DER ENEV2014

Quelle		20.4.-31.8. 2012	1.4.-31.8. 2013	1.4.-31.8. 2014	1.4.-31.8. 2015
Eigene Messung (Hinterlüftungsebene)	(1)	18,9	17,7	17,4	17,8
EnEV2014	(2)	12,9°C			
Differenz	(1) – (2)	6,0	4,8	4,5	4,9

Die gemittelten Außenlufttemperaturen von April bis August sind zwischen 2012 und 2015 nahezu gleich, siehe TABELLE 7.4-2. Sie liegen um 4,5 Kelvin bis 6 Kelvin höher als im Vergleichszeitraum des Referenzjahres der EnEV. Die Gebäudetechnik ist derart anzupassen, dass die fehlende Nachtlüftung bei Nutzung als Ausstellung kompensiert wird.

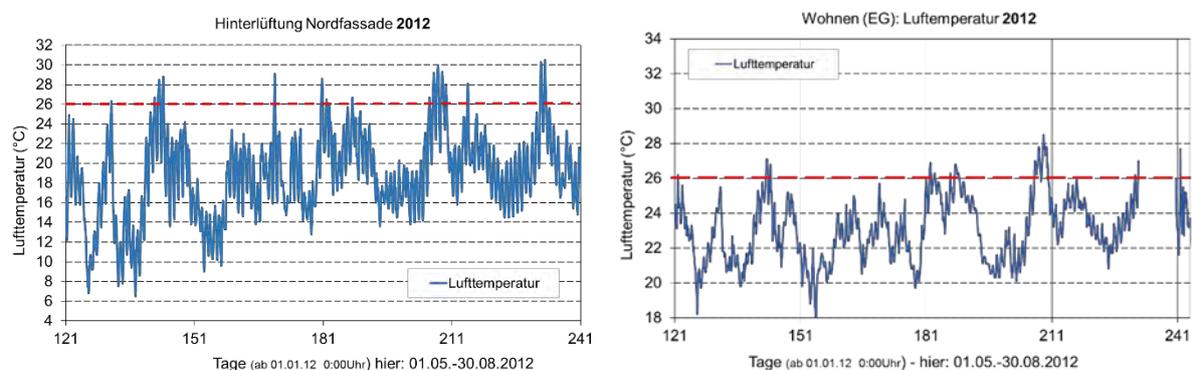


BILD 7-9 GEMESSENE RAUMLÜFTTEMPERATUREN IM WOHNRAUM UND ZUGEORDNETE AUßENLUFTTEMPERATUREN IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-WAND VOM 1. MAI BIS 30. AUGUST 2012

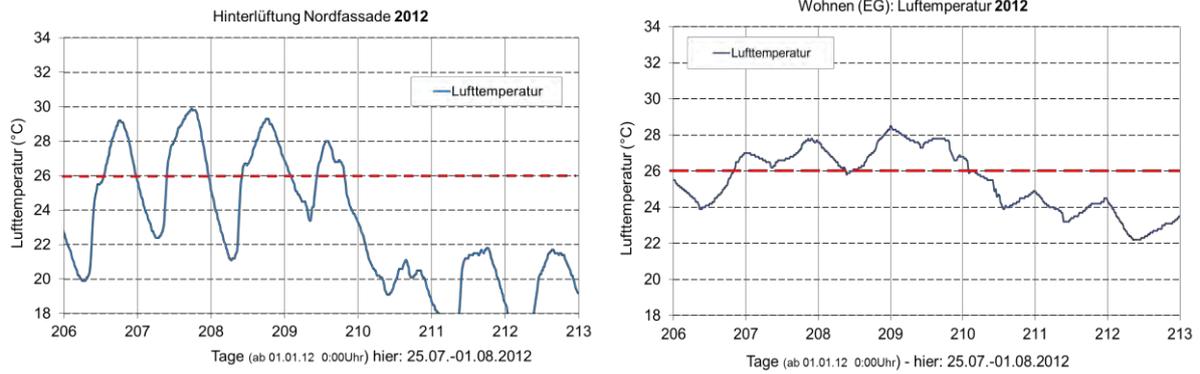


BILD 7-10 GEMESSENE RAUMLUFTTEMPERATUREN IM WOHNRAUM UND ZUGEORDNETE AUßENLUFTTEMPERATUREN IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-WAND VOM 25. JULI BIS 01. AUGUST 2012

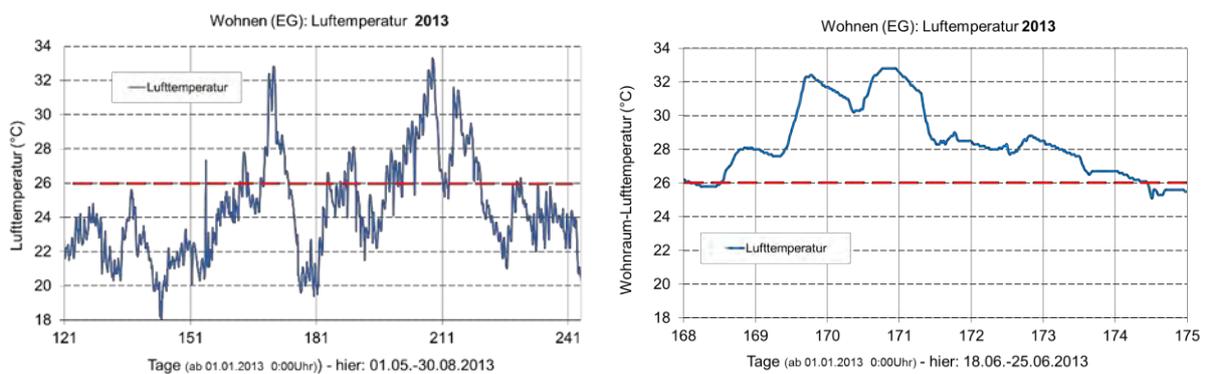


BILD 7-11 GEMESSENE RAUMLUFTTEMPERATUREN IM WOHNRAUM IN 2013: VOM 01. 05.-31.08.13 UND VOM 18.06.-25.06.13

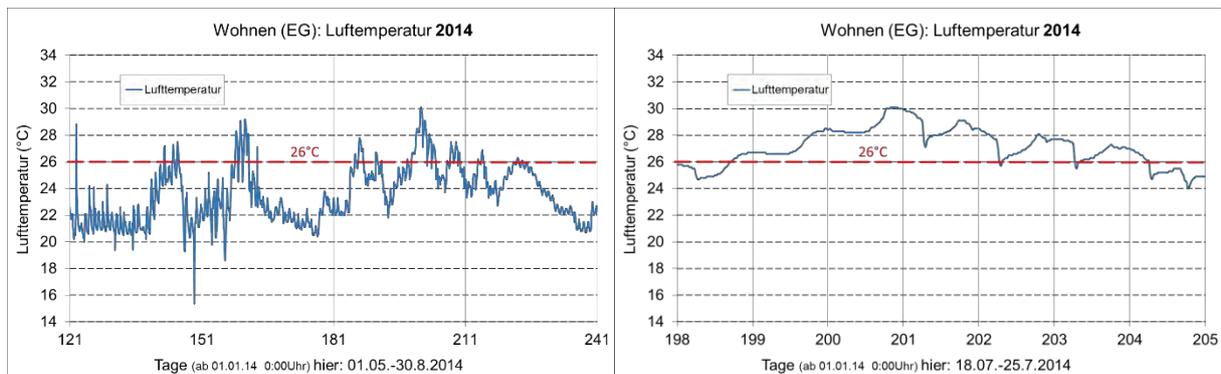


BILD 7-12 GEMESSENE RAUMLUFTTEMPERATUREN IM WOHNRAUM IN 2014: VOM 01. 05.-30.08.14 UND VOM 18.07.-25.07.14

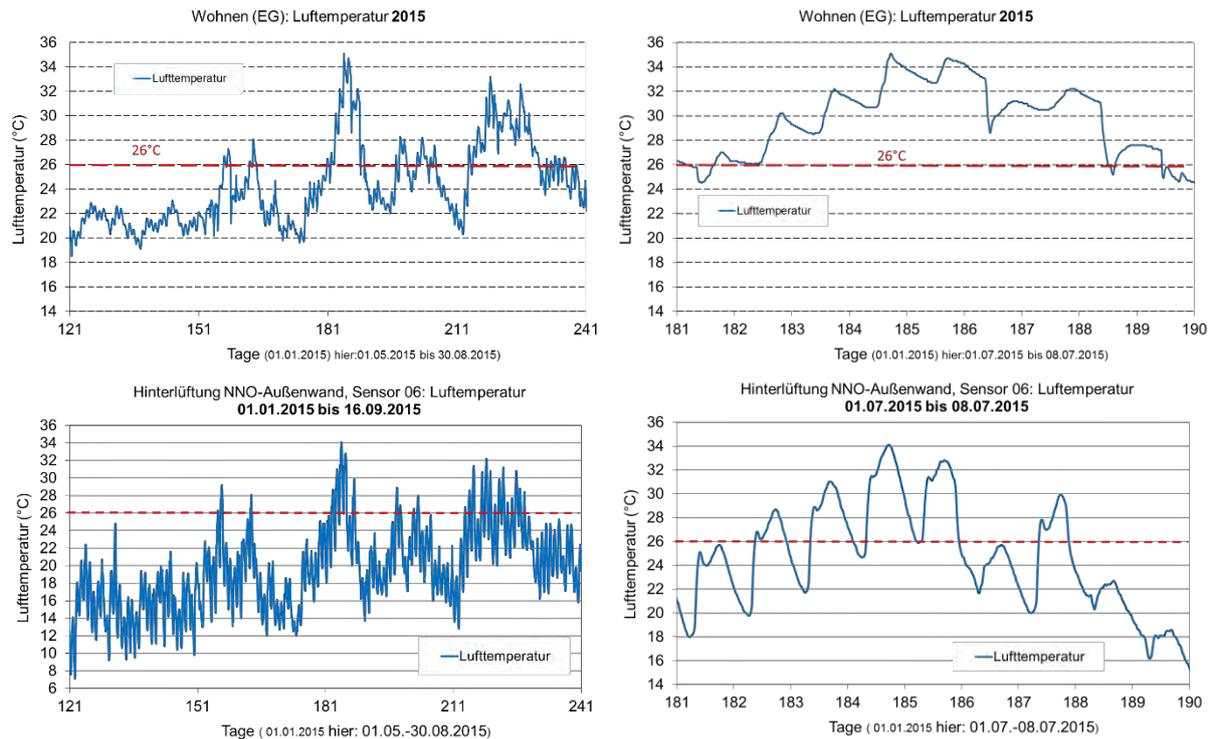


BILD 7-13 GEMESSENE RAUMLUFTTEMPERATUREN IM WOHNRAUM SOWIE GEMESSENE AUßENLUFTTEMPERATUREN IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND FÜR 2015: VOM 01. 05.-31.08. UND VOM 01.07.-08.07.2015

Die Messergebnisse zeigen, dass das Innenklima in der warmen Jahreszeit im Temperatur- und Zeitverlauf nahezu dem Außenklima entspricht, wenn ausreichend nachts gelüftet werden kann. Eine ausreichend dimensionierte Nachtlüftung kann das Ausmaß der Überhitzung maßgeblich senken. Mehrtägige Heißwetterperioden führten 2013 und 2015 im weitgehend verschatteten Erdgeschoss zu Innenraumtemperaturen von bis zu 35°C. Auch nachts lag die Innenraumtemperatur noch andauernd über 26°C. In diesem Zeitraum muss der Bewohner einen signifikanten Leistungsabfall von 2-5% pro Kelvin über 26°C und damit von bis zu 45% hinnehmen, siehe Abschnitt 4.3.

Diese Überhitzung von hochgedämmten Leichtbauweisen in Passivhausstandard wird derzeit in der Fachwelt untersucht, z.B. im IEA EBC Annex 62 „Ventilative Cooling“. Nach [20] sind erhöhte Raumtemperaturen das am meisten berichtete Problem in Bewohnerstudien, vor allem von Wohngebäuden. Daraus wurde die Forderung zur Entwicklung von energieeffizienten Lösungen für die Gebäudekühlung abgeleitet, die zugleich für den Bewohner leicht anwendbar sein sollen.

7.4.2 Weitere Messergebnisse zur Behaglichkeit des Wohnraumes im Erdgeschoss und zur Feuchtelast im Innenraum

Die Messergebnisse aus 2013 für den Wohnraum im Erdgeschoss nach TABELLE 7.4-3 zeigen, dass zu Jahresbeginn bis zum Frühjahr die relativen Raumluftheuchten sehr niedrig sind und im Februar im Monatsmittelwert bei 28,6% liegt. Eine Bewohnerin äußerte, in diesem Zeitraum einige der damit in Verbindung stehenden Beschwerden (Haut, Atemwege, Allergien, Augen) zu haben, siehe auch Abschnitt 4.3. Hohe Raumluftheuchten von >65% wurden nur vereinzelt im Juni und im September 2013 gemessen. Die nach SIA180:2014 tolerierbare 10%-ige Unter- bzw. Überschreitung des empfohlenen Bereiches von 30% bis 65% Raumluftheuchte wird mit 12,3% leicht überschritten.

Betrachtet man zudem die Stunden mit Raumlufttemperaturen von über 26°C, dann lagen im Jahr 2013 zu ca. 80% im Jahr behagliche Raumluftbedingungen in Bezug auf Temperatur und relative Luftfeuchte vor.

TABELLE 7.4-3 BEWERTUNG DER MESSWERTE AUS 2013 ZUR RELATIVEN LUFTFEUCHTE UND ZUR RAUMLUFTTEMPERATUR IM WOHNRAUM / ERDGESCHOSS IN BEZUG AUF KRITERIEN ZUR BEHAGLICHKEIT

2013		Mittelwert		Maximalwert	Stunden mit			
		relative Luftfeuchte (%)	Raumlufttemperatur Wohnen		>26°C (°C)	relativen Raumluftfeuchten von		
			(°C)	(°C)		<30% (%)	30...65% (%)	>65% (%)
V1	Jan 13	34,6	21,0	22,8	0	285,0	459,0	0
V1	Feb 13	33,0	21,1	22,3	0	138	534	0
V1	Mrz 13	28,6	21,9	24,5	0	452	292	0
V1	Apr 13	36,3	22,4	27,8	6	96	624	0
V1	Mai 13	49,3	22,2	25,6	0	0,5	743,5	0
Ö	Jun 13	47,5	24,4	32,8	176	0	712	8
Ö	Jul 13	47,1	26,3	33,3	367	0	744	0
Ö	Aug 13	48,1	25,1	31,6	194	0	744	0
Ö	Sep 13	52,8	21,4	24,9	0	0	676,5	43,5
Ö	Okt 13	45,7	21,9	24,5	0	36,5	707,5	0
Ö	Nov 13	39,7	20,7	24,3	0	15	705	0
Ö	Dez 13	36,1	21,1	23,2	0	0	744	0
Summe:		8760 Jahresstunden, davon		Stunden:	741	1023	7685,5	51,5
Ö - Öffentliche Ausstellung				Tage:	30,9	42,6	320,2	2,15
V1 - Vermietung an Familie 1				entspricht:	8,46%	11,7%	87,7%	0,6%

Das Raumklima von 2013 weist eine geringe Feuchtelast auf, nahezu analog zu den Bedingungen nach [27].

TABELLE 7.4-4 BEWERTUNG DER MESSWERTE AUS 2014 ZUR RELATIVEN LUFTFEUCHTE UND ZUR RAUMLUFTTEMPERATUR IM WOHNRAUM / ERDGESCHOSS IN BEZUG AUF KRITERIEN ZUR BEHAGLICHKEIT

2014		Mittelwert		Maximalwert	Stunden mit			
		relative Luftfeuchte (%)	Raumlufttemperatur Wohnen		>26°C (°C)	relativen Raumluftfeuchten von		
			(°C)	(°C)		<30% (%)	30...65% (%)	>65% (%)
Ö	Jan 14	36,9	21,1	24,6	0	141	603	0
Ö	Feb 14	34,9	21,1	22,8	0	9	663	0
Ö	Mrz 14	37,9	20,9	24,1	0	28,5	715,5	0
Ö	Apr 14	42,5	21,3	30,8	3	30,5	683	6,5
V2	Mai 14	42,6	22,2	28,8	27	2,5	741,5	0
V2	Jun 14	50,5	22,9	29,2	65	0	716,5	3,5
V2	Jul 14	57,2	25,2	30,1	231	0	651,5	92,5
V2	Aug 14	58,5	23,7	26,9	32,5	0	708	36
V2	Sep 14	61,7	22,1	26	0	0	526	194
V2	Okt 14	66,0	19,1	22	0	0	166	578
V2	Nov 14	52,6	19,6	22,4	0	1,5	708	10,5
V2	Dez 14	42,9	18,9	21,7	0	1,5	742,5	0
Summe:		8760 Jahresstunden, davon		Stunden:	358,5	214,5	7624,5	921
Ö - Öffentliche Ausstellung				Tage:	14,9	8,9	317,7	38,4
V2 - Vermietung an Familie 2				entspricht:	4,09%	2,45%	87,04%	10,51%

In der ersten Jahreshälfte von 2014 ist die Feuchtelast im Mittel gering. Dies ändert sich mit der Nutzung in der zweiten Jahreshälfte. Insbesondere im Oktober ist die Feuchtelast hoch. Die Feuchtelast der zweiten Jahreshälfte ist bezogen auf den Mittelwert als normal einzustufen.

Für die Jahre 2012 und 2015 liegen keine vollständigen Messdaten vor. Für 2012 ist die Feuchtelast gering und für 2015 als gering bis normal einzustufen.

TABELLE 7.4-5 BEWERTUNG DER MESSWERTE AUS 2015 ZUR RELATIVEN LUFTFEUCHTE UND ZUR RAUMLUFTTEMPERATUR IM WOHNRAUM / ERDGESCHOSS IN BEZUG AUF KRITERIEN ZUR BEHAGLICHKEIT

2015		Mittelwert		Maximalwert	Stunden mit			
		relative Luftfeuchte (%)	Raumlufttemperatur Wohnen		relativen Raumluftheuchten von			
			(°C)	(°C)	>26°C (°C)	<30% (%)	30...65% (%)	>65% (%)
V2	Jan 15	40,3	19,9	21,4	0	0	744	0
V2	Feb 15	37,5	19,5	21,6	0	9	663	0
V2	Mrz 15	39,1	20,4	23,4	0	22,5	721,5	0
V2	Apr 15	41,5	20,4	25,9	0	3	717	0
Ö	Mai 15	46,6	21,2	23,1	0	0	744	0
Ö	Jun 15	48,0	23,0	28,1	70	0,5	704	15,5
Ö	Jul 15	46,4	25,9	35,1	316	0	735	9
Ö	Aug 15	46,2	27,0	33,2	459,5	8,5	735,5	0
Ö	1.-11.9.15	48,5	22,9	29,2	37,5	0	264	0
Summe:		6096 Jahresstunden, davon		Stunden:	883	43,5	6028	24,5
Ö - Öffentliche Ausstellung				Tage:	36,8	1,8	251,2	1,0
V2 - Vermietung an Familie 2				entspricht:	14,5%	0,7%	98,9%	0,4%

TABELLE 7.4-6 BEWERTUNG DER MESSWERTE AUS 2012 ZUR RELATIVEN LUFTFEUCHTE UND ZUR RAUMLUFTTEMPERATUR IM WOHNRAUM / ERDGESCHOSS IN BEZUG AUF KRITERIEN ZUR BEHAGLICHKEIT

2012		Mittelwert		Maximalwert	Stunden mit			
		relative Luftfeuchte (%)	Raumlufttemperatur Wohnen		relativen Raumluftheuchten von			
			(°C)	(°C)	>26°C (°C)	<30% (%)	30...65% (%)	>65% (%)
Ö	10.-30.04.1	39,6	22,4	26,9	10	11	235	0
V1	Mai 12	42,4	22,7	27,1	19	19	725	0
V1	Jun 12	50,3	22,2	26,9	6	0	678,5	41,5
V1	Jul 12	56,5	23,7	28,5	128	0	652	92,0
V1	01.-19.8.12	55,2	23,7	27,7	10	0,25	492,25	36,5
V1	Sep 12	52,7	22,0	25,2	0	0	706,5	13,5
V1	Okt 12	51,1	20,1	22,4	0	0	743,75	0,25
V1	Nov 12	42,6	20,7	22,1	0	0	720	0
V1	Dez 12	36,1	21,1	23,2	0	72,75	671,25	0
Summe:		5911 Jahresstunden, davon		Stunden:	173	103	5624	184
Ö - Öffentliche Ausstellung				Tage:	7,2	4,3	234,3	7,7
V1 - Vermietung an Familie 1				entspricht:	2,93%	1,74%	95,15%	3,11%

Über den gesamten Messzeitraum ist bis auf eine Periode von 3 Monaten im Herbst 2014 die Feuchtelast als niedrig einzustufen. Einen Trend zu niedrigen relativen Luftfeuchten im Winter weisen auch Untersuchungen vom IBP aus 2009 [21] aus, mit der Schlussfolgerung, dass dies Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Gebäudehülle hat.

Der Verlauf der relativen Luftfeuchte im Innenraum ist für März 2013 (niedrige Luftfeuchten) und für September 2014 (hohe Luftfeuchten) in BILD 7-14 dargestellt.

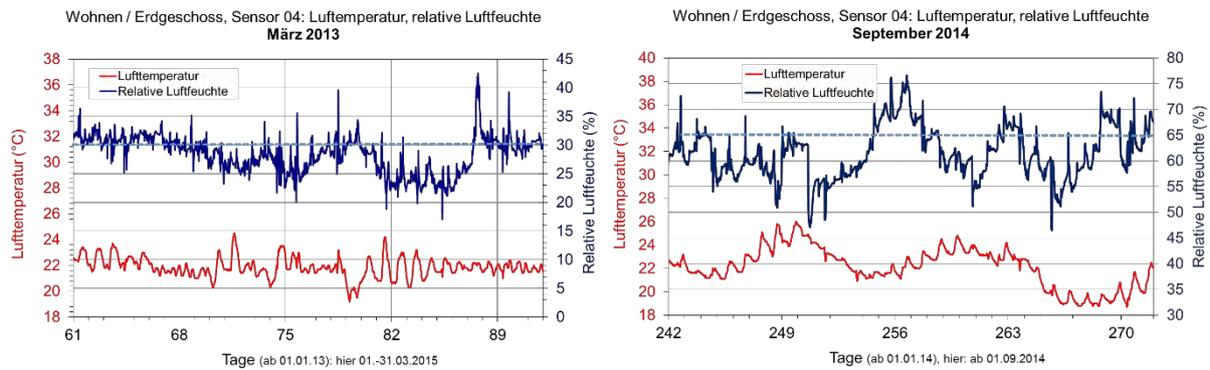


BILD 7-14 GEMESSENE INNENLUFTTEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN IM WOHNRAUM FÜR MÄRZ 2015 UND FÜR SEPTEMBER 2014

7.5 Lufttemperaturdifferenzen zwischen dem Innenraum- und dem Außenklima

Zur Beurteilung des Feuchtetransportes durch natürliche Konvektion in offenporigen Außenwand-Gefachdämmungen wurde aus den Messwerten die Temperaturdifferenz über die Dämmstoffdicke ermittelt. Die TABELLE 7.5-1 weist hierfür jährliche Mittelwerte von 5,6K bis 11,0K aus. BILD 7-15 und BILD 7-16 zeigen die Lufttemperaturdifferenzen im zeitlichen Verlauf von 2012 bis 2015.

TABELLE 7.5-1 JÄHRLICHE MITTELWERTE, MAXIMALWERTE UND MINIMALWERTE DER LUFTTEMPERATURDIFFERENZ, ERMITTELT AUS DER AUßENTEMPERATUR IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND UND DER RAUMLUFTTEMPERATUR IM WOHNRAUM / ERDGESCHOSS ÜBER DEN MESSZEITRAUM VOM 21.04.2012 BIS 11.09.2015

Temperaturdifferenz ΔT (K)	2012	2013	2014	2015
$T_i - T_e$	21.04.-15.11.	24.01.-31.12.	01.01.-31.12.	01.01.-11.09.
Mittelwert (K)	5,6	11,0	9,2	9,2
Maximalwert (K)	20,1	30,2	31,5	21,4
Minimalwert	-4,5	-1,8	-9,5	-3,7

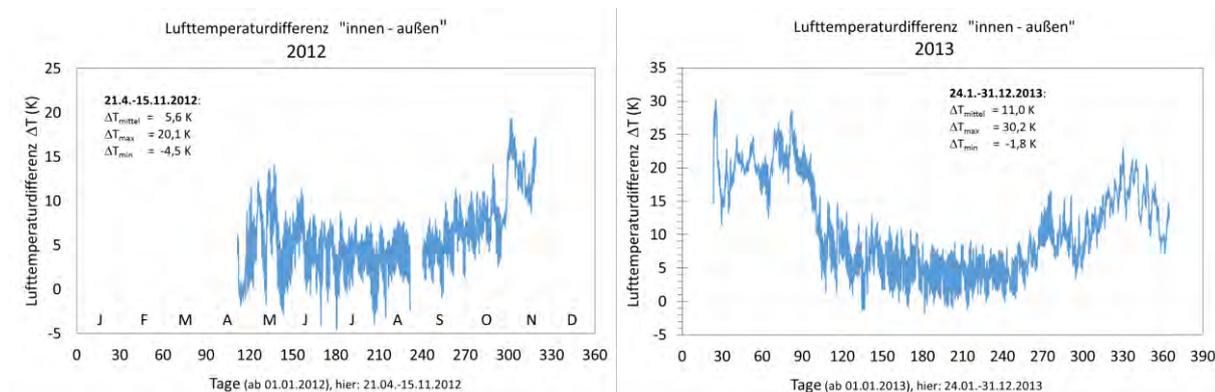


BILD 7-15 LUFTTEMPERATURDIFFERENZEN AUS DEN GEMESSENEN TEMPERATUREN VOM INNENRAUM (Tr4) UND DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND FÜR 2012 UND 2013

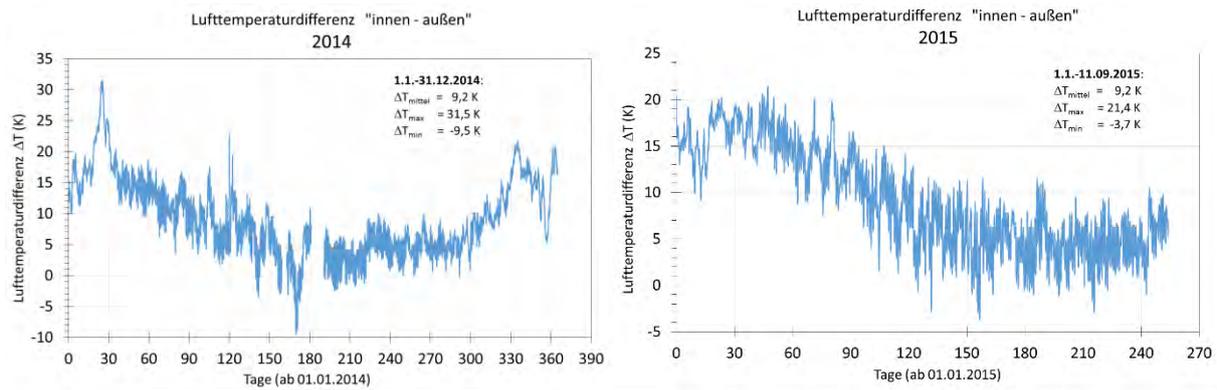


BILD 7-16 LUFTTEMPERATURDIFFERENZEN AUS DEN GEMESSENEN TEMPERATUREN VOM INNENRAUM (Tr4) UND DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND FÜR 2014 UND 2015

BILD 7-17 und BILD 7-18 verdeutlichen, dass über den fast vierjährigen Messzeitraum die monatlich gemittelten Temperaturdifferenzen über die Dämmstoffdicke maximal **17 K**, von November 2012 bis März 2013 im Mittel bei **15,4K** und im Jahresmittel von 2013 nur **7,9 K** betragen. Für das Feuchtereferenzjahr vom IBP Holzkirchen liegen im Vergleich dazu die monatlich gemittelte Temperaturdifferenz über die Dämmstoffdicke bei maximal **25 K**, von November bis März im Mittel bei **21,2K** und im Jahresmittel bei **13,9 K**.

Je geringer diese Temperaturdifferenz zwischen den kaltseitigen und warmseitigen Oberflächen, desto geringer ist die natürliche Konvektion in der offenporigen Gefachdämmung und desto geringer ist auch der Feuchtetransport aus natürlicher Konvektion. Vorangegangene Untersuchungen ([4], [6]) ergaben zudem, dass bei einer Zellulosedämmung

- mit der Dämmschichtdicke von 200mm und einem Klima über 8 Tage von $T_i / T_e = 25^\circ\text{C} / -15^\circ\text{C}$ sowie von 8 Tagen mit $T_i / T_e = 25^\circ\text{C} / 5^\circ\text{C}$ und $s_{de} > s_{di}$ bzw. $s_{de} \sim s_{di}$ in Doppelklimakammerversuchen ein Wärme- und Feuchtetransport aus natürlicher Konvektion durch Feuchteumverteilung und über das Temperaturfeld nachweisbar war,
- hingegen bei den kritischeren höheren Dämmschichtdicken bis 400mm, einem s_{di} / s_{de} -Verhältnis von 10 und dem Jahresklima von Holzkirchen (Feuchtereferenzjahr) kein nennenswerter Wärme- und Feuchtetransport durch natürliche Konvektion in der Außenwanddämmung nachweisbar ist.

Ausschlaggebend für diese Unterschiede waren das s_{di} / s_{de} -Verhältnis sowie vermutlich tägliche Temperaturschwankungen.

Daher ist an den im vorliegenden Projekt untersuchten Außenwänden mit

- $s_{di} / s_{de} \sim 24$ und
- $\Delta T_{\text{WDi-e, Nov.2012 -März 2013}} = \text{i.M. } 15,4 \text{ K}$

kein maßgeblicher Wärme- und Feuchtetransport aus natürlicher Konvektion in der Gefachdämmung zu erwarten.

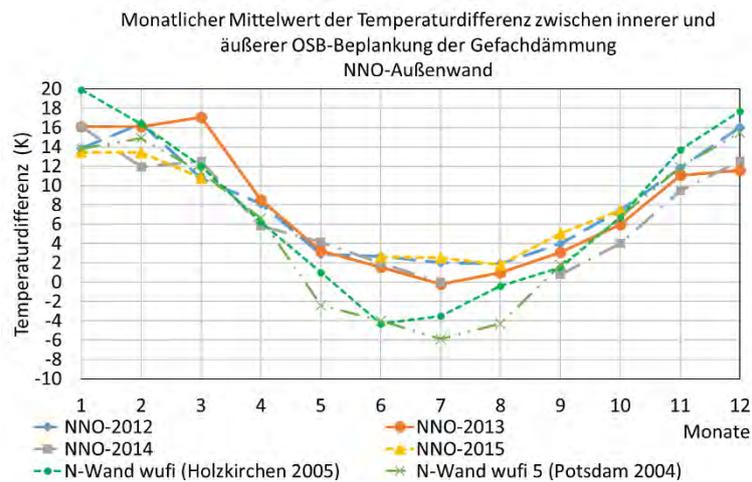


BILD 7-17 MONATLICHE MITTELWERTE DER TEMPERATURDIFFERENZEN ZWISCHEN INNEN- UND AUßENSEITIGER OSB-BEPLANKUNG DER GEFACHDÄMMUNG VON 2012 BIS 2015, FÜR DIE NNO-AUßENWAND

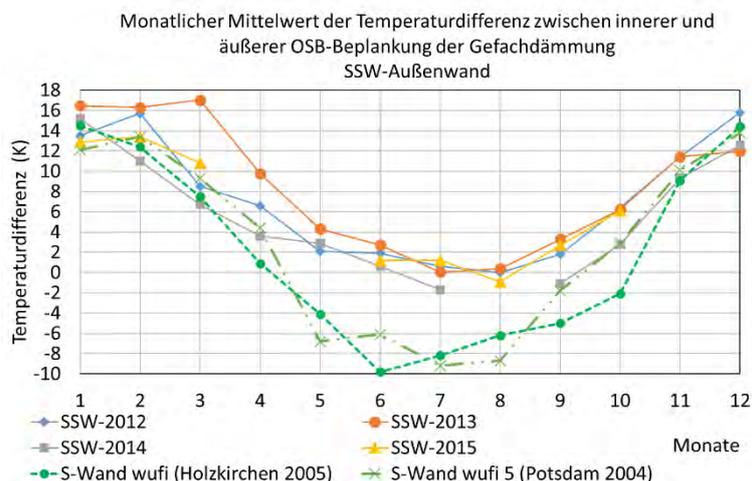


BILD 7-18 MONATLICHE MITTELWERTE DER TEMPERATURDIFFERENZEN ZWISCHEN INNEN- UND AUßENSEITIGER OSB-BEPLANKUNG DER GEFACHDÄMMUNG VON 2012 BIS 2015, FÜR DIE SSW-AUßENWAND

In Verbindung mit der deutlichen Überschreitung der zulässigen Übertemperaturgradstunden in den Jahren 2013 und 2015 nach Tabelle 7.4-1 weisen die Kurven der Diagramme zur Lufttemperaturdifferenz innen – außen in Bild 7-15 und Bild 7-16 auf die Überhitzung des Innenraumes hin.

Die Temperaturdifferenz zwischen der inneren und äußeren OSB-Gefachbeplankung der SSW-Außenwand (BILD 7-18) liegen als Jahresmittelwert für 2013 bei 8,3 Kelvin und ist damit nur **0,4 K** höher als der Vergleichswert an der NNO-Außenwand (Bild 7-17).

Eine Bewertung zu den Einflüssen der Strahlungsabsorption durch die schwarze Fassadenverkleidung und der Hinterlüftung erfordern weitere Messfühler und sind mit den vorhandenen Untersuchungen nicht möglich. Aus Bild 7-17 und Bild 7-18 wird deutlich, dass in den Sommermonaten nur sehr niedrige Temperaturdifferenzen zwischen der Außenseite und der Innenseite der Gefachdämmung gemessen wurden. Ergebnisse aus vergleichenden WUFI-Berechnungen für das Außenklima von Holzkirchen (2005) und Potsdam (2004) an nicht hinterlüfteten Fassaden führen zu deutlich größeren Temperaturunterschieden.

Aus den monatlich aus Messwerten gemittelten Temperaturdifferenzen $\Delta T_{OSB,i - OSB,e}$ der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand wurde die Differenz $\Delta T_{NNO-SSW}$ gebildet und die Werte als Diagramm in BILD 7-19 dargestellt. Als Vergleichswerte wurden Ergebnisse aus Wufi-Simulationen mit dem Außenklima von Holzkirchen (2005) sowie Potsdam (2004) diesem Diagramm zugeordnet.

Bildet man aus den Kurven der Messwerte von 2012 bis 2015 aus BILD 7-19 die Mittelwerte, so liegen diese zwischen 0,4K und 1,4K. Dies bedeutet, dass es über das Jahresmittel betrachtet kaum Unterschiede im Temperaturfeld der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand gibt.

Vergleichende Simulationen mit dem Programm wufi 5.3 für das Außenklima Potsdam (2004) und Holzkirchen (2005) führen bei gleichem Wandaufbau, jedoch ohne Berücksichtigung der Vorhangfassade mit Hinterlüftung (im Modell der Software nicht abbildbar) zu größeren Temperaturdifferenzen zwischen der SW-Außenwand und der N-Außenwand. Die jährlich gemittelten Temperaturdifferenzen bei Außenwänden dieser Himmelsausrichtung betragen 3,6K bis 5,3K.

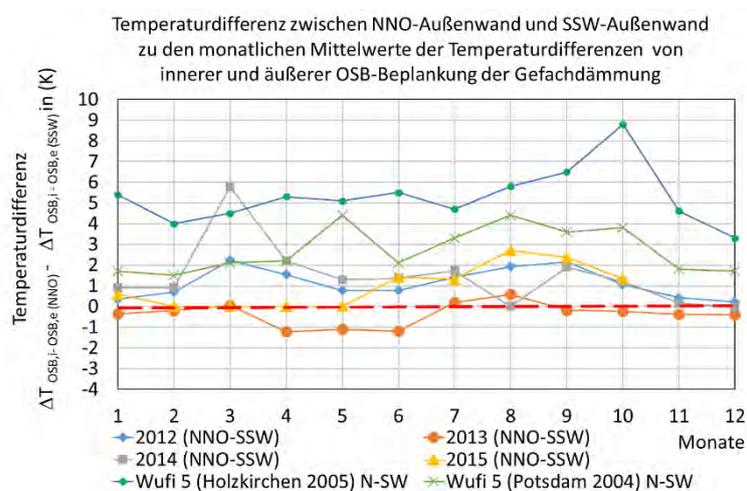


BILD 7-19 TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN NNO-AUßENWAND UND SSW-AUßENWAND ZU DEN MONATLICHEN MITTELWERTEN DER TEMPERATURDIFFERENZEN VON ÄUßEREN UND INNERER OSB-BEPLANKUNG DER GEFACHDÄMMUNG $\Delta T_{OSB,i - OSB,e} (NNO) - \Delta T_{OSB,i - OSB,e} (SSW)$

7.6 Der Einfluss der opaken Bauteile auf die sommerliche Überhitzung des Innenraumklimas

Es ist zu untersuchen, ob ein Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach dem vereinfachten Verfahren der DIN 4108-2 ausreichend ist für derartige

- hochdämmende Gebäude in Leichtbauweise
- mit einem hohen Anteil an jeweils vollverglasten Ost- und West-Fassaden,
- mit einer nahezu vollflächigen Nutzung der Dachfläche und der SSW-Fassade für Photovoltaikmodule im geringen Abstand zu den hochgedämmten Dach- und Außenwandtafeln.

Eigene Simulationsrechnungen mit dem Programm WUFI®plus THERM in der Version 2.5.4.0 für den Baukörper des Effizienzhaus Plus zeigen, dass die jährlichen Energiegewinne über die opaken Bauteile NNO-Außenwand, SSW-Außenwand, Bodenplatte und Dach ca. dreißigmal höher liegen als die jährlichen Wärmeverluste. Ein Vergleich der Ergebnisse von Wärmegewinn abzüglich Wärmeverluste für opake Bauteile sowie für die Fenster zeigt, dass beide Werte nahezu gleich waren. Das unterstreicht, dass die opaken Bauteile in die Auslegung des sommerlichen Wärmeschutzes mit

einbezogen werden sollten. Die hier dargestellten Werte haben nur orientierenden Charakter, da für einzelne Eingabewerte Annahmen getroffen werden mussten.

Die Messergebnisse bestätigen, dass derartige Bilanzierungstools zur Auslegung der Bauteile und zur Auslegung der Gebäudetechnik in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz angewendet werden sollten, um ganzjährig und nutzungsabhängig ein behagliches Rauminnenklima sicherzustellen.

Das Gebäude war in zwei der vier untersuchten Sommer über die zulässigen 1200 Übergradstunden pro Jahr hinaus überhitzt, bezogen auf den Grenzwert von 26°C Raumlufttemperatur.

Trotz Hinterlüftung der schwarzen NNO- und SSW-Außenwandfassaden ist deren Aufheizung und Beitrag auf die sommerliche Überhitzung des Innenraumklimas nachweisbar.

Dazu werden die Messwerte verschiedener Sensoren nach BILD 7-20 wie folgt in Diagrammen aufbereitet. Zunächst erfolgt ein Vergleich der Schichtgrenztemperaturen „außenseitige OSB-Platte / Zellulose-Gefachdämmung“ $T_{se,WD}$ der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand mit dem Temperaturverlauf in halber Dämmschichtdicke $T_{WD-d/2}$, siehe BILD 7-21 bis BILD 7-26.

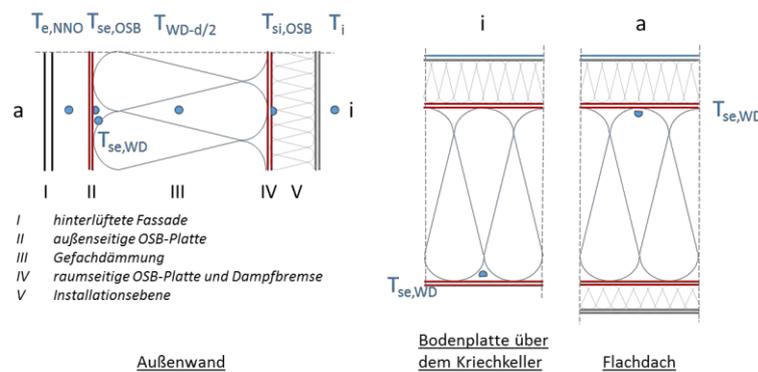


BILD 7-20 LAGE DER TEMPERATURSENSOREN FÜR DIE BEWERTUNG DES SOMMERLICHEN WÄRMESCHUTZES

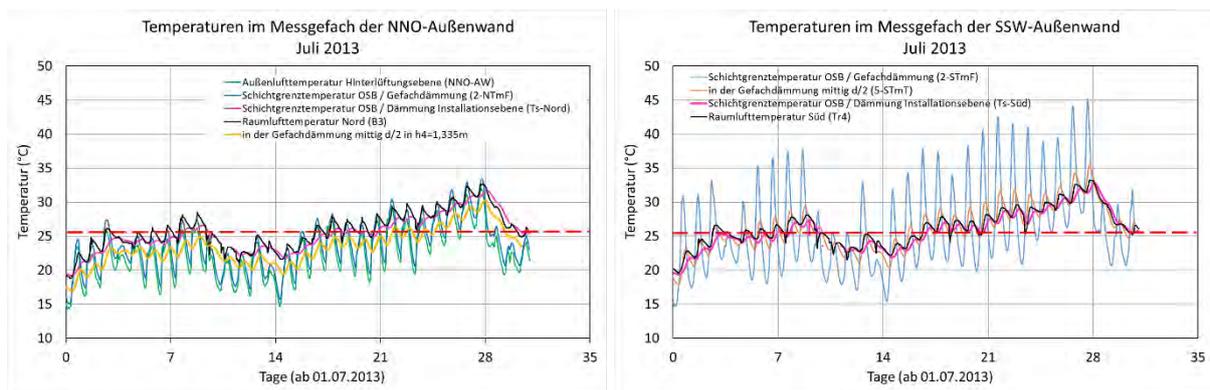


BILD 7-21 GEMESSENE TEMPERATUREN ÜBER DEN QUERSCHNITT DER NNO- UND SSW-AUßENWAND IM JULI 2013

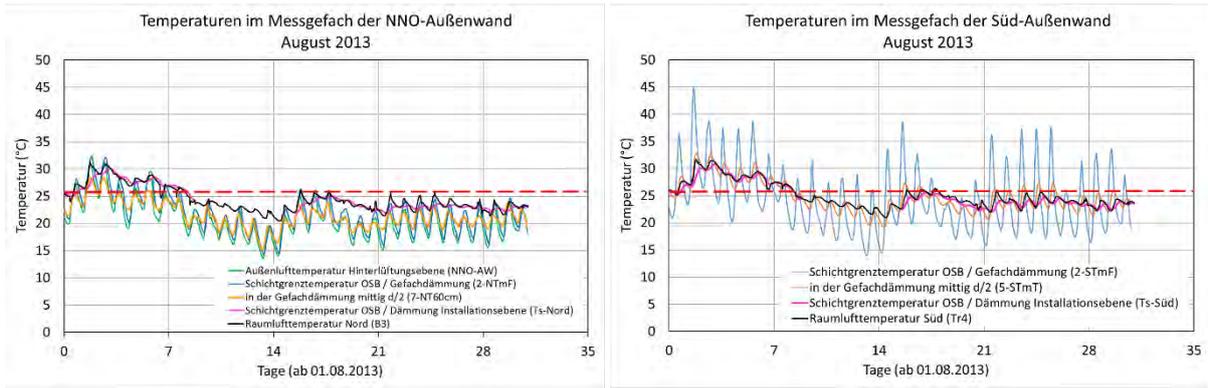


BILD 7-22 GEMESSENE TEMPERATUREN ÜBER DEN QUERSCHNITT DER NNO- UND SSW-AUßENWAND IM AUGUST 2013

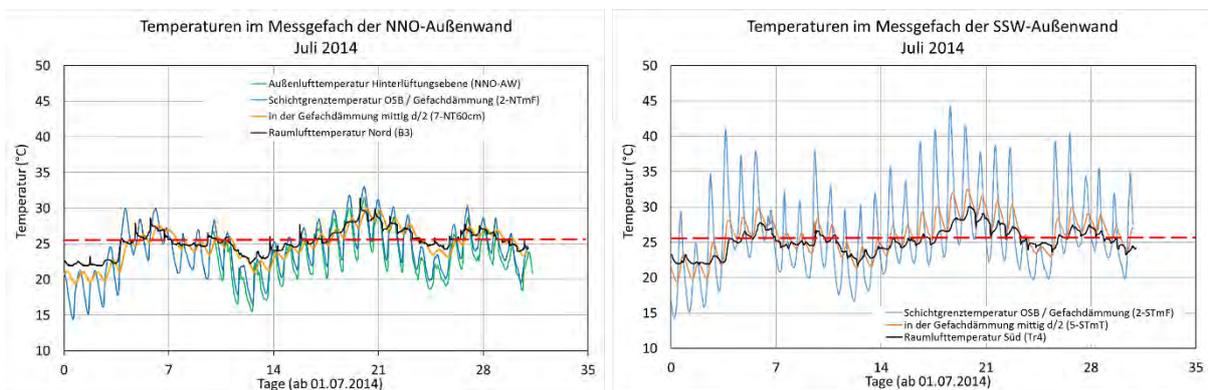


BILD 7-23 GEMESSENE TEMPERATUREN ÜBER DEN QUERSCHNITT DER NNO- UND SSW-AUßENWAND IM JULI 2014

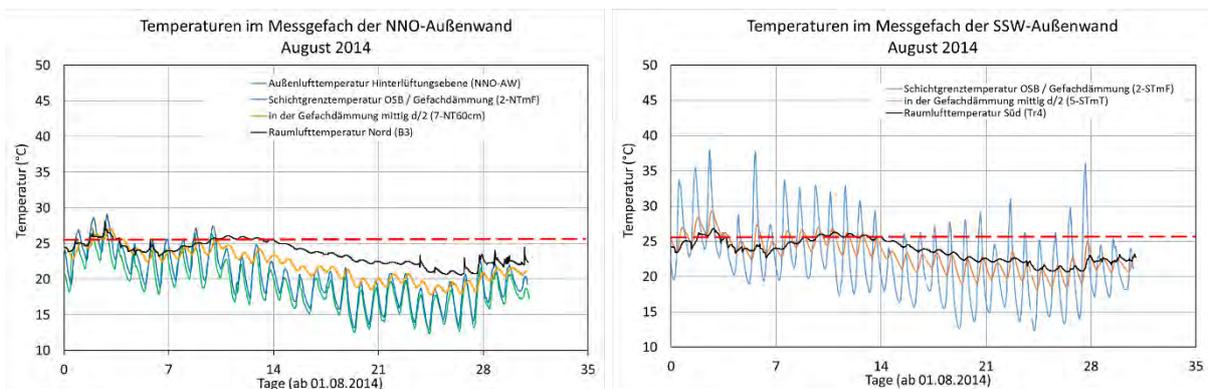


BILD 7-24 GEMESSENE TEMPERATUREN ÜBER DEN QUERSCHNITT DER NNO- UND SSW-AUßENWAND IM AUGUST 2014

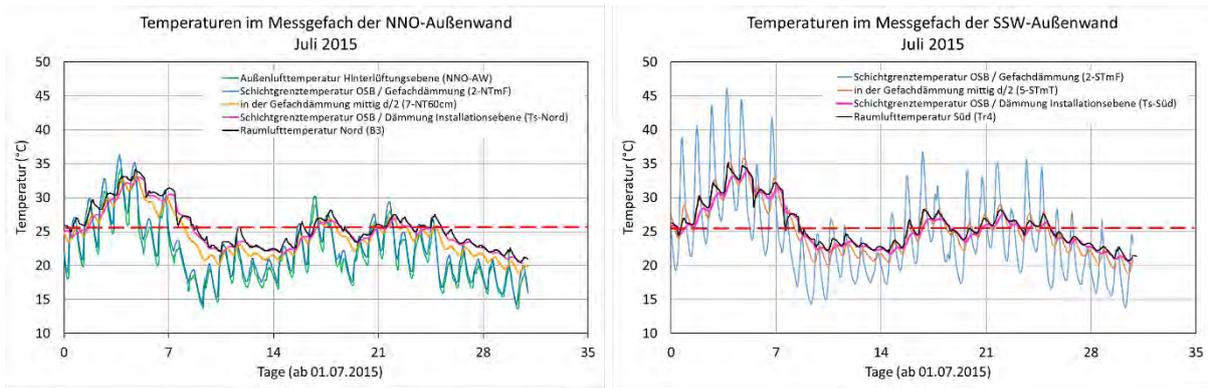


BILD 7-25 GEMESSENE TEMPERATUREN ÜBER DEN QUERSCHNITT DER NNO- UND SSW-AUßENWAND IM JULI 2015

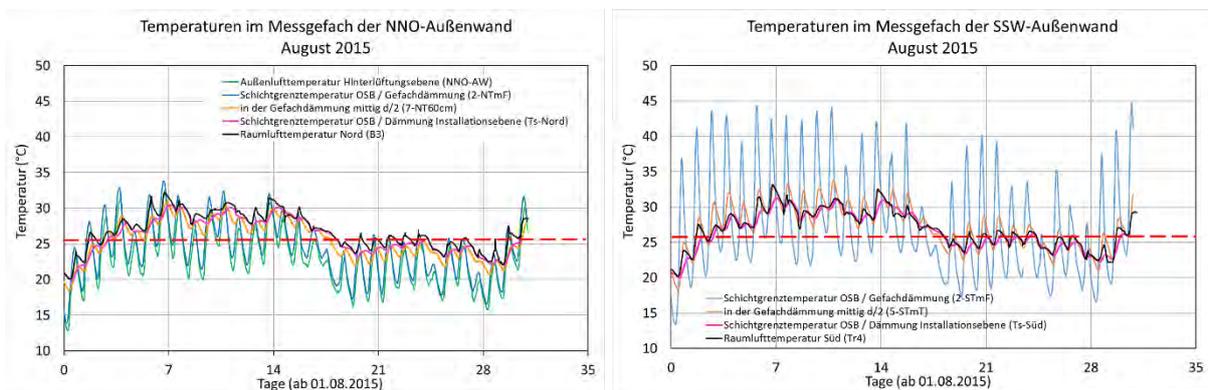


BILD 7-26 GEMESSENE TEMPERATUREN ÜBER DEN QUERSCHNITT DER NNO- UND SSW-AUßENWAND IM AUGUST 2015

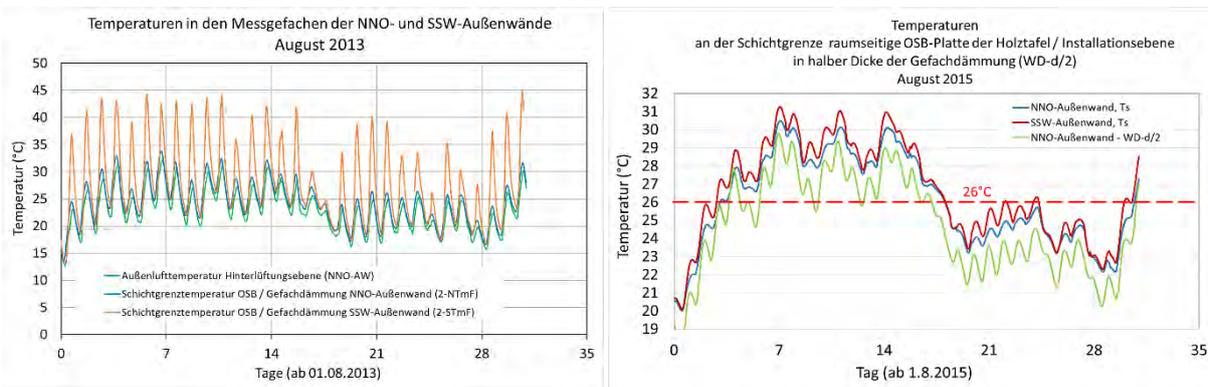


BILD 7-27 GEMESSENE TEMPERATUREN INNERHALB DER NNO-AUßENWAND UND DER SSW-AUßENWAND IM AUGUST 2013 UND 2015

Bewertung der Diagramme von BILD 7-21 bis BILD 7-27:

Die Raumtemperatur wird beeinflusst von der Aufheizung der außenliegenden OSB-Platten der SSW-Wand, weniger der NNO-Wand.

- Die täglichen Temperaturspitzen betragen bis zu 46°C ($T_{se,OSB}$) in der außenseitigen OSB-Platte der SSW-Außenwand und liegen deutlich über den Innenraumtemperaturen. Dies führt nach einer

Hitzeperiode auch an Tagen mit vergleichsweise niedrigen Außenlufttemperaturen dazu, dass sich die Raumlufttemperaturen nicht abkühlen.

- Die Temperaturspitzen der Messstellen über den Gefachquerschnitt folgen den Temperaturspitzen der außenseitigen OSB-Platte.
- Die Temperaturspitzen in halber Dicke der Gefachdämmung ($T_{WD-d/2}$) liegen teilweise über den Innenraum-Lufttemperaturen.
- Die Temperaturspitzen der außenliegenden OSB-Platten der NNO-Außenwand liegen bis zu 12 Kelvin unter den Temperaturspitzen der OSB-Platte der SSW-Außenwand des gleichen Tages.
- Die täglichen Temperaturspitzen in der außenseitigen OSB-Platte der NNO-Außenwand liegen im Bereich der Innenraumtemperaturen, selten darüber.
- Lagen die täglichen maximalen Außenlufttemperaturen in der Hinterlüftung der NNO-Außenwand höher als 25°C, dann führte dies zu ganztägigen Innenraumtemperaturen von >26°C.
- Die täglichen Temperaturdifferenzen in der außenseitigen OSB-Platte der SSW-Außenwand betragen bis zu 25 Kelvin.

Die Messfühler im Flachdach im Bereich der PV-Elemente lagen über einem raumhohen Einbauschrank. Ein signifikanter Einfluss einer behinderten Wärmeableitung in den Innenraum hinein wird aufgrund der 400mm dicken Gefachdämmung und dem 112,5mm dicken Installationsraum mit 50mm Hanfdämmung ausgeschlossen. Da sich über den Messfühlern die außenseitige OSB-Platte und ca. 90mm Gefälledämmung befinden, liegen nahe der Dachabdichtung höhere als die gemessenen Temperaturdifferenzen vor.

Ein Vergleich der Temperaturen in den Holztafel-Außenbauteilen der NNO-Außenwand, SSW-Außenwand, der Bodenplatte über dem Kriechkeller und dem Dach, jeweils in der Dämmung mit 5mm Abstand zur außenseitigen Gefachbeplankung $T_{se,WD}$ und mit Bezug zur Außenlufttemperatur $T_{e,NNO}$ sowie zur Innenraumtemperatur T_i für die Monate Juli und August der Jahre 2012, 2013 und 2015, siehe BILD 7-28 bis BILD 7-30, zeigt den Einfluss des Flachdaches auf die sommerliche Überhitzung der Innenräume.

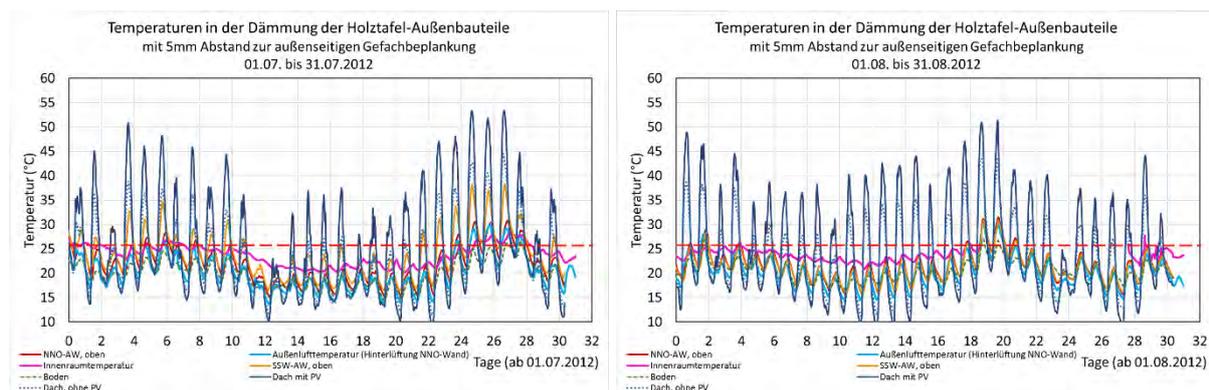


BILD 7-28 GEMESSENE TEMPERATUREN NAHE DEN SCHICHTGRENZEN DER AUßENSEITIGEN OSB-PLATTEN DER NNO- UND SSW-AUßENWAND, DER BODENPLATTE (ÜBER DEM KRIECHKELLER: ZEMENTGEBUNDENE SPANPLATTE) UND IM DACH IM JULI 2015

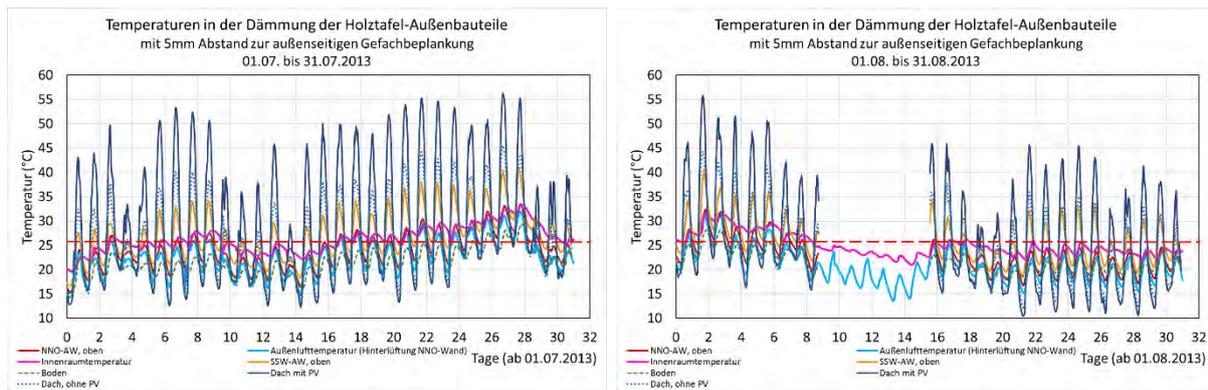


BILD 7-29 GEMESSENE TEMPERATUREN NAHE DEN SCHICHTGRENZEN DER AUßENSEITIGEN OSB-PLATTEN DER NNO- UND SSW-AUßENWAND, DER BODENPLATTE (ÜBER DEM KRIECKELLER: ZEMENTGEBUNDENE SPANPLATTE) UND IM DACH IM JULI 2015

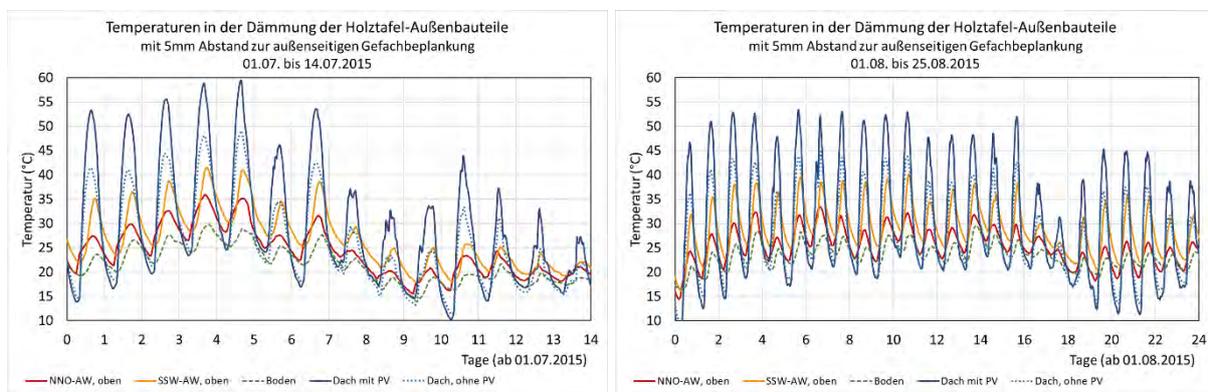


BILD 7-30 GEMESSENE TEMPERATUREN NAHE DEN SCHICHTGRENZEN DER AUßENSEITIGEN OSB-PLATTEN DER NNO- UND SSW-AUßENWAND, DER BODENPLATTE (ÜBER DEM KRIECKELLER: ZEMENTGEBUNDENE SPANPLATTE) UND IM DACH IM JULI 2015

Bewertung der Diagramme von BILD 7-28 bis BILD 7-30:

Die Raumtemperatur wird von der Aufheizung der außenliegenden OSB-Platten der SSW-Wand und von der Aufheizung des Flachdaches, insbesondere im Bereich der PV-Elemente, beeinflusst.

- Die täglichen Temperaturspitzen in der Flachdach-Gefachdämmung (Lage des Messfühlers siehe BILD 7-20) im Bereich der PV-Elemente und unter der darüber liegenden Gefälledämmung betragen bis zu 60°C.
- Die Temperaturen im Bereich der PV-Elemente des Flachdaches lagen um bis zu 20 Kelvin höher als die Temperaturen in der SSW-Außenwand an vergleichbarer Stelle über dem Gefachquerschnitt (in der Gefachdämmung mit 5mm Abstand zur außenliegenden OSB-Platte).
- Die täglichen Temperaturdifferenzen betragen an dieser Stelle im Flachdach bis zu 40 Kelvin.
- Die Temperaturen im Bereich der PV-Elemente des Flachdaches lagen um bis zu 12 Kelvin höher als die Temperaturen Flachdach außerhalb der PV-Elemente an vergleichbarer Stelle über dem Gefachquerschnitt (in der Gefachdämmung mit 5mm Abstand zur außenliegenden OSB-Platte)

Die Diagramme in BILD 7-31 zeigen beispielhaft, dass bei Hitzeperioden die Innenraumtemperaturen im Erdgeschoss tagsüber und nachts nicht unter 26°C abkühlten.

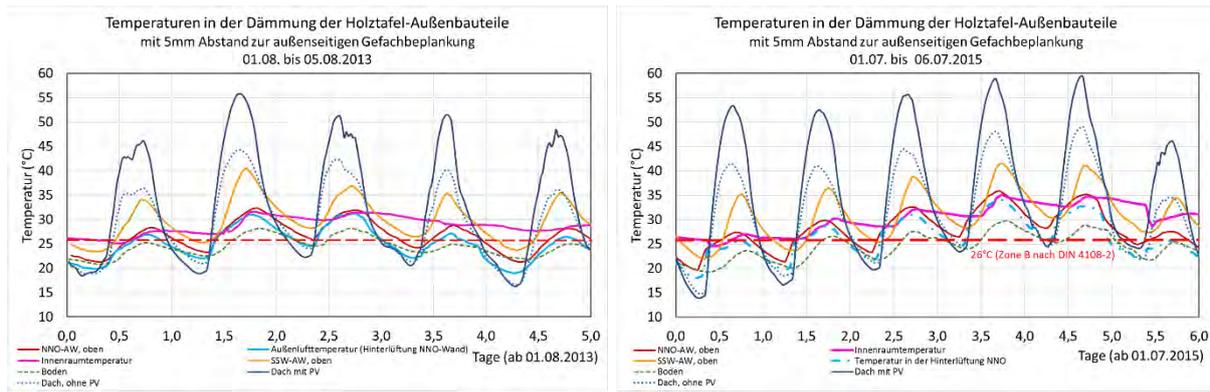


BILD 7-31 TEMPERATUREN INNERHALB DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENBAUTEILE, GEMESSEN IM ABSTAND VON 5MM ZUR AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG: 1.-5. AUGUST 2013 UND VOM 1.-7. JULI 2015

BILD 7-32 zeigt, dass die SSW-Außenwand einen größeren Anteil an der Überhitzung des Innenraums hat als die NNO-Außenwand. Die Innenseite der Holztafelwände an der SSW-Außenwand ist wärmer als an der NNO-Außenwand. Die Temperaturen der SSW-Wand in halber Gefach-Dämmstoffdicke $T_{WD-d/2}$ sind in Hitzeperioden höher als an der Schichtgrenze raumseitige OSB-Gefachbeplankung / Installationsebene $T_{si,OSB}$.

→ Hitzeperioden: $T_{si,OSB,SSW} > T_{si,OSB,NNO}$; $T_{WD-d/2,SSW} > T_{si,OSB,SSW}$; $T_{WD-d/2,NNO} < T_{si,OSB,NNO}$

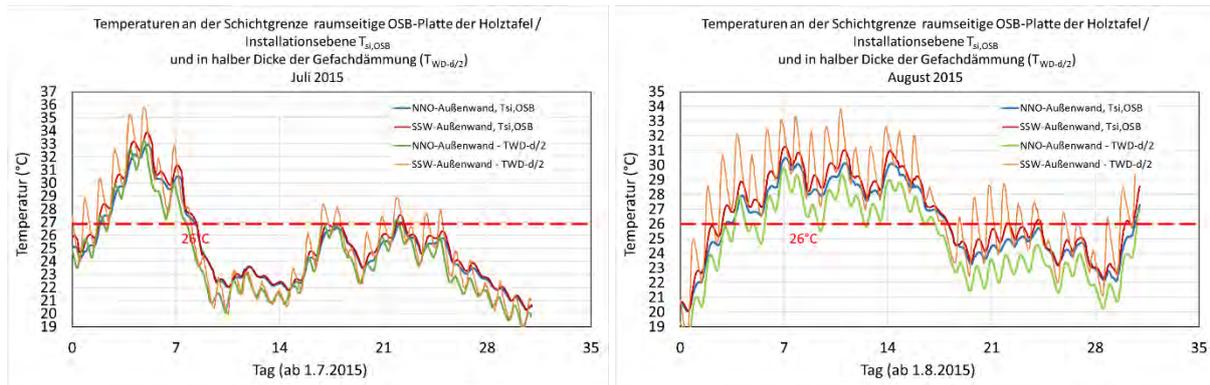


BILD 7-32 TEMPERATUREN INNERHALB DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENBAUTEILE, GEMESSEN IM ABSTAND VON 5MM ZUR AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG: JULI UND AUGUST 2015

BILD 7-33 bis BILD 7-36 zeigen anhand der über vier Sommer aufgenommenen Messwerte von 2012 bis 2015, dass für diese Bauweise und Fassadengestaltung in Berlin sowie an vergleichbaren Standorten in den Sommermonaten Juli und August mit hohen Bauteiltemperaturen und einem signifikanten Einfluss auf die Überhitzung der Innenräume gerechnet werden muss.

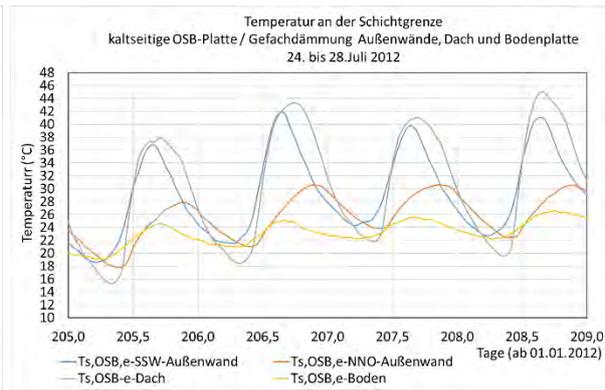
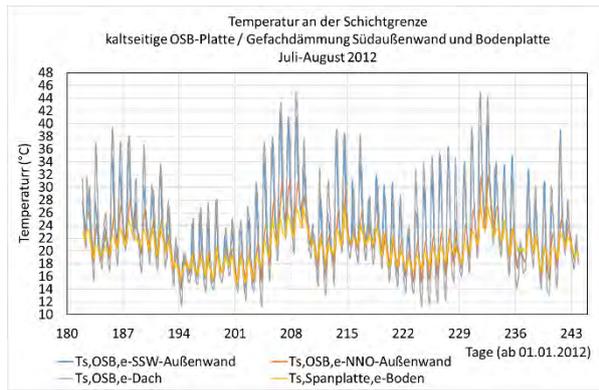


BILD 7-33 GEMESSENE TEMPERATUREN AN DER SCHICHTGRENZE DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND, SSW-AUßENWAND, IM DACH (AUßERHALB DES BEREICHES DER PV-ELEMENTE) UND IN DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECKELLER VON JULI BIS AUGUST 2012

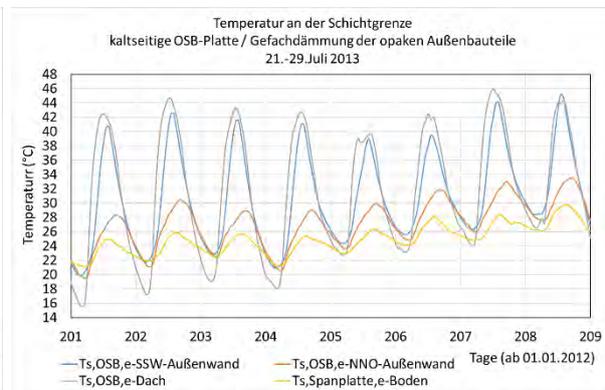
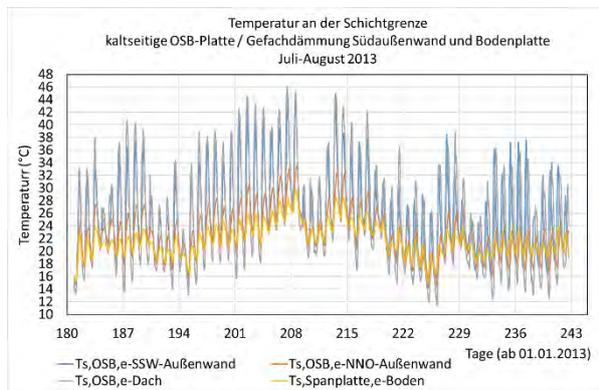


BILD 7-34 GEMESSENE TEMPERATUREN AN DER SCHICHTGRENZE DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND, SSW-AUßENWAND, IM DACH (AUßERHALB DES BEREICHES DER PV-ELEMENTE) UND IN DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECKELLER VON JULI BIS AUGUST 2013

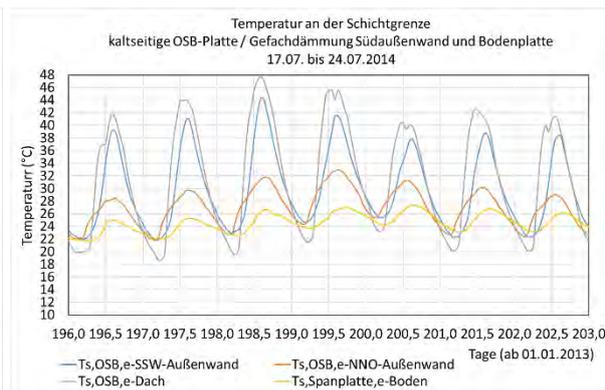
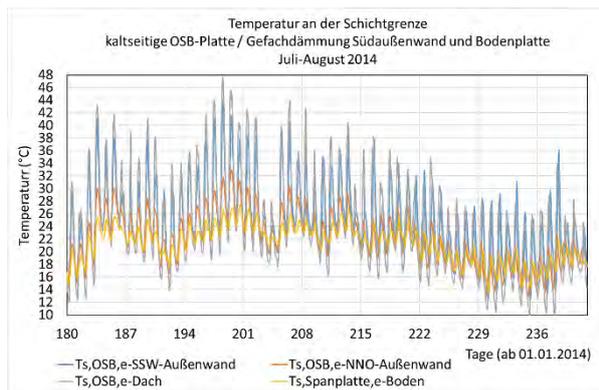


BILD 7-35 GEMESSENE TEMPERATUREN AN DER SCHICHTGRENZE DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND, SSW-AUßENWAND, IM DACH (AUßERHALB DES BEREICHES DER PV-ELEMENTE) UND IN DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECKELLER VON JULI BIS AUGUST 2014

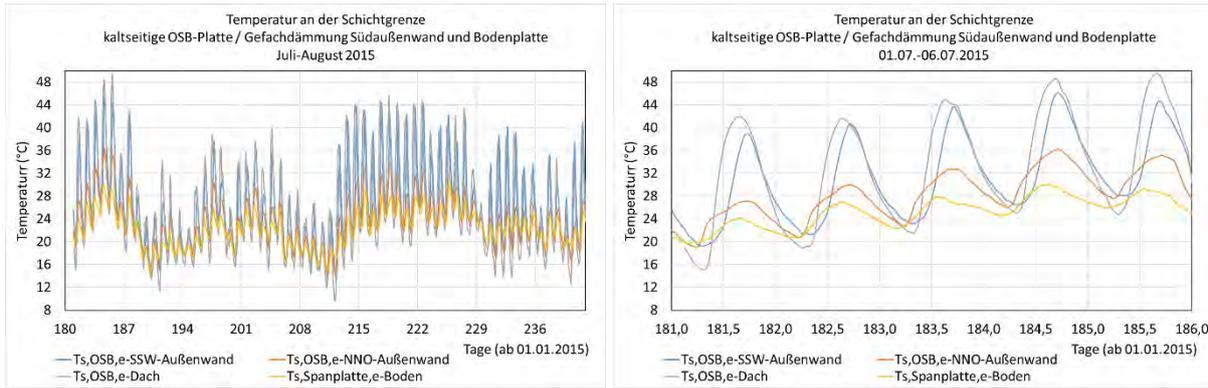


BILD 7-36 GEMESSENE TEMPERATUREN AN DER SCHICHTGRENZE DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND, SSW-AUßENWAND, IM DACH (AUßERHALB DES BEREICHES DER PV-ELEMENTE) UND IN DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECKELLER VON JULI BIS AUGUST 2015

Bild 7-37 UND BILD 7-38 geben für 2013 den Überblick, welche maximalen Temperaturen und welche monatlichen Mittelwerte in den opaken Außenbauteilen der NNO-Außenwand, SSW-Außenwand, Dach (im Bereich der PV), Dach (außerhalb der PV-Elemente) und Bodenplatte mit Bezug zur Innenraumtemperatur und Temperatur in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand auftreten.

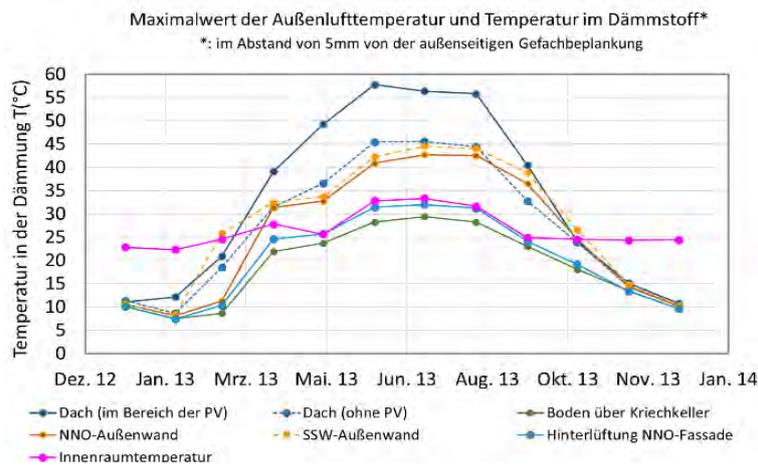


BILD 7-37 MONATLICHE MAXIMALWERTE DER GEMESSENEN TEMPERATUREN INNERHALB DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENBAUTEILE AUßENWAND, BODEN UND DACH MIT 5MM ABSTAND ZUR AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG FÜR 2013

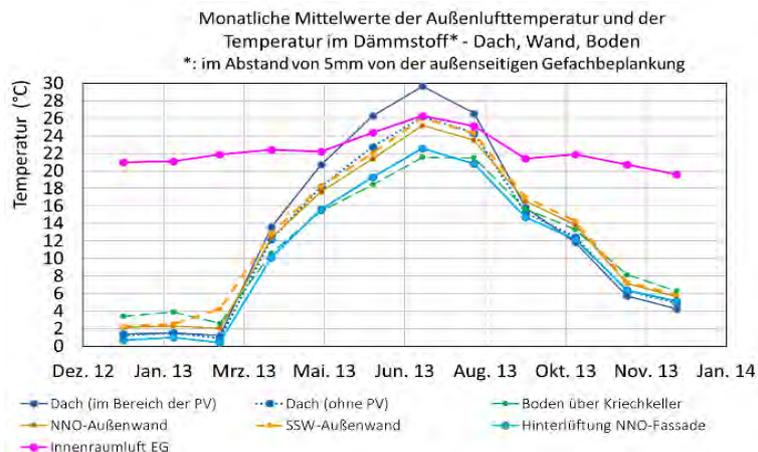


BILD 7-38 MONATLICHE MITTELWERTE DER GEMESSENEN TEMPERATUREN INNERHALB DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENBAUTEILE AUßENWAND, BODEN UND DACH MIT 5MM ABSTAND ZUR AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG FÜR 2013

Dies verdeutlicht, dass die Wärmeeinträge über das Dach im Bereich der PV-Elemente den höchsten Einfluss auf die sommerliche Überhitzung haben. Bezogen auf die Maximalwerte und die monatlichen Mittelwerte unterscheiden sich für 2013 die Wärmeeinträge in das Flachdach und in die opaken Außenwände (NNO und SSW) nur geringfügig. In der Bodenplatte über dem Kriechkeller wurden in der warmen Jahreszeit niedrigere Temperaturen als in der NNO-Hinterlüftungsebene gemessen.

7.7 Der Einfluss von vorgehängten Photovoltaik-elementen auf den Wärmeeintrag in die darunterliegenden Bauteile

Im Vergleich der Bauteile Dach, Bodenplatte und opake Außenwände wurden die höchsten Aufheizungen der außenseitigen Gefachbeplankungen im Bereich der Dach-Photovoltaik-elemente festgestellt. Die Monatsmitteltemperaturen im Dach außerhalb der PV-Elemente lagen im Juni 2013 und im Juni 2014 jeweils um 3,5 Kelvin niedriger (BILD 7-38) und die Maximalwerte um bis zu 12 Kelvin niedriger, siehe BILD 7-39 und BILD 7-40.

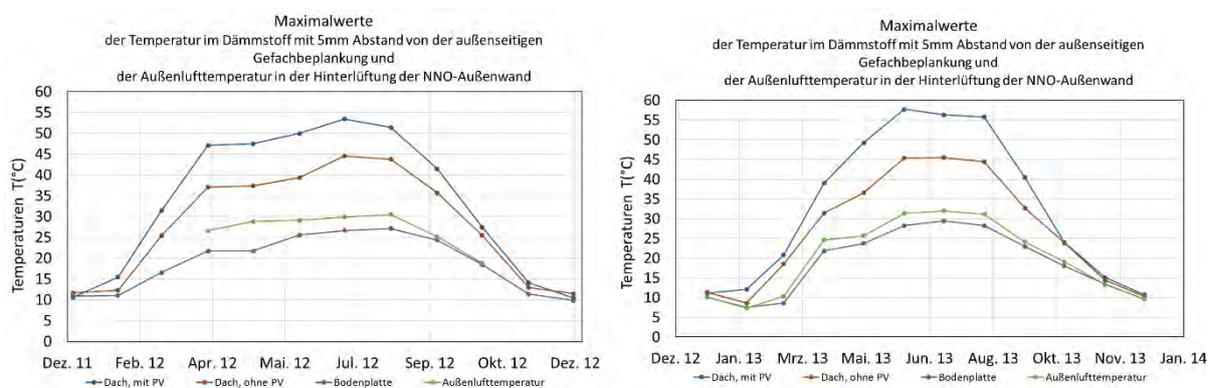


BILD 7-39 GEMESSENE MAXIMALWERTE DER TEMPERATUR IM DÄMMSTOFF IM ABSTAND VON 5MM VON DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG IM DACH, IM UND AUßERHALB DES BEREICHES DER PV-ELEMENTE, IN DER BODENPLATTE SOWIE DIE AUßENLUFTTEMPERATUR FÜR 2012 UND 2013

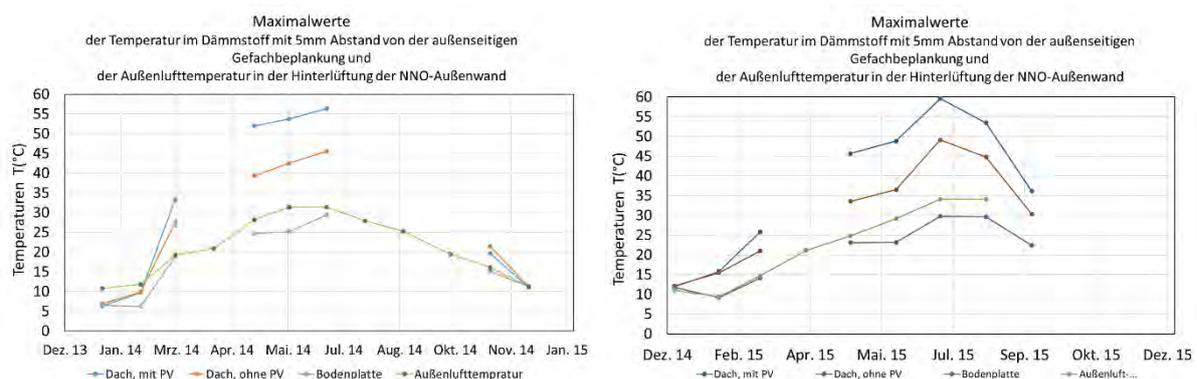


BILD 7-40 GEMESSENE MAXIMALWERTE DER TEMPERATUR IM DÄMMSTOFF IM ABSTAND VON 5MM VON DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG IM DACH, IM UND AUßERHALB DES BEREICHES DER PV-ELEMENTE, IN DER BODENPLATTE SOWIE DIE AUßENLUFTTEMPERATUR FÜR 2014 UND 2015

Da sich über den Messfühlern die außenseitige OSB-Platte und ca. 90mm Gefälledämmung befinden, liegen nahe der Dachabdichtung höhere als die gemessenen Temperaturdifferenzen vor. Maßgeblich für die hohen Temperaturen auf der Dachhaut und im darunterliegenden gedämmten Dachpaneel ist der Strahlungswärmetransport zwischen den PV-Elementen und der Dachhaut.

7.8 Der effektive U-Wert für die NNO-Außenwand und die SSW-Außenwand

Es soll in-situ untersucht werden, welcher U-Wert an den hochgedämmten Holztafelgefachen der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand nachweisbar ist.

Für eine Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten sind stationäre Temperaturen erforderlich, da die Wärmespeicherfähigkeit der Baustoffe bei Temperaturänderungen das Messergebnis beeinflusst. Dies erfordert hohe und über mehrere Stunden konstante Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen von > 15 K und die Vermeidung von Sonnenstrahlung auf das untersuchte Bauteil. Daher sollten in-situ-Messungen nur an Nordfassaden in den Monate Oktober bis Februar bei konstantem Innenraumklima erfolgen und nur Messwerte bei bewölktem Himmel in den Nacht- und Morgenstunden bewertet werden.

Die an der SSW-Außenwand vorgehängten Photovoltaikmodule und die an der NNO-Außenwand vorgehängten schwarzen Sto-Verotec Glas-Paneele verursachen gemäß den Ergebnissen aus Abschnitt 7.6 und aus 7.7 eine strahlungsbedingte Temperaturerhöhung auf den außenseitigen Holztafelbepunktungen der hochgedämmten Holztafelbauweise. Die damit verbundenen hohen Temperaturschwankungen sind bei der Auswahl der Messdaten zu beachten. Weitere Fehlereinflüsse sind Luftleckagen und Niederschläge. Ein Phasenübergang durch Tauen und Verdunsten führt lokal über den Bauteilquerschnitt zu Wärmequellen oder Wärmesenken und beeinflusst damit die ansonsten konstante Wärmestromdichte über den Wandquerschnitt.

Unter Beachtung dieser Einflüsse hat sich in-situ der Einsatz von Wärmestromplatten in Kombination mit weiteren Temperaturmessfühlern bewährt. Die Ermittlung des effektiven U-Wertes erfolgt unter Annahme einer hinreichend konstanten Wärmestromdichte über den Wandquerschnitt mit

- einer Silikon-Wärmeflussplatte (Typ 118CSI der Fa. Ahlborn) auf der innenraumseitigen OSB-Platte mittig in Gefach 5 (siehe BILD 6-1) an der Schichtgrenze zur Hanfdämmung in der Installationsebene zur Messung der Wärmestromdichte q (W/m^2)
- dem Temperaturfühler 3-NT-h_2 (siehe TABELLE 6.2-1) auf der innenraumseitigen OSB-Platte mittig in Gefach 5 (siehe BILD 6-1) an der Schichtgrenze zur Hanfdämmung in der Installationsebene zur Messung von T_{si} ($^{\circ}C$)
- dem Temperaturfühler 2-NTMF (siehe TABELLE 6.2-3) an der Grenzschicht außenseitige OSB-Platte zur Zellulose-Gefachdämmung (mittig im Gefach in $h/2$ und $b/2$) zur Messung von T_{se} ($^{\circ}C$)
- der Lufttemperatur in der Hinterlüftungsebene und der Innenraumtemperatur

für die NNO-Wand und einer analogen Anordnung der Messtechnik für die SSW-Wand. Der Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Berechnung wird durch zeitliche Mittelwerte für T_{si} , T_{se} und q hinreichend herabgesetzt, um einen für den gesamten Wandquerschnitt gemittelten Wärmedurchlasswiderstand der Holztafelwandgefache pro Monat aus den Messwerten zu berechnen. Für die außenseitige OSB-Platte und die Installationsebene werden die Wärmedurchlasswiderstände aus den Schichtdicken und Wärmeleitfähigkeiten der Materialien bestimmt.

TABELLE 7.8-1 BERECHNETE U_{eff} -WERTE DER NNO-AUßENWAND UND DER SSW-AUßENWAND AUS MESSWERTEN UND BERECHNUNGSANSÄTZEN

	Monatsmittelwert von U_{eff} (W/m ² K)					
	Jan	Febr	Mrz	Okt.	Nov	Dez
Berechnung	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Messung NNO-Außenwand 2012	0,085	0,105	0,076	0,090	0,090	0,091
Messung NNO-Außenwand 2013	0,099	0,098	0,088	0,095	0,099	0,095
Messung SSW-Außenwand 2013)*	0,091	0,089	0,089	-	0,096	0,089
Messung NNO-Außenwand 2014	0,094	0,094		0,085	0,095	0,094

)*Die Wärmeübergangswiderstände wurden aufgrund fehlender Messdaten der Hinterlüftungsebene in der SSW-Wand mit $R_s=0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ für die Ermittlung des effektiven U-Wertes angesetzt.

Die aus Messwerten abgeleiteten effektiven U-Werte zeigen für 2012 bis 2014, dass der geplante Wärmedämmstandard in der Gebäudenutzung erreicht wurde.

7.9 Nachweis des Wärme- und Feuchtetransports aus natürlicher Konvektion in der Außenwand-Gefachdämmung des Erdgeschosses

Wasserdampfdiffusion bewirkt an dem untersuchten Schichtenaufbau in der kalten Jahreszeit, dass in der außenseitigen Gefachbeplankung und an der Schichtgrenze zur Gefachdämmung die höchste Materialfeuchte auftritt. Natürliche Konvektion in der Gefachdämmung führt bei Randbedingungen nach [4] und [6] zu einer Feuchteumverteilung mit einer Feuchtekonzentration in der oberen außenseitigen Dämmstoffecke, siehe BILD 4-1. Der Feuchtetransport aus Wasserdampfdiffusion und aus Konvektion in den Außenbauteilen überlagern sich und sind gekoppelt an das Temperaturfeld. Die Wärmebrücken am unteren Gefachrand (Sockel) und am oberen Gefachrand (Deckenanschluss) beeinflussen die Materialfeuchte in der Gefachdämmung und in der außenseitigen Gefachdämmung, wobei die Wärmebrücke am Sockel ausgeprägter ist (siehe BILD 5-2). Im Sockelbereich der SSW-Außenwand wurde über die Differenzdruckmethode (Blower Door) eine Luftleckage nachgewiesen. Daher ist in Anlehnung an Abschnitt 5.3.4 mit einer Überlagerung der Effekte zu rechnen. Das in Voruntersuchungen für natürliche Konvektion typische Profil

$$u_{\text{kalt, oben}} > u_{\text{kalt, mittig}} > u_{\text{kalt, unten}}$$

wird infolge der Wärmebrücken und Luftleckagen am Sockel derart beeinflusst werden, dass dort höhere Materialfeuchten zu erwarten sind.

Das am Effizienzhaus Plus durchgeführte Materialfeuchte-Monitoring zum Nachweis der natürlichen Konvektion fokussiert sich auf die Außenwände mit Untersuchungen

- zum Materialfeuchtegehalt der außenseitigen Gefachbeplankungen in halber Schichtdicke,
- an der Schichtgrenze von Gefachbeplankung und Gefachdämmung in Bezug auf Tauwasser oder Schimmelpilzbefall
- in der Gefachdämmung zum Materialfeuchtegehalt, der absoluten Feuchtigkeit der Luft (abhängig von relativer Luftfeuchte und Temperatur), zu Schimmelpilzbefall und zum Temperaturprofil.

7.9.1 Feuchteverhalten der außenseitigen Gefachbeplankungen der Holztafelelemente von NNO-Außenwand und SSW-Außenwand

Materialfeuchte der außenseitigen Gefachbeplankungen der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand

Die Messwerte an Fichteproben, die innenseitig im oberen, mittleren und unteren Teil der außenseitigen OSB-Platte angebracht sind (BILD 9-4 und BILD 9-6) zeigen für die NNO-Außenwand in 2012, dass am oberen Gefachrand die höchste Materialfeuchte und in halber Geschosshöhe die niedrigste Materialfeuchte auftritt, siehe BILD 7-41. Die Materialfeuchte nahe dem Sockel ist höher als in halber Geschosshöhe, was als Einfluss der Wärmebrücke bewertet wird. Die Unterschiede in der Materialfeuchte über die Höhe der außenseitigen OSB-Platte ist mit dem Feuchtetransport aus natürlicher Konvektion in der Dämmung erklärbar. Über den Messzeitraum werden die Materialfeuchteunterschiede geringer, da aufgrund des Schichtenaufbaus und der geringen Feuchtelast in der NNO-Außenwand der Feuchtegehalt sinkt.

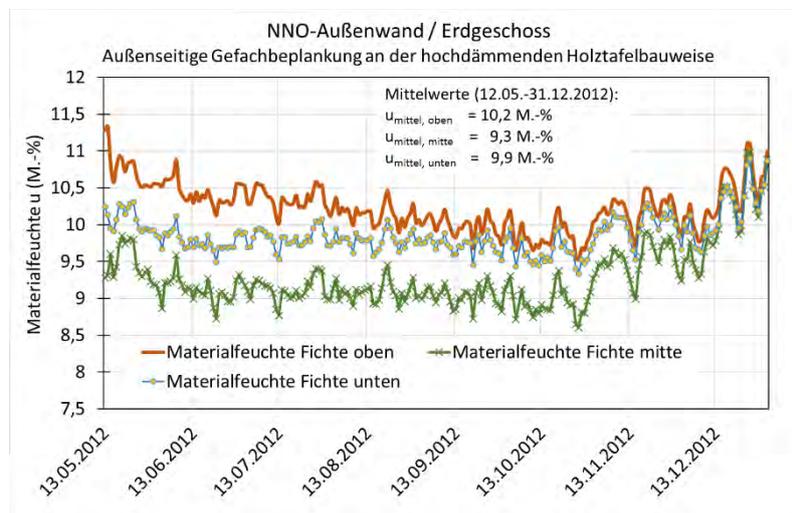


BILD 7-41 MESSWERTE ZUR MATERIALFEUCHTE IN DER AUßENSEITIGEN OSB-GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND (EG) VON 2012

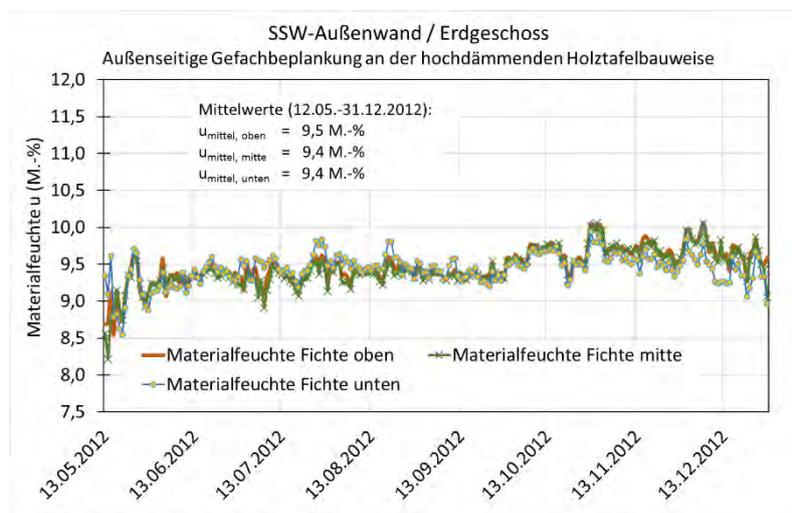


BILD 7-42 MESSWERTE ZUR MATERIALFEUCHTE IN DER AUßENSEITIGEN OSB-GEFACHBEPLANKUNG DER SSW-AUßENWAND (EG) VON 2012

An der SSW-Außenwand wurden diese Materialunterschiede über die Höhe der außenseitigen OSB-Platte nicht festgestellt, siehe BILD 7-42. Dies ergibt sich aus den höheren strahlungsbedingten Oberflächentemperaturen der außenseitigen OSB-Platte (Abschnitt 7.6).

An den außenseitigen OSB-Platten der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand wurden über den gesamten Messzeitraum keine kritischen Materialfeuchten festgestellt.

Materialfeuchte der außenseitigen Gefachbeplankungen der NNO-Außenwand für fünf unterschiedlich ausgebildete Gefache

Um den Einfluss verschiedener innen- und außenseitigen Diffusionswiderstände auf das Feuchteverhalten der Wandaufbauten zu untersuchen, wurden gemäß BILD 6-1 und TABELLE 9.1-1 fünf verschiedene Wandaufbauten an der NNO-Außenwand ausgeführt. Die Messergebnisse zur Materialfeuchte der außenseitigen Gefachbeplankung (OSB4 oder diffusionsoffene UDP) waren aufgrund von hohen Messunsicherheiten (z.B. dem Zerschneiden der UDP-Proben in Gefach 1 und 2, anhaftende Zelluloseflocken und weitere) nicht verwertbar. Vergleichende Simulationsrechnungen wurden mit WUFI pro 5.0 für das Außenklima Potsdam 2004 sowie mit einem Innenklima der Feuchtklasse 1 für drei aufeinanderfolgende Jahre durchgeführt, da nicht alle erforderlichen Messgrößen für die Eingabe eines Klimadatensatzes in WUFI am Effizienzhaus gemessen wurden.

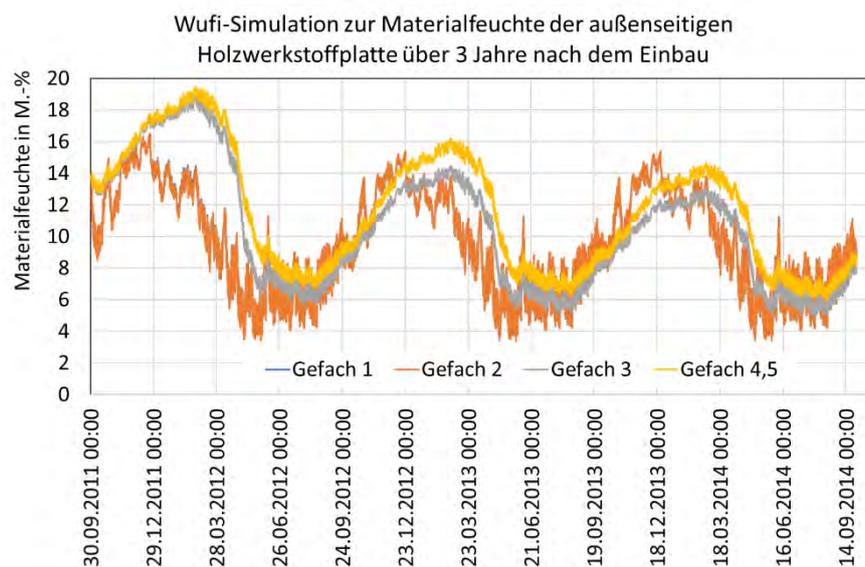


BILD 7-43 ERGEBNISSE VON SIMULATIONSRECHNUNGEN MIT WUFI PRO 5.0 ZUR MATERIALFEUCHTE DER AUßENSEITIGEN HOLZTAFELBEPLANKUNGEN MIT OSB4 (GEFACHE 3, 4 UND 5) UND EINER DIFFUSIONSOFFENEN HOLZWEICHFASERPLATTE (GEFACHE 1 UND 2) BEI UNTERSCHIEDLICHEN s_{di} - UND s_{de} -WERTEN DER AUßENWANDGEFACHE

Nach diesen WUFI-Berechnungen treten die höchsten Materialfeuchten in der außenseitigen Beplankung der Gefache 4 und 5 auf. Bereits ein Jahr nach der Errichtung des Gebäudes sind die Materialfeuchten der 5 untersuchten Außenwandgefache nahezu gleich und die Unterschiede in den s_{di} - und s_{de} -Werten dieser Außenwandaufbauten nicht maßgebend. Weitere Simulationsrechnungen zeigen, dass diese schnelle Austrocknung auf die geringe Feuchtelast im Innenraum und auf die dunklen Außenoberflächen zurückzuführen ist. Bedingt durch die dunkle Außenoberfläche erhöht sich die kurzweilige Strahlungsabsorption erheblich. Dies fördert die Austrocknung der außenliegenden Schichten. Für das Gefach 3 beträgt der Unterschied in der Materialfeuchte in der außenseitigen OSB-

Platte zwischen einer hellen ($a \sim 0,2$) und einer dunklen ($a \sim 0,8$) Außenoberfläche maximal 6,4M.-% und im Mittel über 3 Jahre 3,4M.-%. Während nach den WUFI-Berechnungen die Materialfeuchte in den außenseitigen OSB-Platten von Gefach 3, 4 und 5 bei dunkler Außenoberfläche im ersten Winter unter 20M.-% bleibt, würde die OSB-Feuchte im Gefach 4 und 5 bei heller Oberfläche an 61 Tagen und bei Gefach 3 an 26 Tagen über 20 M.-% liegen.

Zustand der Schichtgrenze Gefachdämmung / Beplankungen der Gefache 1-5 in der NNO-Außenwand während der Öffnung der Vorhangsfassade

In der Bauphase wurden kreisrunde Entnahmepробen in die außenseitige OSB4-Platte von Gefach 3 bis 5 und in die diffusionsoffene UDP-Platte mit einem Dosenbohrer gebohrt und in den Beplankungen wieder eingesetzt sowie fixiert. Durch die kurzzeitige Demontage von Glas-Paneelen an den Gefachen 1 bis 5 der hinterlüfteten NNO-Fassade (siehe BILD 6-1) durch die Errichterfirma an den Tagen 27.4.2012, 24.01.2013, 18.04.2013 und 04.03.2015 konnte die Schichtgrenze zwischen Gefachdämmung und außenseitiger Gefachbeplankung optisch auf Tauwasserausfall und Schimmelbefall sowie der Zustand der Dämmung an 9 Stellen begutachtet werden. Probenentnahmen an den Tagen 27.4.2012, 18.04.2013 und am 04.03.2015 dienten zudem der Schimmelpilzdiagnostik durch das darauf spezialisierte Labor der Fa. MICOR GmbH.

Ortstermin am 27.04.2012 (siehe Fotos im Anhang 9.3)

- Kein Tauwasserausfall an den Schichtgrenzen der Zellulose-Gefachdämmung / außenseitige OSB4-Platte an den Gefachen 3 bis 5 bzw. an den Schichtgrenzen mit diffusionsoffener UDP-Platte in den Gefachen 1 und 2 nach einer langen Warmwetterperiode im April 2012



BILD 7-44 FOTOS EINZELNER ENTNAHMEPROBEN IN DEN AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNGEN IN DER NNO-AUßENWAND DES ERDGESCHOSSES BEI DER ÖFFNUNG DER FASSADE AM 27.04.2012

- Die UDP-Platten sind im Bereich der kreisrunden Entnahmepробen beim Bohren mit einem Dosenbohrer (für Steckdosen) teilweise gebrochen, so dass 2 Schalen entstanden - dies schloss Untersuchungen zum Materialfeuchtegehalt über regelmäßige Wägungen und anschließende Darrtrocknung an diesen Proben aus.
- optische Unterschiede in der Rohdichte im Bereich der Öffnungsstellen mit zum Teil augenscheinlich niedrigeren Rohdichten in den Gefachen 1 bis 4 im Vergleich zu Gefach 5 – in die Gefache 1 bis 4 wurden auf der Baustelle in Berlin die Zellsulosedämmung eingeblasen, das Einblasen der Dämmung in Gefach 5 erfolgte bei der Errichterfirma der Holztafelelemente in Bissingen (Entfernung zu Berlin ca. 700km)
- keine sichtbaren Sackungen der Gefachdämmungen am oberen Gefachrand
 - o lokal durch den Einbläser ermittelt: Gefache 1 bis 3 je mit $\rho=67,3 \text{ kg/m}^3$, Gefach 4 mit $\rho=38,2 \text{ kg/m}^3$
 - o Gefach 5 ohne Messwert für die Rohdichte, da Gefahr der Zerstörung von Messkabeln
- ein optisch kaum sichtbarer Schimmelpilzbefall (dünner hellgrauer Belag) auf einzelnen Kontaktflächen der Bauplatten zur Dämmung hin

- Die mikrobiologischen Untersuchungsergebnisse von [22] sind in TABELLE 9.3-1 und die Bewertungen werden nachfolgend zusammengefasst: Auf allen 10 Proben wurden Schimmelpilze sowie in hohen Abundanzen Hefen und Bakterien nachgewiesen. An allen 5 Gefachen deuten die Abklatschproben an den Entnahmeprobe mit höheren Koloniezahlen auf eine Befallsituation mit den Schimmelpilzen Penicillium und Cladosporium hin. Eine Wichtung der Befallsintensität für die 5 Gefache ist nicht möglich. Geringfügiger Befall (niedrige Koloniezahlen), z.B. von Trichoderma und Alternaria sprechen für eine Kontamination beim Einbau. Der Nachweis der Schimmelpilze, Hefen und Bakterien lässt auf eine schimmelpilzrelevante Verfügbarkeit von Feuchte im Bereich von $a_w > 0,8$ bis $a_w > 0,95$ (relative Luftfeuchten $> 80\%$ bis $>95\%$) kombiniert mit schimmelpilzwachstumsfördernden Temperaturen schließen.
- Vergleichende mikrobiologische Untersuchungen von Abklatschproben an diesen Entnahmeprobe ergaben einen geringfügigen Befall, der auf eine schimmelpilzrelevante Verfügbarkeit von Feuchte im Bereich von $a_w > 0,8$ bis $a_w > 0,95$ (relative Luftfeuchten $> 80\%$ bis $>95\%$) kombiniert mit schimmelpilzwachstumsfördernden Temperaturen schließen lässt, siehe Anhang 9.3 und [22].

Ortstermin am 24.01.2013 (siehe Fotos im Anhang 9.3)

- kein sichtbarer Tauwasserausfall an den Schichtgrenzen der fünf Gefache, die Oberflächen fühlten sich feucht an
- sichtbare Sackungen der Gefachdämmung am oberen Gefachrand von Gefach 4 (vergleichsweise niedrige Rohdichte beim Einbau von $38,2 \text{ kg/m}^3$)

Ortstermin am 18.04.2013 (siehe Fotos im Anhang 9.3)

- kein Tauwasserausfall an den Schichtgrenzen der fünf Gefache
- kein sichtbarer Schimmelpilzbefall auf den Kontaktflächen der Bauplatten zur Dämmung hin
- Die mikrobiologischen Untersuchungsergebnisse von [23] sind in TABELLE 9.3-1 und die Bewertungen werden nachfolgend zusammengefasst: Die 17 Abklatschproben an den Entnahmeprobe der OSB4- und UDP-Platten ergaben eine deutlich geringe Belastung mit Schimmelpilzen im Vergleich zu April 2012. Alle Proben waren wie 2012 stark mit Hefen und Bakterien befallen. Daher müssen zumindest zeitweise höhere Feuchtelasten mit $>90\%r.F.$ auftreten, um das Hefe- und Bakterienwachstum zu ermöglichen. Die ergänzend entnommenen und mikrobiologisch untersuchten Klebefilmproben von den Innenseiten der Bauplatten zur Dämmung hin bestätigen in ihren Ergebnissen die Schlussfolgerungen aus den Abklatschproben. Es waren Sporen und vereinzelt Myzelbruch, jedoch kein Befall nachweisbar. Die mikroskopische Analyse einzelner Dämmflocken aus jedem Gefach ergab, dass im Dämmstoff kein Befall nachweisbar war.
- sichtbare Sackungen der Gefachdämmung am oberen Gefachrand von Gefach 4

Ortstermin am 04.03.2015 (siehe Fotos im Anhang 9.3)

- kein Tauwasserausfall an den Schichtgrenzen der fünf Gefache
- kein sichtbarer Schimmelpilzbefall auf den Kontaktflächen der Bauplatten zur Dämmung hin
- Die mikrobiologischen Untersuchungsergebnisse von [24] sind in TABELLE 9.3-1 und die Bewertungen werden nachfolgend zusammengefasst: Die 17 Abklatschproben an den Entnahmeprobe der OSB4- und UDP-Platten ergaben eine höhere Belastung als 2013 und eine geringe Belastung mit Schimmelpilzen im Vergleich zum April 2012. Es waren wieder keine

signifikanten Unterschiede zwischen den Gefachen erkennbar. Hefen und Bakterien wurden nicht bestimmt. Die nachgewiesenen Schimmelpilzgattungen sind überwiegend dem Außenluftspektrum und daher einer bauüblichen Hintergrundbelastung zuzuordnen.

- sichtbare Sackungen der Gefachdämmung am oberen Gefachrand von Gefach 4 von ca. 20mm und in Gefach 1 von ca. 5mm

7.9.2 Wärme- und Feuchteverhalten der Zellulose-Gefachdämmung

Temperaturprofil über den Querschnitt $d \times h$ der Gefachdämmung – Messwerte in halber Gefachdämmdicke $d/2$, siehe Bild 4-1 und Bild 5-2

Die Auswertung von Temperaturmessungen innerhalb der Zellulosedämmung nach BILD 7-45 und BILD 7-46 bestätigen den in BILD 5-2 dargestellten Temperaturverlauf über die Gefachhöhe in halber Dämmdickedicke als Nachweis für natürliche Konvektion in der offenenporigen Zellulosedämmung sowie die ebenfalls in Abschnitt 5.3.1 diskutierten Einschränkungen in Bezug auf die Einflüsse von Wärmebrücken (Sockel, Deckenanschluss), von täglichen Lufttemperaturschwankungen sowie von Messabweichungen der Sensoren für das Messobjekt.

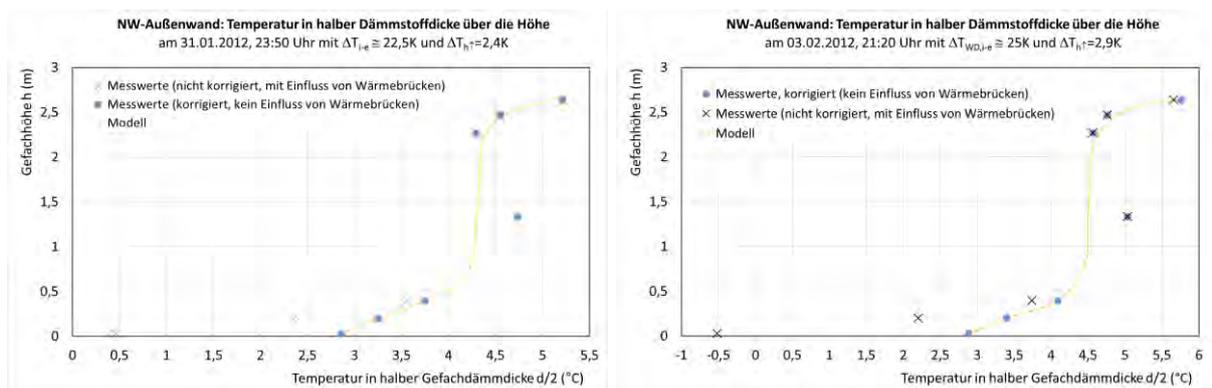


BILD 7-45 TEMPERATUREN IN HALBER GEFACHDÄMMDICKE IN VERSCHIEDENEN HÖHEN FÜR DIE DARSTELLUNG EINES FÜR NATÜRLICHE KONVEKTION TYPISCHEN TEMPERATURVERLAUFES ÜBER DIE HÖHE: MESSWERTE VOM 31.01.2012 UND VOM 03.02.2012 SOWIE DARSTELLUNG DES EINFLUSSES VON WÄRMEBRÜCKEN AUS WÄRMELEITUNG

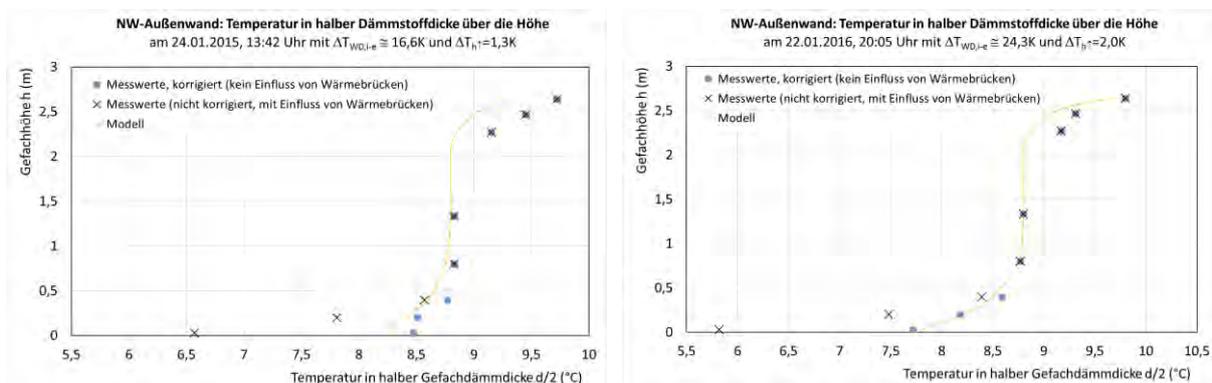


BILD 7-46 TEMPERATUREN IN HALBER GEFACHDÄMMDICKE IN VERSCHIEDENEN HÖHEN FÜR DIE DARSTELLUNG EINES FÜR NATÜRLICHE KONVEKTION TYPISCHEN TEMPERATURVERLAUFES ÜBER DIE HÖHE: MESSWERTE VOM 24.01.2015 UND VOM 22.01.2016 SOWIE DARSTELLUNG DES EINFLUSSES VON WÄRMEBRÜCKEN AUS WÄRMELEITUNG

Die Überlagerung der Temperaturfelder aus Wärmeleitung und natürlicher Konvektion in der offenporigen Gefachdämmung führt am Messobjekt zu einer größeren Ausprägung der Wärmebrücke an der 2D-Ecke Bodenplatte / Außenwand (Sockel). Der Einfluss der natürlichen Konvektion ist gering, bedingt durch die vergleichsweise geringe Luftdurchlässigkeit der in die Holztafeln eingeblasenen Zellulose. Bei dem Einbau anderer loser Dämmstoffe mit höherer Luftdurchlässigkeit wird sich diese Wärmebrücke durch einen höheren Anteil an natürlicher Konvektion verstärken.

Die Messergebnisse sind plausibel zu Untersuchungen in [4], in denen bei Untersuchungen an Zellulose in Doppelklimakammerversuchen bei einer Lufttemperaturdifferenz $\Delta T_{i-e\uparrow} = 42,8K$ eine Temperaturdifferenz über die Höhe in halber Gefachdämmdicke von $\Delta T_{d/2\uparrow} = 4,5K$ auftrat. Tendenziell sind die Ergebnisse zudem vergleichbar mit Ergebnissen an anderen Dämmstoffen bei Lufttemperaturdifferenzen von 20K, 30K und 40K.

Absolute Feuchtigkeit der Luft in der Zellulose-Gefachdämmung – in den Messgefachen der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand sind je zwei T/RH-Sensoren im Abstand von 35mm von der außenseitigen OSB-Platte sowie 50mm vom oberen und unteren Gefachrand angeordnet, siehe Bild 6-2 und Tabelle 6.2-2

Für eine Bewertung des Einflusses von natürlicher Konvektion auf den Feuchtetransport in der Gefachdämmung wurden die Ergebnisse der Sensoren in der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand als monatliche Mittelwerte miteinander verglichen, siehe Bild 7-47 bis Bild 7-50.

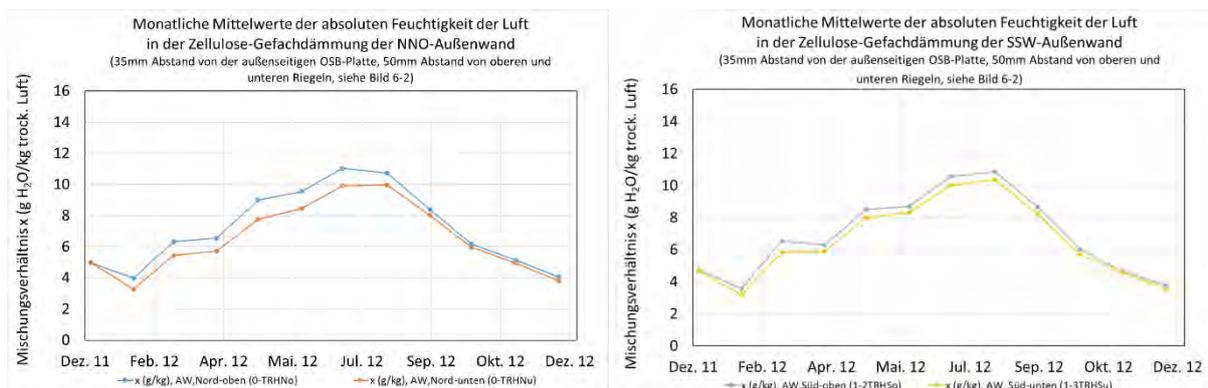


BILD 7-47 GEMESSENE MONATLICHE MITTELWERTE DER ABSOLUTEN FEUCHTIGKEIT DER LUFT IM DÄMMSTOFF IM ABSTAND VON 35MM VON DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND UND DER SSW-AUßENWAND FÜR 2012

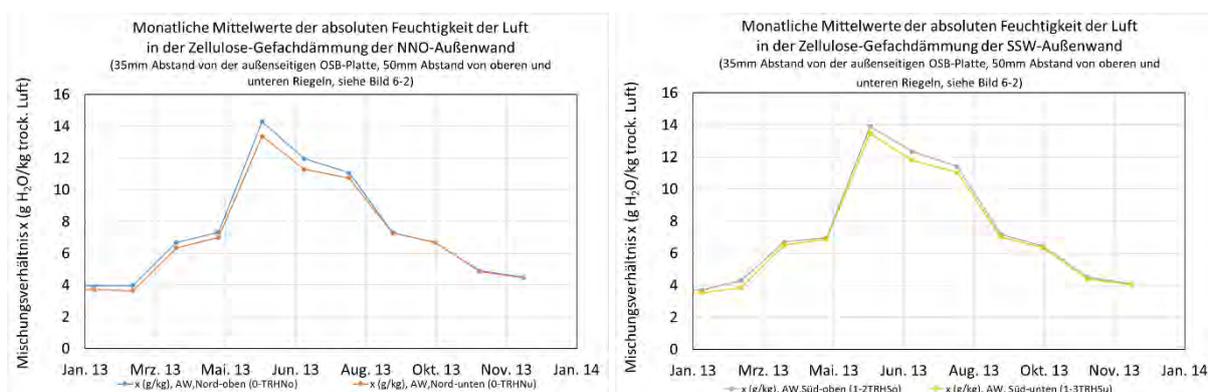


BILD 7-48 GEMESSENE MONATLICHE MITTELWERTE DER ABSOLUTEN FEUCHTIGKEIT DER LUFT IM DÄMMSTOFF IM ABSTAND VON 35MM VON DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND UND DER SSW-AUßENWAND FÜR 2013

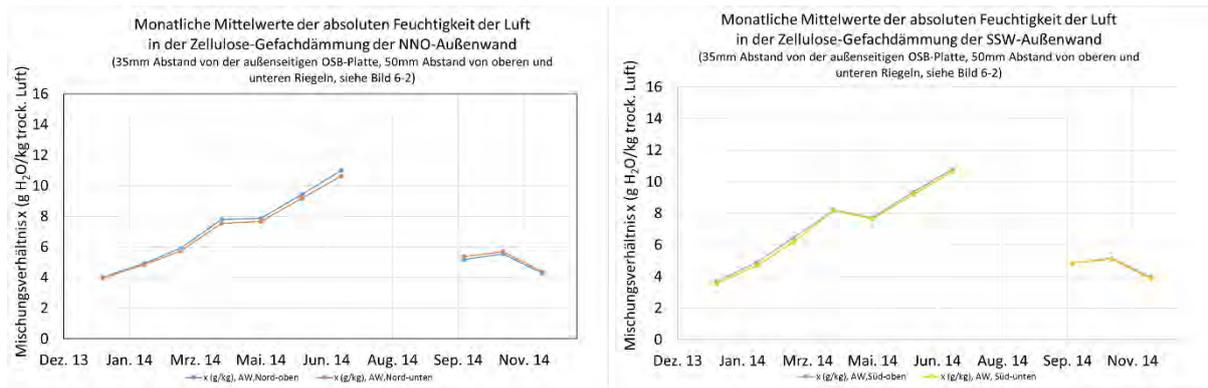


BILD 7-49 GEMESSENE MONATLICHE MITTELWERTE DER ABSOLUTEN FEUCHTIGKEIT DER LUFT IM DÄMMSTOFF IM ABSTAND VON 35MM VON DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND UND DER SSW-AUßENWAND FÜR 2014

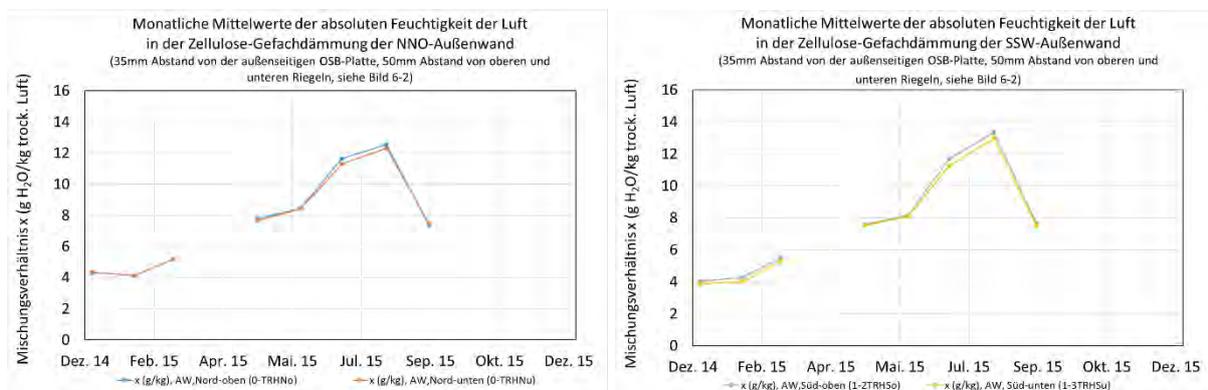


BILD 7-50 GEMESSENE MONATLICHE MITTELWERTE DER ABSOLUTEN FEUCHTIGKEIT DER LUFT IM DÄMMSTOFF IM ABSTAND VON 35MM VON DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND UND DER SSW-AUßENWAND FÜR 2015

Eine höhere absolute Feuchtigkeit der Luft in der Zellulose-Gefachdämmung in der oberen außenseitigen Ecke im Vergleich zur unteren außenseitigen Ecke ist in den Jahren 2012 bis 2015 trotz der Wärmebrücke am Sockel feststellbar. 2012 war dieser Unterschied aufgrund der Einbaufeuchte ausgeprägter als in den Folgejahren. Die NNO-Außenwand weist geringfügig höhere Werte auf als die SSW-Außenwand. Ab 2014 ist diese Differenz vernachlässigbar. Ein Feuchtetransport aus natürlicher Konvektion in den Außenwandgefachdämmungen ist damit nicht signifikant nachweisbar. Die Gründe liegen in den warmen winterlichen Außentemperaturen, dem Wandaufbau und der geringen Feuchtelast im Innenraum.

Materialfeuchtemessungen mit der Darr-Wäge-Methode nach Abschluss der Untersuchungen im Sommer 2016 zeigten keine signifikanten Unterschiede

- zwischen den oberen und unteren Entnahmestellen der fünf Untersuchungsgefache der NNO-Außenwand und
- zwischen den 4 verschiedenen Wandaufbauten.

7.10 Materialfeuchte-Monitoring der opaken Außenbauteile

Die hochgedämmten Holztafelplatten für die Außenwände, Dach und Bodenplatte sind entsprechend ihrer räumlichen Orientierung unterschiedlichen Klimabelastungen ausgesetzt. Deren Schichtenaufbau berücksichtigt dies. Es wird untersucht, wie sich das hygrothermische Verhalten dieser Bauteile voneinander unterscheidet.

7.10.1 Feuchteverhalten der außenseitigen Gefachbeplankungen der Holztafelelemente der Außenwände im Vergleich zu Dach und Bodenplatte über dem Kriechkeller

In der Anlage zu diesem Untersuchungsbericht/ Abschnitt 9.4.2 sind die Ergebnisse aus kontinuierlich gemessenen Materialfeuchten in den außenseitigen Gefachgeplankungen von Außenwand, Dach und Bodenplatte für jedes Jahr als Diagramme dargestellt. Die Aufzeichnung der elektrischen Leitfähigkeiten erfolgte stündlich. Aus diesen Messwerten und den selbst ermittelten Widerstandskennlinien zur elektrischen Holzwerkstoffmessung (siehe Abschnitt 9.2 im Anhang) wurde unter Berücksichtigung der Temperaturkompensation die Materialfeuchte stündlich und als täglicher Mittelwert bestimmt. Erhebliche Schwankungen dieser Werte von aufeinanderfolgenden Tagen sind ein Indiz für den Einfluss elektromagnetischer Störungen (z.B. der Induktionsladematten für das Elektroauto oder das E-Bike), die sich trotz vorbeugender Maßnahmen beim Einbau der Messfühler nicht vermeiden ließen. Die jährlichen Mittelwerte für alle untersuchten Bauteile sind in TABELLE 7.10-1 zusammengefasst. Die Ergebnisse in Abschnitt 9.4.2 und TABELLE 7.10-1 zeigen, dass in keinem der untersuchten Bauteile kritischen Feuchten für ein Tauswasserschadensrisiko auftreten. Es wird deutlich, dass der Strahlungsaustausch zwischen der Unterseite der Dach-PV-Elemente und dem Dach, verbunden mit hohen Temperaturen im Dach zu niedrigeren Materialfeuchten der außenseitigen Gefachbeplankungen führen, verursacht durch Umkehrdiffusion. Der Einfluss der Strahlungswärme auf die Materialfeuchte der außenseitigen Gefachbeplankung ist bekannterweise auch an der SSW-Außenwand gegeben und wird durch die Messergebnisse belegt. Die Materialfeuchten der zementgebundenen Spanplatte über dem Kriechkeller liegt im Bereich der Materialfeuchten der außenseitigen OSB4-Platten der hinterlüfteten Außenwände. Dies ist konform zu den gemessenen Klimadaten im Kriechkeller, siehe Abschnitt 7.3.

TABELLE 7.10-1 MITTELWERTE DER MATERIALFEUCHTE ÜBER DEN JÄHRLICHEN MESSZEITRAUM VON 2011 BIS 2016 FÜR DIE UNTERSUCHTEN BAUTEILE: BODENPLATTE, NNO-AUßENWAND, SSW-AUßENWAND UND DACH, SIEHE ABSCHNITT 9.4.2

BAUTEIL	MITTELWERT DER MATERIALFEUCHTE DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG (M.-%)					
	BODENPLATTE: ZEMENTGEBUNDENE SPANPLATTE, ANSONSTEN OSB4					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	11.11.-19.12.	12.05.-31.12.	01.01.-31.12.	01.01.-31.12.	01.01.-31.12.	01.01.-06.10.
NNO-AUßENWAND	13,0	10,2	9,9	9,6	9,5	9,4
SSW-AUßENWAND	12,7	9,3	9,2	9,0	9,3	9,5
BODENPLATTE	11,4	10,5	10,2	9,7	10,1	10,2
DACH IM BEREICH DER PV-ELEMENTE	7,5	8,4	8,7	9,0	9,0	9,4
DACH AUßERHALB DES BEREICHES DER PV-ELEMENTE	7,9	8,5	8,9	9,7	9,8	9,9

7.10.2 Temperaturen und relative Luftfeuchte in der Gefachdämmung der opaken Außenbauteile zur Bewertung des hygrothermischen Verhaltens

Bewertung von hygrothermischen Bedingungen für Schimmelpilzsporenkeimung und Schimmelpilzmyzelwachstum

Eine Abschätzung des Risikos von Schimmelpilzsporenkeimung und von Schimmelpilzmyzelwachstum nahe der Schichtgrenze außenseitige Gefachbeplankung / Gefachdämmung ist über Messungen zur Temperatur und zur relativen Luftfeuchte im Bauteil möglich. Die dazu verwendeten kapazitiven Miniatur-Feuchtefühler haben

- in der NNO-Außenwand und in der SSW-Außenwand einen Abstand von 35mm von der außenseitigen Gefachbeplankung und einen Abstand von 50mm von den oberen bzw. unteren Gefachrändern
- im Bodengefach und in den zwei Dachgefachen einen Abstand von 5mm von der außenseitigen Gefachbeplankung.

Die Lage der Untersuchungsgefache in den Außenwänden, der Bodenplatte und der Dachplatte sowie die Art und Lage der Sensoren sind in Abschnitt 6 sowie in Abschnitt 9.1 aufgeführt und zeichnerisch dargestellt.

Als Bewertungskriterium lassen sich die von SEDLBAUER (2001) aufgestellte Isoplethensysteme oder einzelne hygrothermische Grenzwerte aus den Isoplethensystemen heranziehen. Beispiele für daraus abgeleitete hygrothermische Prüfkriterien gekoppelt an eine Mindestsporenauskeimzeit sind für die Gefährdungsklasse A (eingestuft sind Schimmelpilze mit erheblicher Gesundheitsgefährdung, die daher in Wohnräumen nicht auftreten dürfen):

- (1) ≥ 8 Tage, Temperatur $\theta \geq 5^\circ\text{C}$ und relative Luftfeuchte $\text{RH} \geq 98\%$
- (2) ≥ 16 Tage, Temperatur $\theta \geq 5^\circ\text{C}$ und relative Luftfeuchte $\text{RH} \geq 96\%$
- (3) ≥ 8 Tage, Temperatur $\theta \geq 10^\circ\text{C}$ und relative Luftfeuchte $\text{RH} \geq 87,5\%$
- (4) ≥ 16 Tage, Temperatur $\theta \geq 10^\circ\text{C}$ und relative Luftfeuchte $\text{RH} \geq 86\%$

Im Untersuchungszeitraum zwischen Dezember 2011 und Oktober 2016 wurden über eine ausreichend lange Mindest-Sporenauskeimzeit keine signifikanten hygrothermischen Bedingungen für Schimmelpilzsporenkeimung oder für Schimmelpilzmyzelwachstum in den NNO- und SSW-Außenwänden, in der Bodenplatte oder im Dach festgestellt.

Absolute Feuchtigkeit der Luft in der Zellulose-Gefachdämmung – in den Messgefachen der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand mit je zwei T/RH-Sensoren, siehe Anlage 9.1

Die maximale absolute Luftfeuchte ist der Gehalt an Wasserdampf pro m^3 Luft, der bei nahezu 100% relativer Luftfeuchte, d.h. bei Sättigung aufgenommen werden kann. Die aufnehmbare Wasserdampfmenge nimmt mit steigender Lufttemperatur zu. Die im Dämmstoff gemessene absolute Luftfeuchte entsteht durch Verdunstung und kennzeichnet die tatsächliche Wasserdampfkonzentration an der Stelle des Sensors. Im Bauteil hängt das Austrocknungspotential vom Diffusionswiderstand der Schichten ab.

Die Ergebnisse der monatlichen Mittelwerte für die absolute Luftfeuchte der vorab benannten Messstellen der kapazitiven Miniatur-Feuchtefühler zeigen in BILD 7-51, dass im Dach die höchsten absoluten Luftfeuchten auftreten, gefolgt von der oberen Außenwanddecke der NNO-Außenwand.

Beim Dach ist das Austrocknungspotential zur Außenseite aufgrund der Dachabdichtung gering. Ein Austrocknungspotential zum Innenraum ist durch die innenraumseitige Dampfbremse mit $s_{di} \geq 100m$ nicht gegeben. Dennoch wird es durch die hohen Dachoberflächentemperaturen infolge von Umkehrdiffusion zu einer Umverteilung der Materialfeuchte und der absoluten Luftfeuchte kommen.

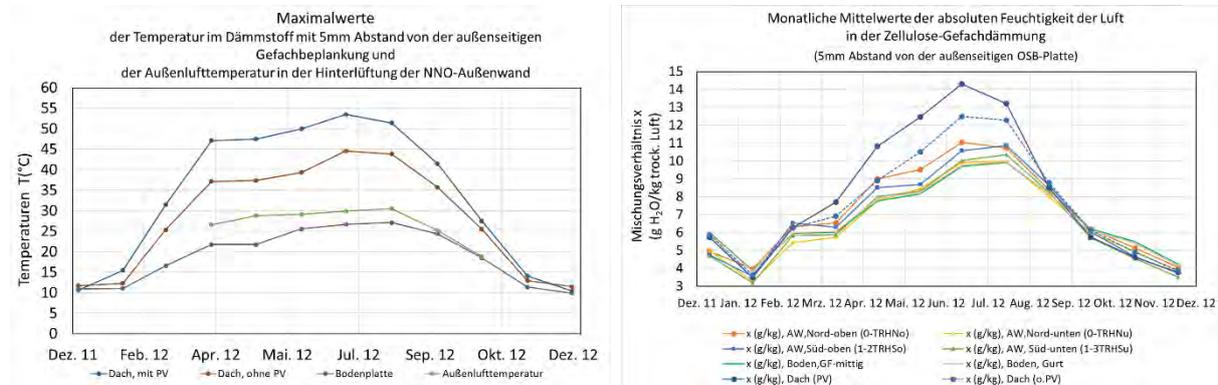


BILD 7-51 MONATLICHE MITTELWERTE GEMESSENER MAXIMALWERTE DER TEMPERATUR IM DÄMMSTOFF IM ABSTAND VON 5MM VON DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER AUßENBAUTEILE SOWIE DER MONATLICHEN MITTELWERTE DER ABSOLUTEN FEUCHTIGKEIT IN DER LUFT DER ZELLULOSE-GEFACHDÄMMUNG FÜR 2012

8 Zusammenfassung

Es wurde ein auf das Objekt bezogenes Messprogramm für ein Temperatur- und Feuchtemonitoring der opaken Außenbauteile Bodenplatte über dem Kriechkeller, NNO-Außenwand, SSW-Außenwand sowie Flachdach im und außerhalb des Bereiches der PV-Elemente entwickelt. Die Messungen erfolgten im Zeitraum von 2012 bis 2016.

Im Untersuchungszeitraum von 2012 bis 2016 lagen die in der Hinterlüftung der NNO-Außenwand gemessenen Außenlufttemperaturen im Jahresmittel um 1,6K bis 2,3K über den Werten der EnEV2014 sowie im monatlichen Mittel bis auf März 2013 immer höher als die Vergleichswerte der EnEV2014. Dies ist konform mit den Wetteraufzeichnungen der Wetterstation Berlin-Tegel, siehe [24] und TABELLE 7.2-2. Die Lufttemperaturen der nachfolgend aufgeführten Winter- und Sommerperioden der Wetterstation in Berlin-Tegel [24] sind wärmer als der dortige Durchschnitt aus den Jahren 1981 bis 2010. Die Klammerwerte weisen diese Temperaturerhöhungen aus:

- Winter: 2011/12 (+0,4°), 2013/14 (+2,4°), 2014/15 (+1,4°) und 2015/16 (+2,6°)
- Sommer: 2013 (+0,9°), 2014 (+0,3°), 2015 (+1,2°) und 2016 (+0,8°)

Der Kriechkeller wurde nahe dem mit Sensoren ausgerüsteten Bodengefach (BILD 9-2) untersucht und ist gut hinterlüftet. Der Feuchtegehalt der Luft liegt im Bereich des Feuchtegehaltes in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand. Materialfeuchtemessungen an Fichteproben, die innenseitig auf der äußeren Gefachbeplankung (zementgebundene Faserplatte) befestigt sind, weisen niedrige Werte zwischen 9M-% bis 12M-% auf, siehe BILD 9-46. An den außenseitigen Kerto-Stegen der TJI-Träger wurden kompatible Materialfeuchten zwischen 7,9M-% und 12,9M-% gemessen, siehe BILD 9-47 und BILD 9-48. Die absolute Feuchtigkeit der Luft in der Zellulosedämmung des Bodengefaches lag 2012 unter den Werten für das Flachdach, siehe BILD 7-51. Im Messbereich der Bodenplatte wurden keine kritischen hygrothermischen Bedingungen festgestellt. Anhand der vorliegenden Messergebnisse kann der in [10] für Deutschland empfohlene und am Effizienzhaus umgesetzte Belüftungsquerschnitt von 10-20cm²/m² Grundfläche in den Streifenfundamenten der Kriechkeller als geeignet bestätigt werden.

Innerhalb des Untersuchungszeitraumes lagen mit 2013 und 2015 zwei der zehn heißesten Sommer seit Beginn der Messaufzeichnungen. Trotz permanenter Querlüftung in den Nutzungszeiten als öffentliche Ausstellung kam es zu 1840 und ca. 2300 Übertemperatur-Gradstunden und damit zu einer 53% und 91% Überschreitung der tolerierten 1200 Übertemperatur-Gradstunden. Über jeweils ca. 1 Woche lagen die Innenraumtemperaturen im Bereich von 26° bis maximal 35°C und kühlten auch nachts nicht unter 26°C ab. Die Übertemperatur-Gradstunden der Sommer 2012 und 2014 lagen unter einem Wert von 500 Gradstunden. In Heißwetterphasen blieben auch 2014 die nächtlichen Innenraumtemperaturen über 26°C.

Neben der sommerlichen Innenraum-Überhitzung als Behaglichkeitskriterium kam es im März 2013 zu einem Monatsmittelwert von 29% relativer Luftfeuchte. Diese niedrigen Raumluftfeuchten wurden durch Einstellungen und Nachrüstungen an der Lüftungsanlage in den Folgejahren vermieden.

Lagen die täglichen maximalen Außenlufttemperaturen in der Hinterlüftung der NNO-Außenwand höher als 25°C, dann führte dies zu ganztägigen Innenraumtemperaturen von >26°C. Anhand der über vier Sommer aufgenommenen Messwerte von 2012 bis 2015 wird aufgezeigt, dass für diese Bauweise und Fassadengestaltung in Berlin sowie an vergleichbaren Standorten in den Sommermonaten Juli und August mit hohen Bauteiltemperaturen und einem signifikanten Einfluss auf die Überhitzung der Innenräume gerechnet werden muss. Die Messergebnisse in Abschnitt 7.6 verdeutlichen:

- Die Wärmeeinträge über das Dach im Bereich der PV-Elemente haben, gefolgt vom Dach außerhalb der PV-Elemente und der SSW-Außenwand, den höchsten Einfluss auf die sommerliche Überhitzung.
- Der größere Anteil der SSW-Außenwand im Vergleich zur NNO-Außenwand an der Überhitzung des Innenraums wird durch die wärmeren Innenraumseiten der Holztafelwände an der SSW-Außenwand im Vergleich zur NNO-Außenwand sowie den höheren Temperaturen der SSW-Wand in halber Gefach-Dämmstoffdicke $T_{WD-d/2}$ in den Hitzeperioden nachgewiesen.
- In der Bodenplatte über dem Kriechkeller liegen in der warmen Jahreszeit niedrigere Temperaturen als in der NNO-Hinterlüftungsebene vor. Der Kriechkeller mindert die sommerliche Überhitzung.

Im Vergleich der Bauteile Dach, Bodenplatte und opake Außenwände wurden die höchsten Aufheizungen der außenseitigen Gefachbeplankungen im Bereich der Dach-Photovoltaikenelemente festgestellt. Die Monatsmitteltemperaturen im Dach außerhalb der PV-Elemente lagen im Juni 2013 und im Juni 2014 jeweils um 3,5 Kelvin niedriger und die Maximalwerte um bis zu 12 Kelvin niedriger. Es wurden Höchsttemperaturen von nahezu 60°C ca. 90mm unterhalb der Gefächdämmung gemessen.

Die aus Messwerten ermittelten effektiven U-Werte zeigen für die Jahre 2012 bis 2014, dass während der Gebäudenutzung der geplante Wärmedämmstandard in je einem Regelgefach der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand erreicht wurde.

Ein Schwerpunkt dieses Feldexperimentes lag im Nachweis von natürlicher Konvektion in der hochgedämmten Zellulose-Gefachdämmung der Außenwände und dem daraus resultierenden Wärme- und Feuchtetransport. Ziel waren Kompatibilitätsnachweise zu bisherigen Laborversuchen an maßstäblichen Versuchswänden in einer Doppelklimakammer ([4],[5],[6]). Für die Erfassung der Randbedingungen wurde die Temperaturdifferenz zwischen der inneren und äußeren Gefachbeplankung der Gefachdämmung für die Jahre 2012 bis 2015 ausgewertet. In den Wintermonaten lagen diese Temperaturdifferenzen nur vereinzelt über 20 Kelvin. Voruntersuchungen [4] zeigen, dass ein maßgeblicher Feuchtetransport durch natürliche Konvektion in Gefachdämmungen erst bei über 20 Kelvin Temperaturdifferenz über zusammenhängend mindestens 15 Tage nachweisbar ist. Je höher die Lufttemperaturdifferenz im Winter und je diffusionsoffener die Bauweise, desto größere Feuchteumverteilungen durch natürliche Konvektion nach BILD 4-1 sind nachweisbar. Das untersuchte Außenwandgefach weist mit einem s_{di} -Wert von >100m raumseitig einen hohen Diffusionswiderstand auf. Bedingt durch die warmen Wintermonate, die geringe Feuchtelast der Innenräume und die Bauweise mit gedämmter raumseitiger Installationsebene sowie hinterlüfteter Fassade mit PV- oder schwarzen Glaspaneelen ist ein für natürliche Konvektion in der Gefachdämmung typisches Feuchteprofil nur marginal feststellbar, siehe Abschnitt 7.9.1 und Abschnitt 7.9.2.

Die Materialfeuchten der außenseitigen Gefachbeplankungen lagen zu jedem Zeitpunkt der Untersuchungen unter den kritischen Grenzwerten von 18M.-% bis 21M.-%. Ein Befall mit

Schimmelpilzen, Hefen und Bakterien wurde nur 2012 an der untersuchten NNO-Außenwand mikrobiologisch nachgewiesen. Optisch war dieser Befall bei der Entnahme der Proben an einem sommerlich warmen Apriltag kaum erkennbar. Die mikrobiologischen Untersuchungen in den darauffolgenden drei Jahren zeigten zum Zeitpunkt der Öffnung der NNO-Fassade keinen erneuten aktiven Befall. Die dunkle Oberfläche der Vorhangfassade sorgt durch Strahlungsaustausch neben der Oberflächentemperaturerwärmung für einen schnellen Trocknungsprozess bei anfallendem Tau- und Oberflächenwasser. Diese Messergebnisse werden durch Berechnungen mit wufi pro V.5 bestätigt. Bei einer hellen Oberfläche des Wandaufbaus der NNO-Außenwand kann es nach vergleichenden wufi-Berechnungen zu einer zeitweiligen Überschreitung der kritischen Materialfeuchte in der außenseitigen Gefachbeplankung kommen, die jedoch in den Sommermonaten wieder austrocknet. Ein Feuchteschadensrisiko für diese NNO-Außenwand wird damit ausgeschlossen.

In der NNO-Außenwand-Gefachdämmung konnte für kalte Wintertage mit Temperaturdifferenzen von >25K zwischen der Innen- und Außenseite der Dämmung ein für die natürliche Konvektion typisches Temperaturprofil über die Höhe in halber Dämmstoffdicke nachgewiesen werden, welches zu bisherigen Untersuchungsergebnissen kompatibel ist und im Vergleich zu anderen Dämmmaterialien eine geringe Ausprägung hat. Messungen der Temperatur und der relativen Luftfeuchte im Abstand von 35mm von der Dämmstoffaußenseite zeigen, dass in dieser Schicht keine signifikanten hygrothermischen Bedingungen für Schimmelpilzsporeneimung oder für Schimmelpilzmyzelwachstum im Untersuchungszeitraum gegeben waren.

Zudem wurde das hygrothermische Verhalten der opaken Bauteile NNO-Außenwand, SSW-Außenwand, Bodenplatte, Dachplatte im und außerhalb des Bereiches von PV-Elementen vergleichend untersucht. Der Fokus lag hierbei auf der Materialfeuchte der außenseitigen Gefachbeplankung (OSB4 und über dem Kriechkeller eine Holzzementplatte) sowie auf dem zeitlichen Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte in der Gefachdämmung nahe der Außenseite (35mm Abstand in der SSW- und NNO-Außenwand sowie 5mm Abstand im Dach und in der Bodenplatte). Zu keinem Zeitpunkt zwischen Dezember 2011 und Oktober 2016 lagen die Materialfeuchten der außenseitigen OSB4-Platten oder der Holzzementplatte über den zulässigen Grenzwerten zur Vermeidung von Feuchteschäden. Im Jahresmittel wiesen alle untersuchten Gefache trockene Außenbeplankungen auf, was kompatibel zu den optischen Beobachtungen beim kurzzeitigen Öffnen der NNO-Fassade ist. In allen OSB4-Platten der Außenwände verringerte sich der Jahresmittelwert der Materialfeuchte über den Messzeitraum von 5 Jahren betrachtet. In den zwei untersuchten Dachgefachen (innerhalb und außerhalb der PV-Elemente) stieg die an sich niedrige Materialfeuchte über die Jahre 2011 bis 2016 langsam an. Hygrothermische Bedingungen für Schimmelpilzsporeneimung oder für Schimmelpilzmyzelwachstum wurden in den untersuchten Gefachen in der SSW-Außenwand, in der Bodenplatte und im Dach über eine ausreichend lange Mindest-Sporenauskeimzeit nicht festgestellt.

Die Ergebnisse dieses messtechnischen Monitorings weisen auf eine hohe hygrothermische Dauerbeständigkeit der opaken Außenbauteile des Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität in der Fasanenstraße / Berlin-Charlottenburg hin. Es wird für zünftige Bauprojekte mit „Effizienzhaus Plus“-Standard empfohlen, die Wohnbehaglichkeit in sommerlichen Hitzeperioden zu untersuchen und zu verbessern.

Literatur und weitere Quellen

- [1] BMVBS (Hrsg.)(2012): Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität – Technische Informationen und Details. Broschüre des BMVBS. www.bmvbs.de
- [2] BMUB (Hrsg.)(2014): Wege zum Effizienzhaus Plus. 3.Auflage, Broschüre des BMUB. www.bmub.de
- [3] <http://www.effizienzhaus-plus.info/begriffserklarungen/> (Stand: 30.07.2015)
- [4] Riesner, K. (2003): Natürliche Konvektion in losen Außenwanddämmungen – Untersuchungen zum gekoppelten Wärme-, Luft- und Feuchtetransport. Rostock. Universität. Fakultät für Ingenieurwissenschaften. Dissertation. 2003. veröffentlicht in Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen. – Rostock: Univ. Rostock. Ingenieurwiss. Fak.. FB Bauingenieurwesen. Heft 12. 378 S.
- [5] Riesner, K./ Hagentoft, C.-E./ Mainka, G.-W. (2004): Condensation Risk within Loose Fill Vertical Insulated Cavities due to Natural Convection. Proceedings of the 9th conference „Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings“ v. 02.12.-06.12.2004. Clearwater Beach. Florida / USA
- [6] Riesner K. (2009): Vermeidungsstrategien für Tauwasser- und Schimmelpilzrisiken in Außenwandgefachen verursacht durch natürliche Konvektion in der Dämmung. Abschlussbericht der Univ. Rostock für das BBR-Forschungsprojekt Z6-10.07.03-05.19 / II13-800105-19. IRB-Verlag. Stuttgart. F2547. ISBN 978-3-8167-8396-1
- [7] Werner Sobeck WS Green Technologies (2011): Wärmeschutz der Bauteile (Stand: 27.06.2011), unveröffentlicht
- [8] Holzhaus Merkle GmbH (2011): bereitgestellte Produktdatenblätter der in den Bauteilen verbauten Bauprodukte (unveröffentlicht)
- [9] Krätschell, M. (2012): Diagnose der thermischen Gebrauchstauglichkeit – Grundlagen, Einführung, Hinweise. In: Fouad, N. A. (Hrsg.): Bauphysikkalender 2012. Gebäuediagnostik. Berlin. S. 477-503.
- [10] Winter, St. / Bauer, P. / Werther, N. (2008): Untersuchung der klimatischen Verhältnisse in Kriechkellern unter gedämmten Holzbodenplatten zur Vermeidung von Bauschäden bei nicht unterkellerten Gebäuden und zur Kostenreduzierung. Abschlussbericht. Fraunhofer IRB Verlag, 2008, ISBN: 978-3-8167-7921-6
- [11] Hildebrand, K. (2006): Luftbefeuchtung im Kontext mit nationalen und internationalen Standards. In: Tagungsband der 3. Schweizer Hygienetagung am 23.01.2015 in Luzern. www.swki.ch/hygienetagung2015
- [12] von Guten, D./ Hildebrand, K (2015): Literaturrecherche zum Thema „Raumluftfeuchte“. Anhang zum Tagungsband der 3. Schweizer Hygienetagung am 23.01.2015 in Luzern. www.swki.ch/hygienetagung2015
- [13] Erhorn, H./ Bergmann, A./ Beckert, M./ Reiß, J./ Hegner, H.-D. (2013): Messtechnische und energetische Validierung des BMVBS-Effizienzhaus Plus in Berlin. Messperiode März 2012 bis Februar 2013. IBP-Kurzbericht v. 10.03.2013. 18 Seiten (unveröffentlicht)
- [14] Erhorn, H./ Bergmann, A./ Beckert, M./ Reiß, J./ Hegner, H.-D. (2013): Messtechnische und energetische Validierung des BMVBS-Effizienzhaus Plus in Berlin. Messperiode März 2012 bis Februar 2013. In: Bauphysik, H.3, S.162-171
- [15] L. Koss / N. Lesnych (2013): Messungen an unterschiedlich klimatisch belasteten Materialproben zur Kalibrierung von elektrischen Widerstandsmessungen. Dahlberg-Institut e.V.. Prüfbericht 05-2013 (unveröffentlicht)
- [16] Winter, St./ Gamper, A. /Dietsch, Ph./ Merk, M. (2012): Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtgradienten in Holzbauteilen. Abschlussbericht der TU München für das BBR-Forschungsprojekt SF-10.08.18.7-10.1 / II 2-F20-09-1-259.

- [17] Du, P.Q. / Geissen, A./ Noack, D. (1991): Die Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 49 (1991), S.1-6
- [18] Riesner, K./ Mainka, G.-W. (2006): IR-Thermografie zur thermischen Bauabnahme und Diagnostik – Möglichkeiten und Grenzen. In: H.Venzmer (Hrsg.): Messen & Sanieren. Vorträge der 17. Hanseatischen Sanierungstage im November 2006 in Kühlungsborn. Berlin. S. 125-141
- [19] Riesner, K. (2012): Thermografiebericht zum Nachweis des Wärmeschutzes der Gebäudehülle im Bereich von Messfühlern am Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität in 10623 Berlin, Fasanenstraße, Messung am 19.12.2011 (unveröffentlicht)
- [20] Heiselberg, P. (2014): Ventilative Cooling. IEA EBC Annex 62-Präsentation auf dem IEA-EBC Technical Day am 10.06.2014 in Rostock-Warnemünde (unveröffentlicht)
- [21] Lengsfeld, K./ Holm, A. (2009): Energieoptimiertes Bauen; Beurteilung der instationären hygrothermischen Vorgänge in Gebäuden – Deutsche Beteiligung an IEA-ECBXS- Annex 41: Whole building heat, air and moisture response „Moist-Eng“. IBP-Bericht RKB 10/2009/292
- [22] Messal, C. (2012): Prüfbericht 20120507-1 zur Untersuchung von 10 Stück Abklatschproben von der NNO-Außenwand des Effizienzhaus Plus (Berlin) auf Schimmelpilzbefall, 3 Seiten (unveröffentlicht, durchgeführt von der Fa. MICOR GmbH)
- [23] Messal, C (2013): Prüfbericht 20130531-1 zur Untersuchung von 17 Klebefilmproben, 17 Stück Abklatschproben und 7 Stück Materialproben von der NNO-Außenwand des Effizienzhaus Plus (Berlin) auf Schimmelpilzbefall, 3 Seiten und 10 Seiten Anlagen mit Fotos (unveröffentlicht, durchgeführt von der Fa. MICOR GmbH)
- [24] <http://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/monatswerte-station.asp>
- [25] Sedlbauer, K. (2001): Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Stuttgart, Universität, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss., 2001

NORMEN UND ANDERE REGELWERKE

- [26] DIN 4108 Teil 2 – Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Beuth-Verlag, Berlin (2013-02)
- [27] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: Simulation of heat and moisture transfer. Hrsg.: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA-, Referat 6 Physikalisch-Chemische Grundlagen, München, 2004, 16 Seiten
- [28] DIN EN 15251: Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007. Beuth-Verlag, Berlin (2012-12)
- [29] SIA 180:2014 – Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden
- [30] DIN EN ISO 12570: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur. Beuth-Verlag, Berlin (2013-09)

SOFTWARE

- [31] WUFI®plus THERM, Version 2.5.4.0
- [32] Wufi pro Version 5, www.wufi.de

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 3-1	Das „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität in Berlin“ – Foto und Übersichtszeichnungen	8
Bild 4-1	Auswirkungen von natürlicher Konvektion auf das Temperatur- und Materialfeuchtefeld in offenporigen Außenwanddämmungen [4], [6]	11
Bild 4-2	Kriechkeller in der Bauphase und nach Gebäudefertigstellung – Lüftungsöffnungen in den Streifenfundamenten	12
Bild 5-1	Übersichtszeichnung zur Anordnung von messfühlern in Bauteilen des Erdgeschosses, der Lage der Messkabel im Fußboden Erdgeschoss und der Lage der Datenlogger	14
Bild 5-2	Vereinfachtes Temperaturfeld-Modell für die Außenwand-Gefachdämmung mit den sich überlagernden Wärmetransportanteilen Wärmeleitung und natürliche Konvektion	16
Bild 6-1	Übersichtszeichnung zur Anordnung von „Entnahmestellen“ in den außenseitigen Gefachbepankungen in der NNO-Außenwand des Erdgeschosses	20
Bild 6-2	Übersichtszeichnungen A) zur Anordnung von Temperaturfühlern in der Gefachdämmung und B) zur Anordnung von Fühlern zur Messung der relativen Luftfeuchte und der Temperatur in der Gefachdämmung	20
Bild 6-3	a) Temperaturfühler im Dämmstoff, B) der kapazitiven Luftfeuchtefühler (Schutzvlies gegen Staub) im Dämmstoff, c) Fühler am Fußpunkt von Gefach Nr. 5 der NNO-Außenwand - A) und B) in lage gehalten an gespanntem Faden	22
Bild 6-4	Fotos zur Bauweise und anordnung der elektroden zur Materialfeuchtemessung in OSB-Platten und in Fichtenholz (a, b) sowie zur Lage der zugeordneten NTC-Fühler zur Temperaturmessung (c)	23
Bild 6-5	Prinzipskizze und Fotos zum Aufbau einer Messeinheit zur Datenerfassung, Datenspeicherung und Datenfernübertragung für 8 Materialfeuchtemesstellen und 8 NTC-Temperaturfühler	23
Bild 6-6	Übersichtszeichnungen zur Anordnung von Einschlagelektroden in die außenseitige OSB-Platte und in Fichtenholz-Adapter von Gefach Nr. 5 der NNO-Außenwand sowie zur Anordnung der zugeordneten Temperaturfühler zwecks Temperaturkompensation der Widerstandsmessung	24
Bild 6-7	Fotos zur Bauweise und anordnung der Messfühler im Bodengefach: a) Einschlag-elektroden in Kerto-Gurt und zugehöriger Temperaturfühler zur Temperatur-kompensation der Materialfeuchte, B) Einschlagelektroden in Fichtenholz, c) Überblick über die Lage der Messfühler	27
Bild 6-8	Übersichtszeichnung Grundriss Obergeschoss mit Kennzeichnung der Lage von Gefachen mit installierten Messfühlern in der Dachplatte	28
Bild 6-9	Fotos zur Bauweise und anordnung der Messfühler in der Dachplatte a) Übersicht, b) Einschlagelektroden und zugehörige Temperaturfühler zur Temperaturkompensation der Materialfeuchte in der außenseitigen OSB-Platte im traufnahen Bereich ohne PV-Module B) dto., zudem mit Oberflächentemperaturfühler zur Temperatur-kompensation der Materialfeuchte – alle Messfühler im Bereich von PV-Modulen	28
Bild 7-1	IR-Thermogramme und zugeordnete Fotos von der NNO-Außenwand im Erdgeschoss bei natürlichem Luftdruck im Gebäude mit Kennzeichnung von Gefach 5 mit Messfühlern ...	29
Bild 7-2	IR-Thermogramme und zugeordnete Fotos von der SSW-Außenwand im Erdgeschoss bei natürlichem Luftdruck im Gebäude und bei 40 PA Unterdruck im Gebäude mit Kennzeichnung von Gefach 5 mit Messfühlern	29

Bild 7-3	Gemessene monatliche Außenlufttemperaturen in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand von 2012 bis 2013 und Bezug zu den Daten der EnEV 2014 sowie der Wetterstation Berlin-Tegel.....	30
Bild 7-4	Gemessene monatliche Außenlufttemperaturen in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand von 2014 bis 2015 und Bezug zu den Daten der EnEV 2014 sowie der Wetterstation Berlin-Tegel.....	31
Bild 7-5	Gemessene Temperaturen und relative Luftfeuchten im Kriechkeller vom 20.04.2012 bis 31.12.2012.....	32
Bild 7-6	Gemessene Temperaturen und relative Luftfeuchten im Kriechkeller von 2013.....	33
Bild 7-7	Gemessene Temperaturen und relative Luftfeuchten im Kriechkeller von 2014.....	33
Bild 7-8	Gemessene Temperaturen und relative Luftfeuchten im Kriechkeller von 2015.....	33
Bild 7-9	Gemessene Raumlufthtemperaturen im Wohnraum und zugeordnete Außenlufttemperaturen in der Hinterlüftungsebene der NNO-Wand vom 1. Mai bis 30. August 2012.....	34
Bild 7-10	Gemessene Raumlufthtemperaturen im Wohnraum und zugeordnete Außenlufttemperaturen in der Hinterlüftungsebene der NNO-Wand vom 25. Juli bis 01. August 2012.....	35
Bild 7-11	Gemessene Raumlufthtemperaturen im Wohnraum in 2013: vom 01. 05.-31.08.13 und vom 18.06.-25.06.13.....	35
Bild 7-12	Gemessene Raumlufthtemperaturen im Wohnraum in 2014: vom 01. 05.-30.08.14 und vom 18.07.-25.07.14.....	35
Bild 7-13	Gemessene Raumlufthtemperaturen im Wohnraum sowie gemessene Außenlufttemperaturen in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand für 2015: vom 01. 05.-31.08. und vom 01.07.-08.07.2015.....	36
Bild 7-14	Gemessene Innenlufttemperaturen und relative Luftfeuchten im Wohnraum für März 2015 und für September 2014.....	39
Bild 7-15	Lufttemperaturdifferenzen aus den gemessenen Temperaturen vom Innenraum (Tr4) und der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand für 2012 und 2013.....	39
Bild 7-16	Lufttemperaturdifferenzen aus den gemessenen Temperaturen vom Innenraum (Tr4) und der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand für 2014 und 2015.....	40
Bild 7-17	Monatliche Mittelwerte der Temperaturdifferenzen zwischen innen- und außenseitiger OSB-Bepankung der Gefachdämmung von 2012 bis 2015, für die NNO-Außenwand.....	41
Bild 7-18	Monatliche Mittelwerte der Temperaturdifferenzen zwischen innen- und außenseitiger OSB-Bepankung der Gefachdämmung von 2012 bis 2015, für die SSW-Außenwand.....	41
Bild 7-19	Temperaturdifferenz zwischen NNO-Außenwand und SSW-Außenwand zu den monatlichen Mittelwerten der Temperaturdifferenzen von äußeren und innerer OSB-Bepankung der Gefachdämmung $\Delta T_{OSB,i - OSB,e (NNO)} - \Delta T_{OSB,i - OSB,e (SSW)}$	42
Bild 7-20	Lage der Temperatursensoren für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes.....	43
Bild 7-21	Gemessene Temperaturen über den Querschnitt der NNO- und SSW-Außenwand im Juli 2013.....	43
Bild 7-22	Gemessene Temperaturen über den Querschnitt der NNO- und SSW-Außenwand im August 2013.....	44
Bild 7-23	Gemessene Temperaturen über den Querschnitt der NNO- und SSW-Außenwand im Juli 2014.....	44
Bild 7-24	Gemessene Temperaturen über den Querschnitt der NNO- und SSW-Außenwand im August 2014.....	44

Bild 7-25	Gemessene Temperaturen über den Querschnitt der NNO- und SSW-Außenwand im Juli 2015.....	45
Bild 7-26	Gemessene Temperaturen über den Querschnitt der NNO- und SSW-Außenwand im August 2015.....	45
Bild 7-27	Gemessene Temperaturen innerhalb der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand im August 2013 und 2015	45
Bild 7-28	Gemessene Temperaturen nahe den Schichtgrenzen der außenseitigen OSB-Platten der NNO- und SSW-Außenwand, der Bodenplatte (über dem Kriechkeller: zementgebundene Spanplatte) und im Dach im Juli 2015	46
Bild 7-29	Gemessene Temperaturen nahe den Schichtgrenzen der außenseitigen OSB-Platten der NNO- und SSW-Außenwand, der Bodenplatte (über dem Kriechkeller: zementgebundene Spanplatte) und im Dach im Juli 2015	47
Bild 7-30	Gemessene Temperaturen nahe den Schichtgrenzen der außenseitigen OSB-Platten der NNO- und SSW-Außenwand, der Bodenplatte (über dem Kriechkeller: zementgebundene Spanplatte) und im Dach im Juli 2015	47
Bild 7-31	Temperaturen innerhalb der Gefachdämmung der Außenbauteile, gemessen im Abstand von 5mm zur außenseitigen Gefachbeplankung: 1.-5. August 2013 und vom 1.-7. Juli 2015	48
Bild 7-32	Temperaturen innerhalb der Gefachdämmung der Außenbauteile, gemessen im Abstand von 5mm zur außenseitigen Gefachbeplankung: Juli und August 2015	48
Bild 7-33	Gemessene Temperaturen an der Schichtgrenze der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand, SSW-Außenwand, im Dach (außerhalb des Bereiches der PV-Elemente) und in der Bodenplatte über dem Kriechkeller von Juli bis August 2012	49
Bild 7-34	Gemessene Temperaturen an der Schichtgrenze der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand, SSW-Außenwand, im Dach (außerhalb des Bereiches der PV-Elemente) und in der Bodenplatte über dem Kriechkeller von Juli bis August 2013	49
Bild 7-35	Gemessene Temperaturen an der Schichtgrenze der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand, SSW-Außenwand, im Dach (außerhalb des Bereiches der PV-Elemente) und in der Bodenplatte über dem Kriechkeller von Juli bis August 2014	49
Bild 7-36	Gemessene Temperaturen an der Schichtgrenze der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand, SSW-Außenwand, im Dach (außerhalb des Bereiches der PV-Elemente) und in der Bodenplatte über dem Kriechkeller von Juli bis August 2015	50
Bild 7-37	Monatliche Maximalwerte der gemessenen Temperaturen innerhalb der Gefachdämmung der Außenbauteile Außenwand, Boden und Dach mit 5mm Abstand zur außenseitigen Gefachbeplankung für 2013	50
Bild 7-38	Monatliche Mittelwerte der gemessenen Temperaturen innerhalb der Gefachdämmung der Außenbauteile Außenwand, Boden und Dach mit 5mm Abstand zur außenseitigen Gefachbeplankung für 2013	50
Bild 7-39	Gemessene Maximalwerte der Temperatur im Dämmstoff im Abstand von 5mm von der außenseitigen Gefachbeplankung im Dach, im und außerhalb des Bereiches der PV-elemente, in der Bodenplatte sowie die Außenlufttemperatur für 2012 und 2013	51
Bild 7-40	Gemessene maximalwerte der Temperatur im Dämmstoff im Abstand von 5mm von der außenseitigen Gefachbeplankung im Dach, im und außerhalb des Bereiches der PV-elemente, in der Bodenplatte sowie die Außenlufttemperatur für 2014 und 2015.....	51
Bild 7-41	Messwerte zur Materialfeuchte in der außenseitigen OSB-Gefachbeplankung der NNO-Außenwand (EG) von 2012.....	54

Bild 7-42	Messwerte zur Materialfeuchte in der außenseitigen OSB-Gefachbeplankung der SSW-Außenwand (EG) von 2012.....	54
Bild 7-43	Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit WUFI pro 5.0 zur Materialfeuchte der außenseitigen Holztafelbeplankungen mit OSB4 (Gefache 3, 4 und 5) und einer diffusionsoffenen Holzweichfaserplatte (Gefache 1 und 2) bei unterschiedlichen s_{di} - und s_{de} -Werten der Außenwandgefache.....	55
Bild 7-44	Fotos einzelner Entnahmeprobe in den außenseitigen Gefachbeplankungen in der NNO-Außenwand des Erdgeschosses bei der Öffnung der Fassade am 27.04.2012	56
Bild 7-45	Temperaturen in halber Gefachdämmdicke in verschiedenen Höhen für die Darstellung eines für natürliche Konvektion typischen Temperaturverlaufes über die Höhe: Messwerte vom 31.01.2012 und vom 03.02.2012 sowie Darstellung des Einflusses von Wärmebrücken aus Wärmeleitung	58
Bild 7-46	Temperaturen in halber Gefachdämmdicke in verschiedenen Höhen für die Darstellung eines für natürliche Konvektion typischen Temperaturverlaufes über die Höhe: Messwerte vom 24.01.2015 und vom 22.01.2016 sowie Darstellung des Einflusses von Wärmebrücken aus Wärmeleitung	58
Bild 7-47	Gemessene monatliche Mittelwerte der absoluten Feuchtigkeit der Luft im Dämmstoff im Abstand von 35mm von der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand für 2012	59
Bild 7-48	Gemessene monatliche Mittelwerte der absoluten Feuchtigkeit der Luft im Dämmstoff im Abstand von 35mm von der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand für 2013	59
Bild 7-49	Gemessene monatliche Mittelwerte der absoluten Feuchtigkeit der Luft im Dämmstoff im Abstand von 35mm von der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand für 2014	60
Bild 7-50	Gemessene monatliche Mittelwerte der absoluten Feuchtigkeit der Luft im Dämmstoff im Abstand von 35mm von der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand für 2015	60
Bild 7-51	Monatliche Mittelwerte Gemessener maximalwerte der Temperatur im Dämmstoff im Abstand von 5mm von der außenseitigen Gefachbeplankung der außenbauteile sowie der monatlichen Mittelwerte der absoluten Feuchtigkeit in der Luft der Zellulose-Gefachdämmung für 2012	63
Bild 9-1	Grundriss Erdgeschoss mit der Lage der Gefache in der NNO-Außenwand und der SSW-Außenwand mit Messfühlern sowie mit der Lage der Messkabel im Fußboden.....	78
Bild 9-2	Holztafel-Elemente Bodenplatte (Zeichnung von Fa. Merkle GmbH, Bissingen) und Lage des untersuchten Gefaches mit Messfühlern	79
Bild 9-3	Lage der Messfühler und Messkabel im untersuchten Gefach der Bodenplatte über dem Kriechkeller.....	80
Bild 9-4	Lage der Messfühler und Messkabel in der Wandplatte der NNO-Außenwand (Wohnbereich EG)	81
Bild 9-5	Lage der Messfühler und Messkabel in der Wandplatte der NNO-Außenwand (Wohnbereich EG) - Detail.....	82
Bild 9-6	Lage der Messfühler und Messkabel in der Wandplatte der SSW-Außenwand (Wohnbereich EG)	83
Bild 9-7	Lage der Messfühler und Messkabel in der Wandplatte der SSW-Außenwand (Wohnbereich EG) - Detail.....	84

Bild 9-8	Lage der Messfühler und Messkabel in der Wandplatte über der Decke des 1. OG (Dach, Wohnbereich).....	85
Bild 9-9	Lage der Messfühler und Messkabel in der Wandplatte über der Decke des 1. OG (Dach, Wohnbereich) - Detail	86
Bild 9-10	Labormessungen zur Bestimmung der Materialfeuchte aus dem elektrischen Widerstand bei verschiedenen Klimabedingungen – Vorkonditionierung im Klimaschrank und Wägungen zur Ermittlung der Materialfeuchte bei Massekonstanz und anschließenden Leitfähigkeitsmessungen an den Einschlagelektroden	87
Bild 9-11	Experimentell ermittelte Beziehung zwischen dem elektrischen Widerstand und der Materialfeuchte an Fichte (quer zur Faser) bei Temperaturen von 23°C und von 0°C.....	88
Bild 9-12	Experimentell ermittelte Beziehung zwischen dem elektrischen Widerstand und der Materialfeuchte an OSB bei Temperaturen von 23°C und von 0°C	89
Bild 9-13	Experimentell ermittelte Beziehung zwischen dem elektrischen Widerstand und der Materialfeuchte an Furnierschichtholz (Kerto) quer zur Faser bei Temperaturen von 23°C und von 0°C	89
Bild 9-14	Experimentell ermittelte Beziehung zwischen dem elektrischen Widerstand und der Materialfeuchte an Furnierschichtholz (Kerto) längs zur Faser bei Temperaturen von 23°C und von 0°C	90
Bild 9-15	Kurzzeitige Demontage einzelner Glasfassadenelemente der Vorhangfassade an der NNO-Außenwand für Untersuchungen an der Schichtgrenze Gefachbeplankung / Zellulose-Gefachdämmung an 5 Gefachen.....	91
Bild 9-16	Zustand der Schichtgrenze Gefachdämmung / außenseitige Gefachbeplankung an Gefach 1 und 2 am 27.04.2012.....	91
Bild 9-17	Zustand der Schichtgrenze Gefachdämmung / außenseitige Gefachbeplankung an Gefach 3 und 4 am 27.04.2012.....	91
Bild 9-18	Zustand der Schichtgrenze Gefachdämmung / außenseitige Gefachbeplankung an Gefach 5 oben rechts am 27.04.2012 und Abmessungen der Entnahmeprobe aus der Gefachbeplankung	92
Bild 9-19	Höchst- und Tiefsttemperaturen vor und während der Ortsbesichtigung am 27.04.2012 (Quelle: www.wetteronline.de)	92
Bild 9-20	Temperaturen und relative Luftfeuchten der Sensoren 0-TRHNo und 1-TRHNo in der Dämmung von Gefach Nummer 5 der NNO-Außenwand im April 2012	92
Bild 9-21	Zustand der Schichtgrenze Gefachdämmung / außenseitige Gefachbeplankung an Gefach 1 und 2 am 24.01.2013.....	92
Bild 9-22	Zustand der Schichtgrenze Gefachdämmung / außenseitige Gefachbeplankung an Gefach 3 und 4 am 24.01.2013.....	93
Bild 9-23	Zustand der Schichtgrenze Gefachdämmung / außenseitige Gefachbeplankung an Gefach 5 oben rechts am 24.01.2013 und Abmessungen der Entnahmeprobe aus der Gefachbeplankung	93
Bild 9-24	Höchst- und Tiefsttemperaturen vor und während der Ortsbesichtigung am 24.01.2013 (Quelle: www.wetteronline.de)	93
Bild 9-25	Temperaturen und relative Luftfeuchten der Sensoren 0-TRHNo und 1-TRHNo in der Dämmung von Gefach Nummer 5 der NNO-Außenwand im Januar 2013.....	93
Bild 9-26	Nachsackung der Dämmung um ca. 10mm in Gefach 4, aufgenommen am 18.04.2013...	94
Bild 9-27	Nachsackung in der Dämmung von Gefach 1 und Gefach 4, aufgenommen am 03.04.2015	94

Bild 9-28	Gemessene Temperaturen und relative Luftfeuchten in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand von 2012	96
Bild 9-29	Gemessene Temperaturen und relative Luftfeuchten in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand von 2013	96
Bild 9-30	Gemessene Temperaturen und relative Luftfeuchten in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand von 2014	96
Bild 9-31	Gemessene Temperaturen und relative Luftfeuchten in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand von 2015	97
Bild 9-32	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand / Erdgeschoss für Dezember 2011 (Einbau) und für 2012.....	98
Bild 9-33	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand / Erdgeschoss für 2013 und 2014.	98
Bild 9-34	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der NNO-Außenwand / Erdgeschoss für 2015 und vom 1.1.-06.10. 2016	98
Bild 9-35	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der SSW-Außenwand / Erdgeschoss für Dezember 2011 (Einbau) und für 2012.....	99
Bild 9-36	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der SSW-Außenwand / Erdgeschoss für 2013 und 2014..	99
Bild 9-37	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der SSW-Außenwand / Erdgeschoss für 2015 und vom 1.1.-06.10. 2016	99
Bild 9-38	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte des Flachdaches im Bereich der PV-Elemente für Dezember 2011 (Einbau) und für 2012	100
Bild 9-39	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte des Flachdaches im Bereich der PV-Elemente für 2013 und 2014.....	100
Bild 9-40	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte des Flachdaches im Bereich der PV-Elemente für 2015 und 1.1.-06.10. 2016	100
Bild 9-41	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte des Flachdaches außerhalb der PV-Elemente für Dezember 2011 (Einbau) und für 2012	101
Bild 9-42	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte des Flachdaches außerhalb der PV-Elemente für 2013 und 2014.....	101
Bild 9-43	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte in der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte des Flachdaches außerhalb der PV-Elemente für 2015 und 1.1.-06.10. 2016	101
Bild 9-44	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte an der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte der Bodenplatte über dem	

	Kriechkeller für Dezember 2011 (Einbau) und für 2012 , Messwerte der Sensoren 6-BFF und 7-BTF	102
Bild 9-45	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte an der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte der Bodenplatte über dem Kriechkeller für 2013 und 2014, , Messwerte der Sensoren 6-BFF und 7-BTF.....	102
Bild 9-46	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte an der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte der Bodenplatte über dem Kriechkeller für 2015 und 1.1.-06.10. 2016, Messwerte der Sensoren 6-BFF und 7-BTF .	102
Bild 9-47	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte an der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte der Bodenplatte über dem Kriechkeller für Dezember 2011 (Einbau) und für 2012, Messwerte der Sensoren 7-BFK1 und 8-BTK-SW.....	103
Bild 9-48	Gemessene Materialfeuchten und Temperaturen als tägliche Mittelwerte an der außenseitigen Gefachbeplankung der Holztafelplatte der Bodenplatte über dem Kriechkeller für 2015 und 2016, Messwerte der Sensoren 7-BFK1 und 8-BTK-SW	103
Bild 9-49	Relative Luftfeuchten in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Januar bis August 2012	104
Bild 9-50	Relative Luftfeuchten in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von September bis Dezember 2012	105
Bild 9-51	Relative Luftfeuchten in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Januar bis April 2013.....	105
Bild 9-52	Relative Luftfeuchten in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Mai bis Dezember 2013	106
Bild 9-53	Relative Luftfeuchten in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Januar bis Juni 2014 und von November bis Dezember 2014.....	107
Bild 9-54	Relative Luftfeuchten in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Januar bis April 2015.....	108
Bild 9-55	Temperatur in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Januar 2012 bis April 2012 (zuzuordnen der relativen Luftfeuchte aus Abschnitt 9.4.3).	108
Bild 9-56	Temperatur in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Januar 2013 bis April 2013 (zuzuordnen der relativen Luftfeuchte aus Abschnitt 9.4.3).	109
Bild 9-57	Temperatur in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Januar 2014 bis April 2014 (zuzuordnen der relativen Luftfeuchte aus Abschnitt 9.4.3).	109
Bild 9-58	Temperatur in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Januar 2015 bis April 2015 (zuzuordnen der relativen Luftfeuchte aus Abschnitt 9.4.3).	110
Bild 9-59	Massebezogene absolute Luftfeuchte in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Januar 2012 bis April 2012	110
Bild 9-60	Massebezogene absolute Luftfeuchte in der Gefachdämmung der Außenwand, der Bodenpatte und des Daches von Mai 2012 bis Dezember 2012	111
Bild 9-61	Massebezogene absolute Luftfeuchte in der Gefachdämmung des Daches im Bereich der PV-Elemente und außerhalb davon im Januar 2012 und Juni 2013	112

9 Anhang

9.1 Untersuchte Bauteile mit der Lage und Bezeichnung von Messfühlern

TABELLE 9.1-1 SCHICHTENAUFBAU VON 5 UNTERSUCHTEN GEFACHEN IN DER NNO-AUßENWAND (VON INNEN NACH AUßEN) AUF BASIS VON FESTSTELLUNGEN VOR ORT SOWIE NACH [7] UND [8]

Bauteil	Aufbau / Material	Dicke (mm)	s _d -Wert (m)	U-Wert (W/m ² K)
NNO-Außen-Wand Gefach 4 und 5	Gipskartonbeplankung	12,5	0,1	0,10
	Installationsebene mit Thermo-Hanfdämmung	60,0	0,06	
	Dampfbremse aus PE-Verbundfolie	-	>100	
	Agepan OSB4	22	4,4	
	Zellulose-Einblasdämmung	360		
	Agepan OSB4	22	4,4	
	Stamisol DW (regenabweisende diffusionsoffene Lage)	-	0,09	
	Hinterlüftungsebene	30,0	-	
Sto-Verotec Glas-Paneele		-		
NNO-Außen-Wand Gefach 3	Gipskartonbeplankung	12,5	0,1	0,10
	Installationsebene mit Thermo-Hanfdämmung	60,0	0,06	
	Agepan OSB4	22	4,4	
	Zellulose-Einblasdämmung	360		
	Agepan OSB4	22	4,4	
	Stamisol DW (regenabweisende diffusionsoffene Lage)	-	0,09	
	Hinterlüftungsebene	30,0	-	
	Sto-Verotec Glas-Paneele		-	
NNO-Außen-Wand Gefach 2	Gipskartonbeplankung	12,5	0,1	0,10
	Installationsebene mit Thermo-Hanfdämmung	60,0	0,06	
	Agepan OSB4	22	4,4	
	Zellulose-Einblasdämmung	360		
	Agepan UDP	22	0,11	
	Stamisol DW (regenabweisende diffusionsoffene Lage)	-	0,09	
	Hinterlüftungsebene	30,0	-	
	Sto-Verotec Glas-Paneele		-	
NNO-Außen-Wand Gefach 1	Gipskartonbeplankung	12,5	0,1	0,10
	Installationsebene mit Thermo-Hanfdämmung	60,0	0,06	
	Intello-Dampfbremse aus PE-Folie	-	7,5...0,25	
	Agepan OSB4	22	4,4	
	Zellulose-Einblasdämmung	360		
	Agepan UDP	22	0,11	
	Stamisol DW (regenabweisende diffusionsoffene Lage)	-	0,09	
	Hinterlüftungsebene	30,0	-	
Sto-Verotec Glas-Paneele		-		

TABELLE 9.1-2 SCHICHTENAUFBAUTEN DER WEITEREN UNTERSUCHTEN BAUTEILE DER GEBÄUDEHÜLLE (VON INNEN NACH AUßEN) AUF BASIS VON FESTSTELLUNGEN VOR ORT SOWIE NACH [7] UND [8]

Bauteil	Aufbau / Material	Dicke (mm)	s _d -Wert (m)	U-Wert (W/m ² K)
SSW- Außen- Wand	Gipskartonbeplankung	12,5	0,1	0,10
	Installationsebene mit Thermo-Hanfdämmung	60,0	0,06	
	Dampfbremse aus PE-Verbundfolie	-	>100	
	Agepan OSB4	22	4,4	
	Zellulose-Einblasdämmung	360		
	Agepan OSB4	22	4,4	
	Stamisol DW (regenabweisende diffusionsoffene Lage)	-	0,09	
	Hinterlüftungsebene	30,0	-	
	Sto-Verotec Glas-Paneele		-	
Fußboden- aufbau und Boden- paneel	Holzbelag	15	0,6	0,10
	Trittschallmatte (Kork)	3	-	
	Trockenestrich	25	0,2	
	Tackerplatte (Fußboden-Heizung)	30	-	
	Wabenelement mit Sandfüllung	30	-	
	Aluminiumverbunddampfbremse	-	>1500	
	Agepan OSB4	25	5	
	Zellulose-Einblasdämmung	400		
	Duripanel Holzzementplatte	15	0,75	
Dach- aufbau und Dach- paneel	Gipskartonbeplankung	12,5	0,1	0,09
	Thermo-Hanfdämmung	50	0,05	
	Installationsraum	112,5	-	
	Dampfbremse aus PE-Verbundfolie	-	>100	
	Agepan OSB4	25	5	
	Zellulose-Einblasdämmung	400-520		
	Agepan OSB4	20	4,0	
	Glasvlieslage	-	-	
	Kunststoffdachdichtungsbahn	2,0	300	
	Bautenschutzmatte aus Recyclingkautschuk	10		

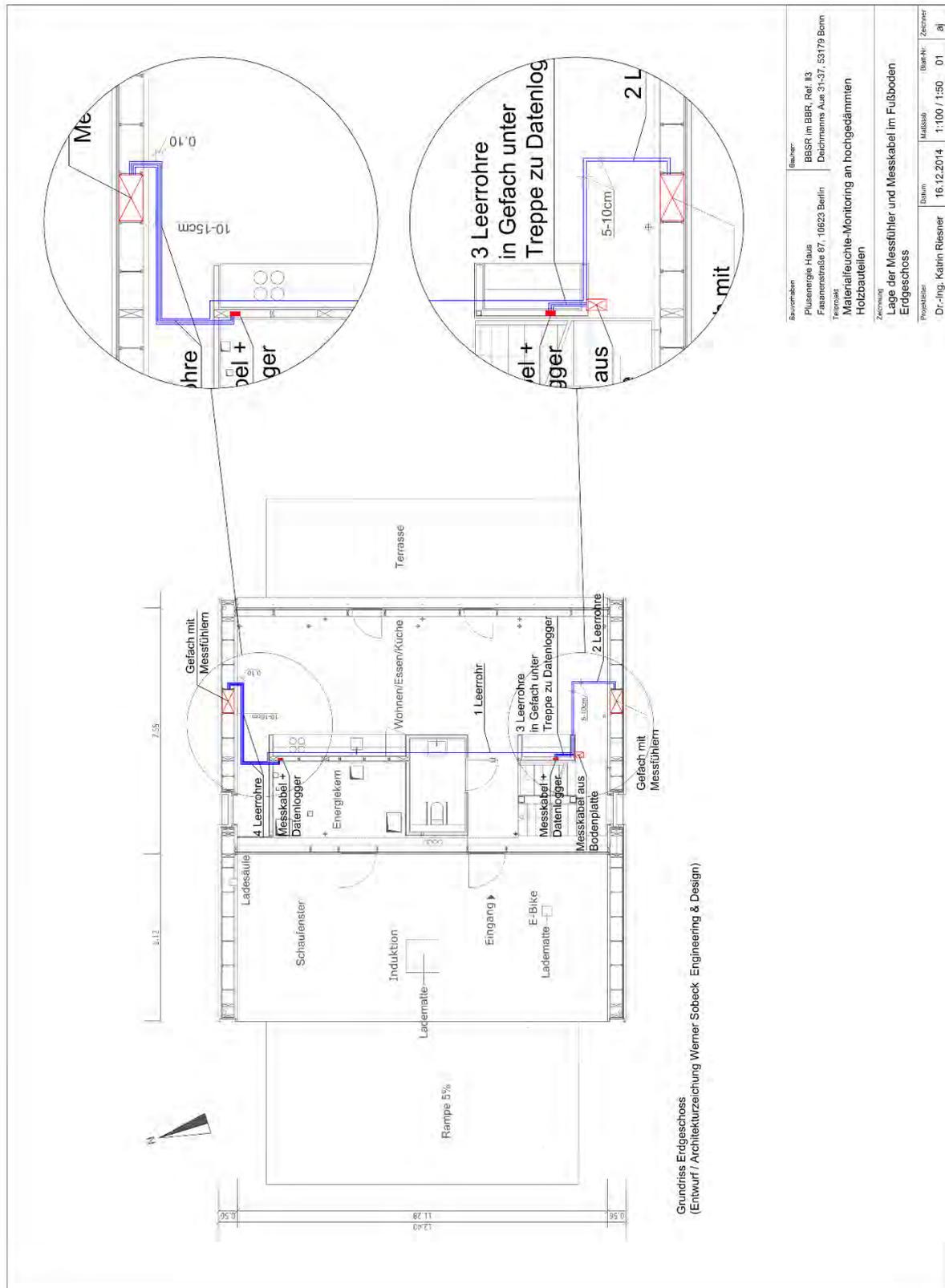


BILD 9-1 GRUNDRISS ERDGESCHOSS MIT DER LAGE DER GEFACHE IN DER NNO-AUßENWAND UND DER SSW-AUßENWAND MIT MESSFÜHLERN SOWIE MIT DER LAGE DER MESSKABEL IM FUßBODEN

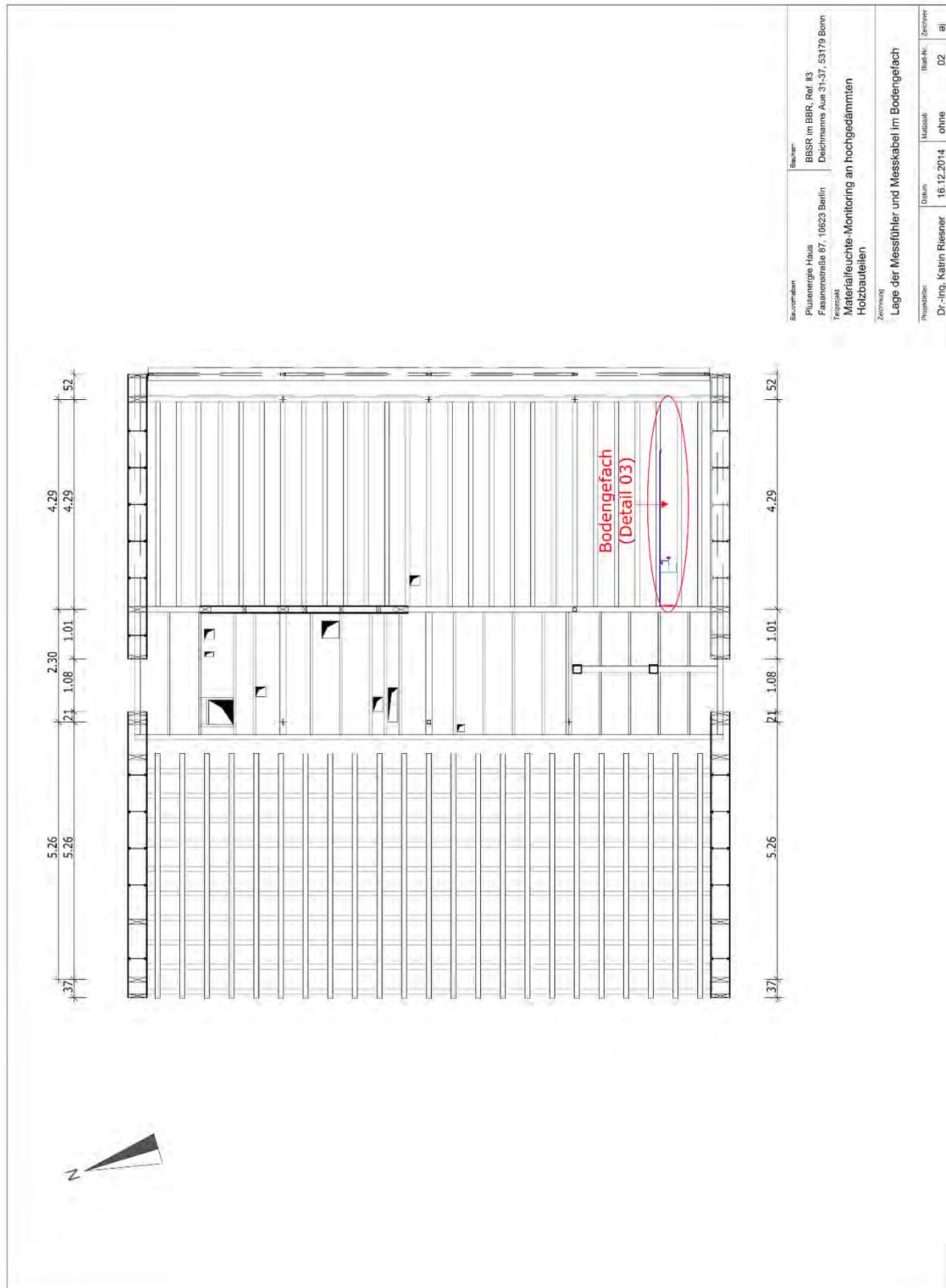


BILD 9-2 HOLZTAFEL-ELEMENTE BODENPLATTE (ZEICHNUNG VON FA. MERKLE GMBH, BISSINGEN) UND LAGE DES UNTERSUCHTEN GEFACHES MIT MESSFÜHLERN



BILD 9-3 LAGE DER MESSFÜHLER UND MESSKABEL IM UNTERSUCHTEN GEFACH DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECHKELLER

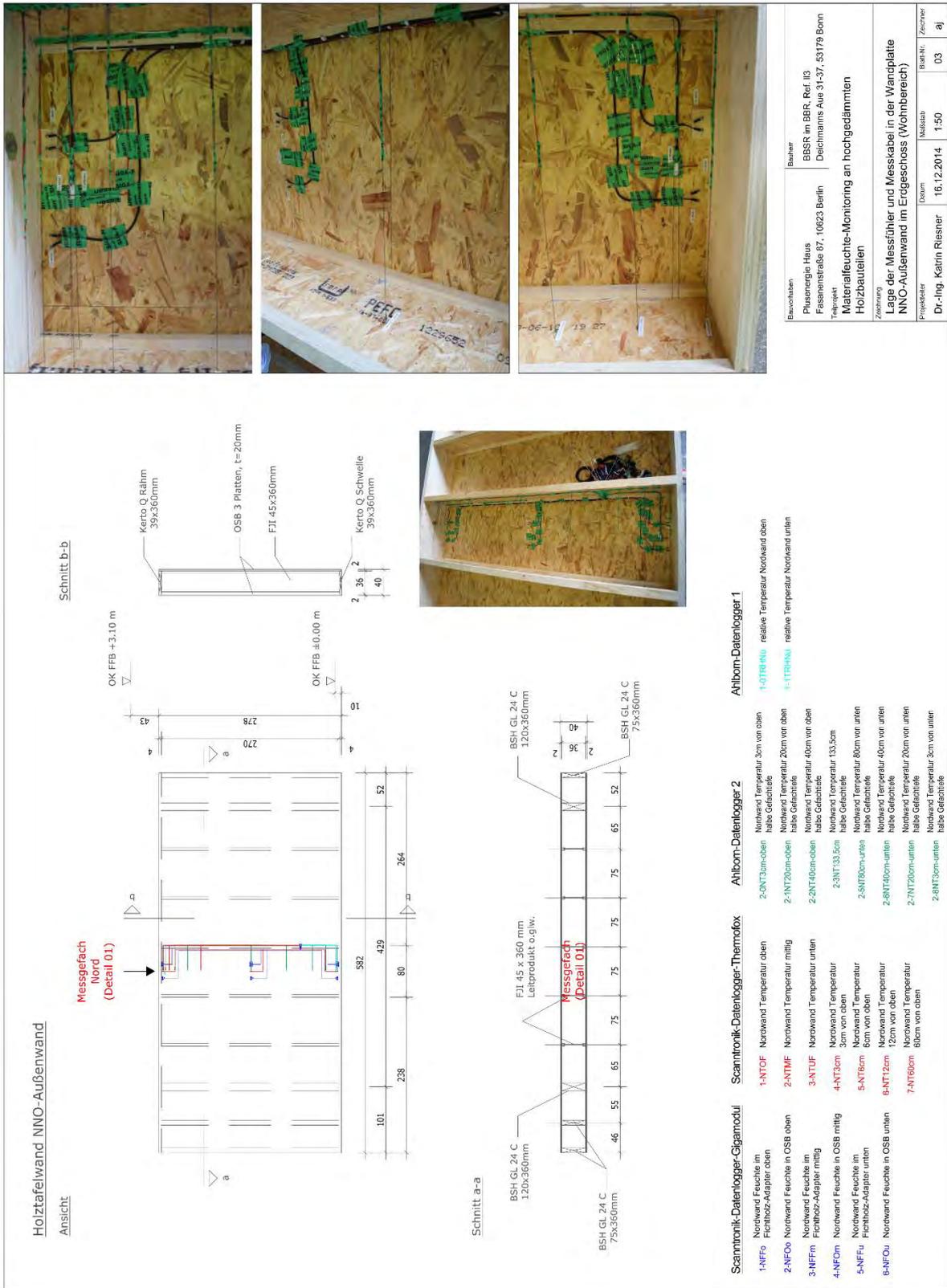


BILD 9-4 LAGE DER MESSFÜHLER UND MESSKABEL IN DER WANDPLATTE DER NNO-AUßENWAND (WOHNBEREICH EG)

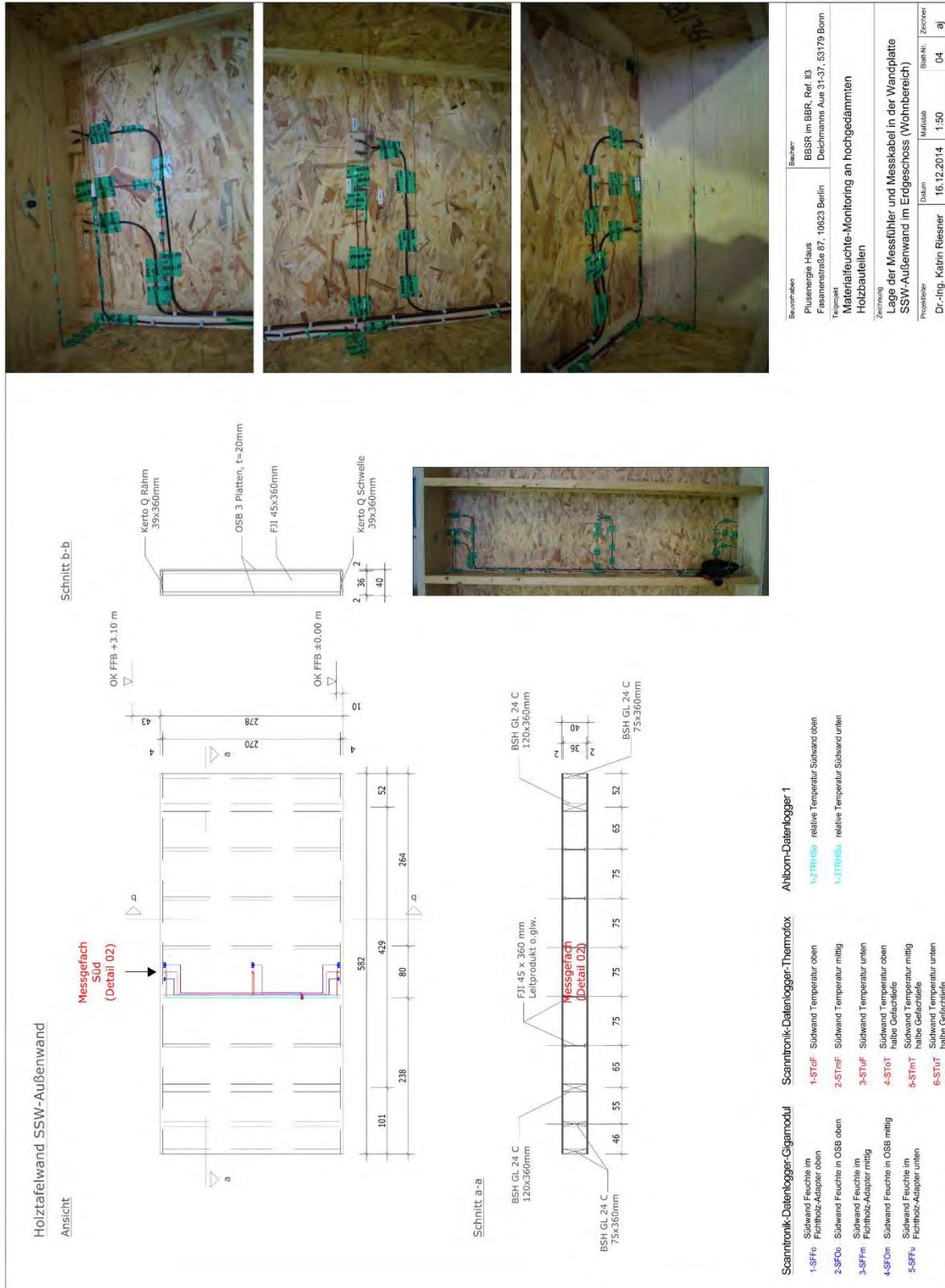


BILD 9-6 LAGE DER MESSFÜHLER UND MESSKABEL IN DER WANDPLATTE DER SSW-AUßENWAND (WOHNBEREICH EG)

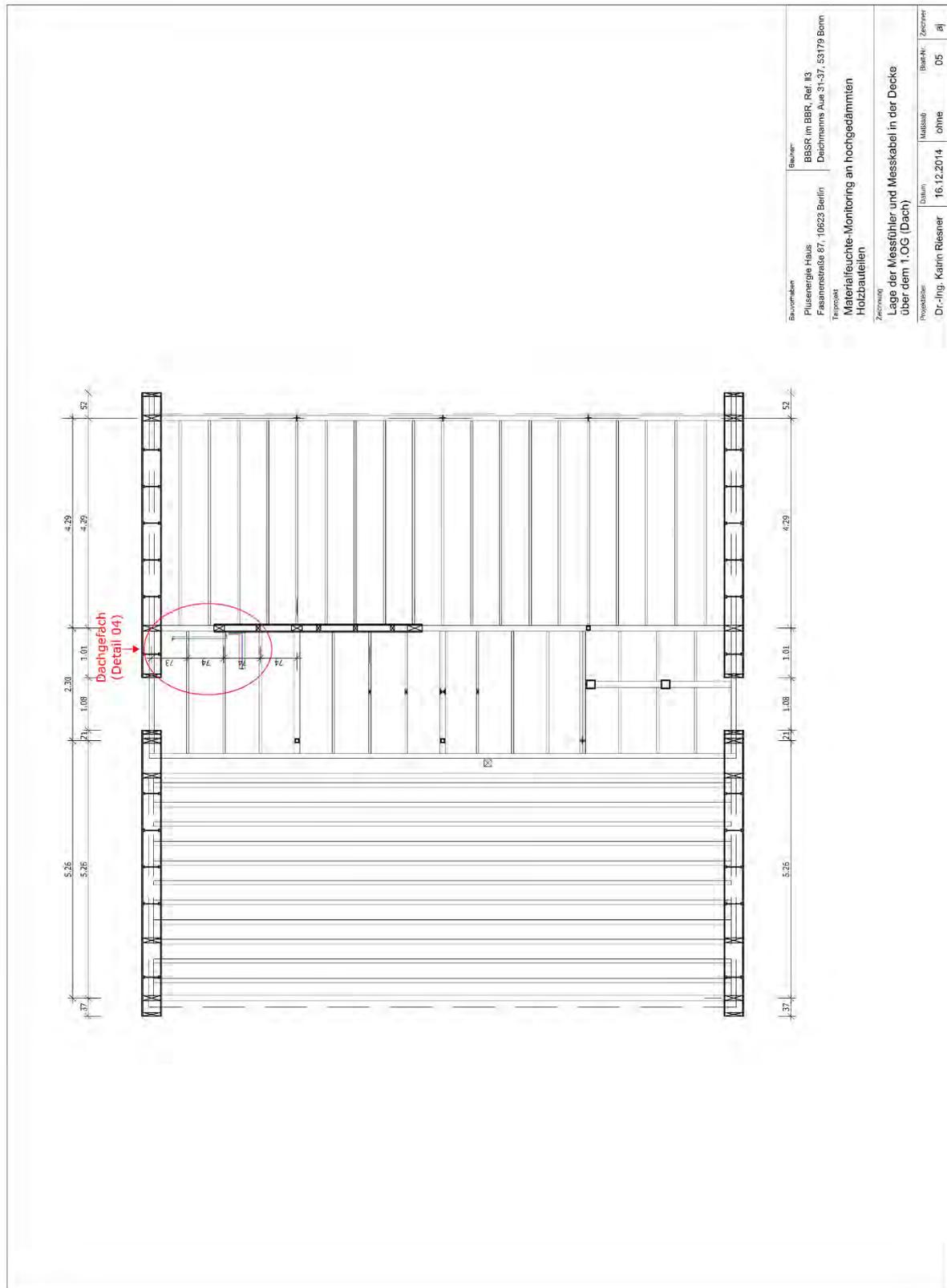


BILD 9-8 LAGE DER MESSFÜHLER UND MESSKABEL IN DER WANDPLATTE ÜBER DER DECKE DES 1. OG (DACH, WOHNBEREICH)

9.2 Ermittlung von Widerstandskennlinien verwendeter Holzwerkstoffe und von Fichte zur Anwendung der elektrischen Holzfeuchtemessung

Im Messprogramm werden an den Materialien Fichte, OSB und Furnierschichtholz die Materialfeuchten über die elektrische Widerstandsmethode mit dem Messgerät „Materialfeuchte Gigamodul“ der Fa. Scantronik gemessen. Die temperaturabhängige Beziehung zwischen Materialfeuchte und elektrischen Widerstand galt es parallel zu den in-situ-Messungen am Gebäude in Laboruntersuchungen an verschiedenen klimatisierten Materialproben zu bestimmen. Dies war erforderlich, da

- sich OSB-Platten in ihrer Materialzusammensetzung herstellerabhängig und chargenabhängig unterscheiden und
- für das Gurt-Material aus Furnierschichtholz (Typ Kerto) der Holz-Steigräger keine Beziehungen zwischen temperaturabhängigen Materialfeuchten und dem elektrischen Widerstand bekannt waren.

Aus Vergleichsgründen wurde zudem Fichte in die Untersuchungen eingebunden. Für Fichte gibt es in der Literatur eine gut dokumentierte Beziehung zwischen der Materialfeuchte und dem elektrischen Widerstand [17].

Dazu wurden Materialproben der Abmessungen 70mm x 50mm x d (d=10mm für Fichte, d=22mm für OSB, d=30mm für Kerto) an den Materialien

- Fichte (3 Stück), mit Einschlagelektroden quer zur Faser
- OSB (8 Stück) sowie
- Kerto, 6 Stück mit Einschlagelektroden quer zur Faser und 6 Stück mit Einschlagelektroden längs zur Faser

vorbereitet, und nacheinander mit den nachfolgend aufgeführten Klimabedingungen jeweils bis zur Massekonstanz in einem Klimaschrank klimatisiert und gewogen (gemäß DIN EN ISO 12570). Nach Erreichen der Massekonstanz wurde die elektrische Leitfähigkeit an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen in einer Stichprobe von mindestens 5 Messungen pro Materialprobe gemessen. Aus diesen Messwerten wurde aus allen Proben eines Materials der Mittelwert gebildet.



BILD 9-10 LABORMESSUNGEN ZUR BESTIMMUNG DER MATERIALFEUCHTE AUS DEM ELEKTRISCHEN WIDERSTAND BEI VERSCHIEDENEN KLIMABEDINGUNGEN – VORKONDITIONIERUNG IM KLIMASCHRANK UND WÄGUNGEN ZUR ERMITTLUNG DER MATERIALFEUCHTE BEI MASSEKONSTANZ UND ANSCHLIEßENDEN LEITFÄHIGKEITSMESSUNGEN AN DEN EINSCHLAGEELEKTRODEN

Die Klimatisierung der Materialproben erfolgte in folgenden Stufen:

- Darrtrocknung bis zur Massekonstanz als Bezugswert für die Bestimmung der Materialfeuchte
- 23°C Lufttemperatur und
 - 50% relative Luftfeuchtigkeit
 - 80% relativer Luftfeuchte
 - 15,0 M.-% (Besprühen mit Wasser, wasserdampfdichte Verpackung und Wägungen) und 75% relativer Luftfeuchte
 - 18,0 M.-% (Besprühen mit Wasser, wasserdampfdichte Verpackung und Wägungen) und 90% relativer Luftfeuchte
 - 90% relative Luftfeuchte
 - 20,0 M.-% (Besprühen mit Wasser, wasserdampfdichte Verpackung und Wägungen) und 95% relativer Luftfeuchte
 - 95% relative Luftfeuchte
 - 99,9% relative Luftfeuchte
 - 21,0 M.-% (Besprühen mit Wasser, wasserdampfdichte Verpackung und Wägungen) und 99,9% relativer Luftfeuchte
- 0°C Lufttemperatur
 - 99,9% relativer Luftfeuchte
 - 80,0% relativer Luftfeuchte
 - Wägungen während des Trocknungsprozesses und vergleichende Messungen zur elektrischen Leitfähigkeit

Die Ergebnisse sind in BILD 9-11 bis BILD 9-14 dargestellt [15].

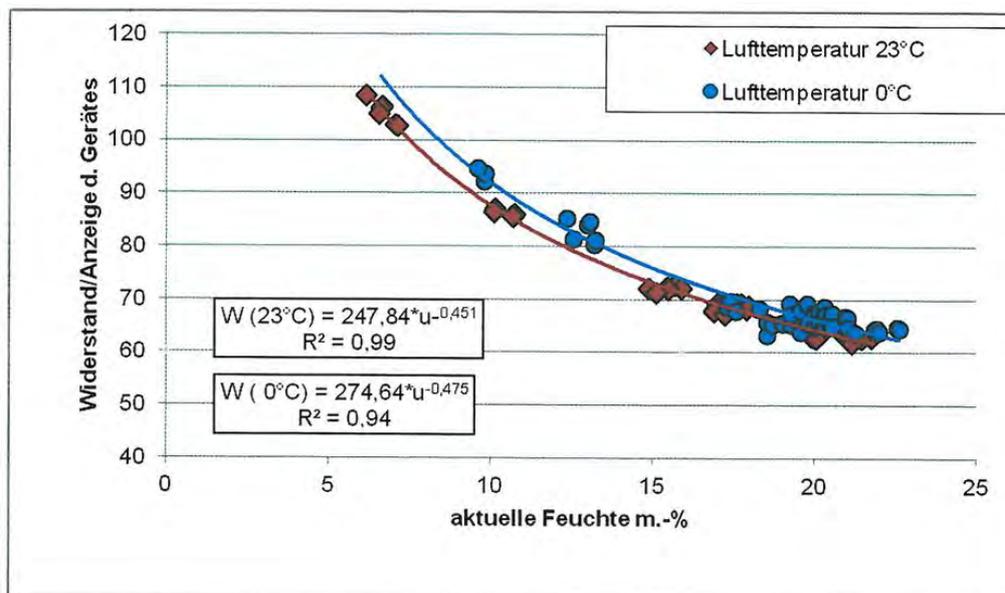


BILD 9-11 EXPERIMENTELL ERMITTELTE BEZIEHUNG ZWISCHEN DEM ELEKTRISCHEN WIDERSTAND UND DER MATERIALFEUCHTE AN FICHTE (QUER ZUR FASER) BEI TEMPERATUREN VON 23°C UND VON 0°C

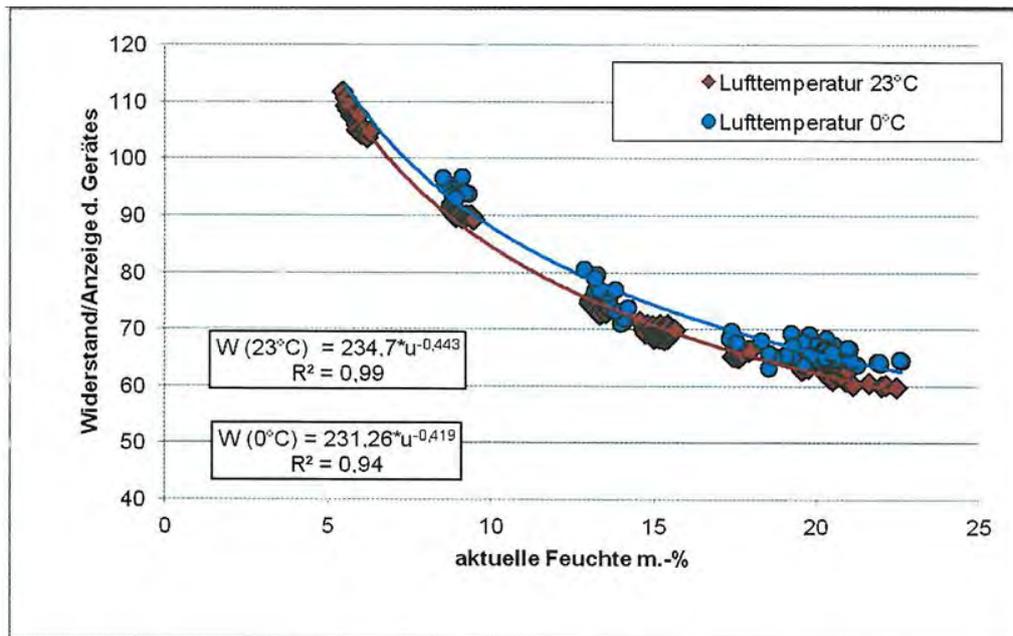


BILD 9-12 EXPERIMENTELL ERMITTELTE BEZIEHUNG ZWISCHEN DEM ELEKTRISCHEN WIDERSTAND UND DER MATERIALFEUCHTE AN OSB BEI TEMPERATUREN VON 23°C UND VON 0°C

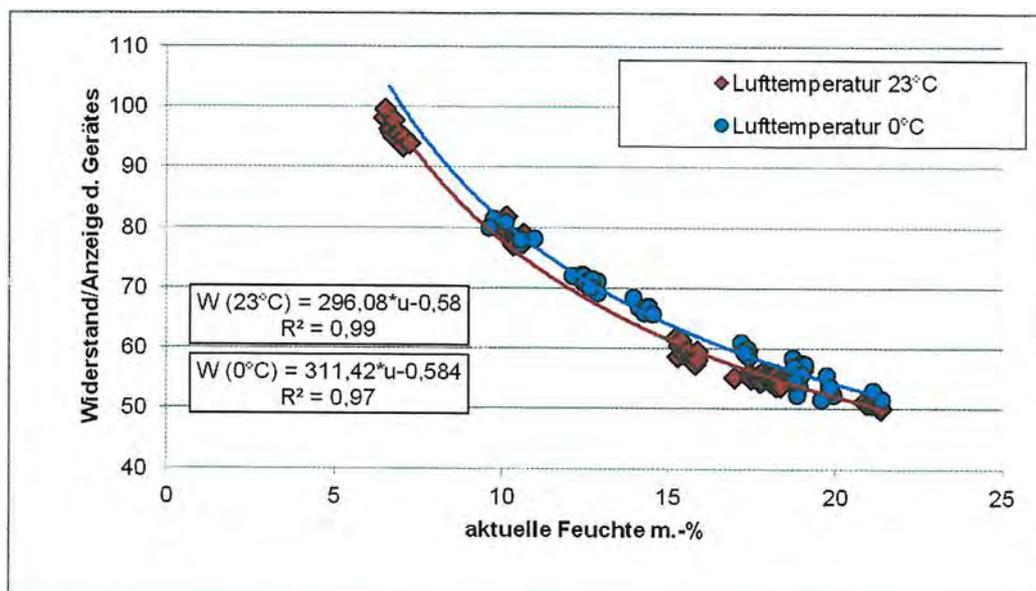


BILD 9-13 EXPERIMENTELL ERMITTELTE BEZIEHUNG ZWISCHEN DEM ELEKTRISCHEN WIDERSTAND UND DER MATERIALFEUCHTE AN FURNIERSCHICHTHOLZ (KERTO) QUER ZUR FASER BEI TEMPERATUREN VON 23°C UND VON 0°C

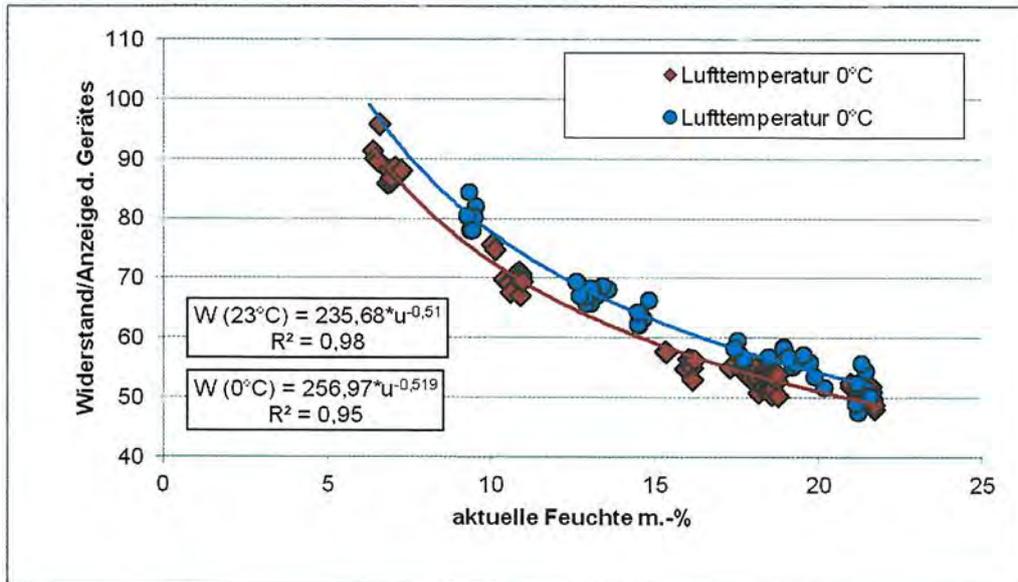


BILD 9-14 EXPERIMENTELL ERMITTELTE BEZIEHUNG ZWISCHEN DEM ELEKTRISCHEN WIDERSTAND UND DER MATERIALFEUCHTE AN FURNIERSCHICHTHOLZ (KERTO) LÄNGS ZUR FASER BEI TEMPERATUREN VON 23°C UND VON 0°C

9.3 Fotos und Untersuchungsergebnisse von Vor-Ort-Besichtigungen



BILD 9-15 KURZZEITIGE DEMONTAGE EINZELNER GLASFASADENELEMENTE DER VORHANGFASADE AN DER NNO-AUßENWAND FÜR UNTERSUCHUNGEN AN DER SCHICHTGRENZE GEFACHBEPLANKUNG / ZELLULOSE-GEFACHDÄMMUNG AN 5 GEFACHEN

Ortstermin am 27.04.2012

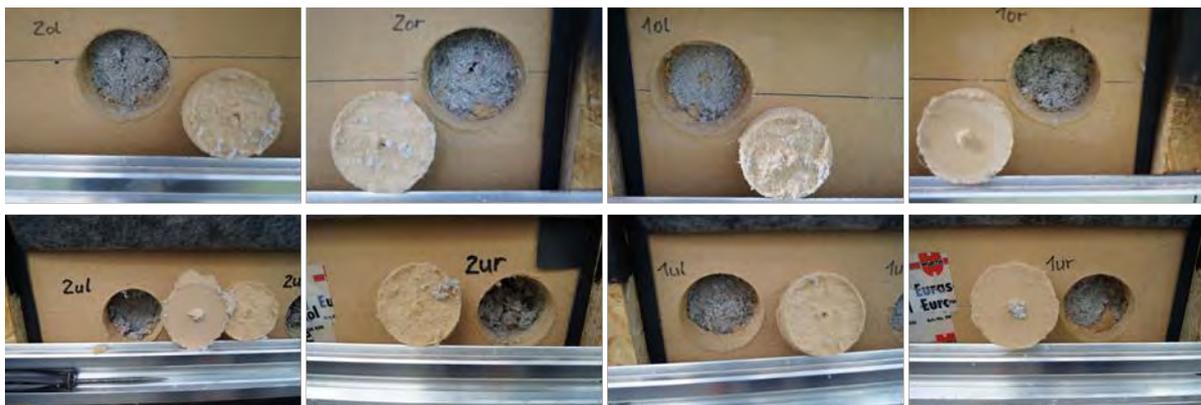


BILD 9-16 ZUSTAND DER SCHICHTGRENZE GEFACHDÄMMUNG / AUßENSEITIGE GEFACHBEPLANKUNG AN GEFACH 1 UND 2 AM 27.04.2012



BILD 9-17 ZUSTAND DER SCHICHTGRENZE GEFACHDÄMMUNG / AUßENSEITIGE GEFACHBEPLANKUNG AN GEFACH 3 UND 4 AM 27.04.2012



BILD 9-18 ZUSTAND DER SCHICHTGRENZE GEFACHDÄMMUNG / AUßENSEITIGE GEFACHBEPLANKUNG AN GEFACH 5 OBEN RECHTS AM 27.04.2012 UND ABMESSUNGEN DER ENTNAHMEPROBEN AUS DER GEFACHBEPLANKUNG

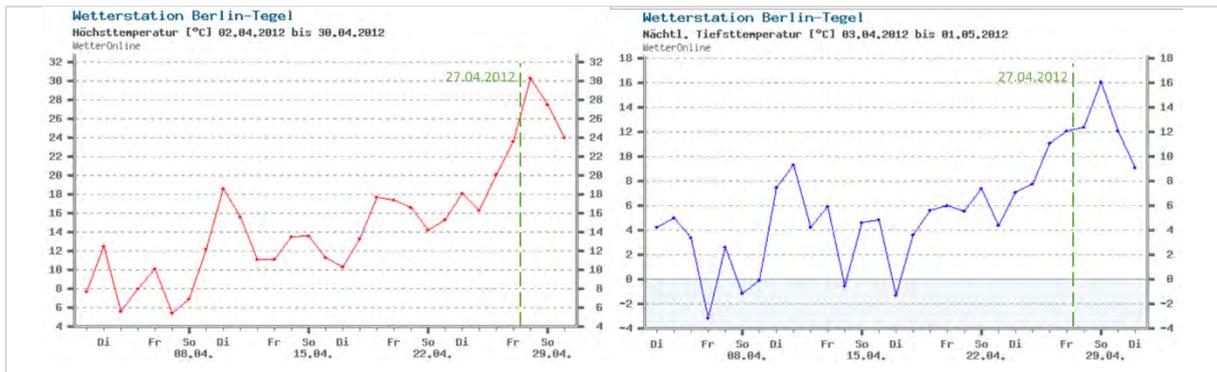


BILD 9-19 HÖCHST- UND TIEFSTTEMPERATUREN VOR UND WÄHREND DER ORTSBESICHTIGUNG AM 27.04.2012 (QUELLE: WWW.WETTERONLINE.DE)

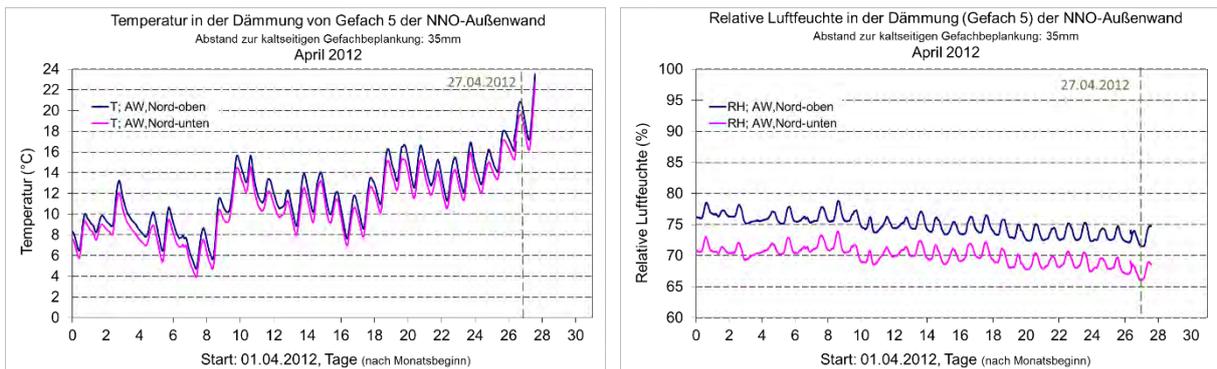


BILD 9-20 TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN DER SENSOREN 0-TRHNO UND 1-TRHNU IN DER DÄMMUNG VON GEFACH NUMMER 5 DER NNO-AUßENWAND IM APRIL 2012

Ortstermin am 24.01.2013



BILD 9-21 ZUSTAND DER SCHICHTGRENZE GEFACHDÄMMUNG / AUßENSEITIGE GEFACHBEPLANKUNG AN GEFACH 1 UND 2 AM 24.01.2013



BILD 9-22 ZUSTAND DER SCHICHTGRENZE GEFACHDÄMMUNG / AUßENSEITIGE GEFACHBEPLANKUNG AN GEFACH 3 UND 4 AM 24.01.2013



BILD 9-23 ZUSTAND DER SCHICHTGRENZE GEFACHDÄMMUNG / AUßENSEITIGE GEFACHBEPLANKUNG AN GEFACH 5 OBEN RECHTS AM 24.01.2013 UND ABMESSUNGEN DER ENTNAHMEPROBEN AUS DER GEFACHBEPLANKUNG

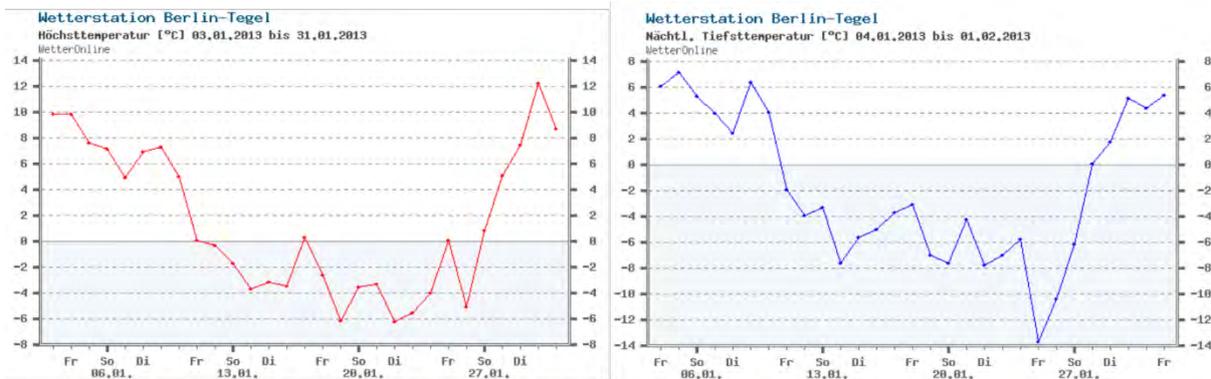


BILD 9-24 HÖCHST- UND TIEFSTTEMPERATUREN VOR UND WÄHREND DER ORTSBESICHTIGUNG AM 24.01.2013 (QUELLE: WWW.WETTERONLINE.DE)

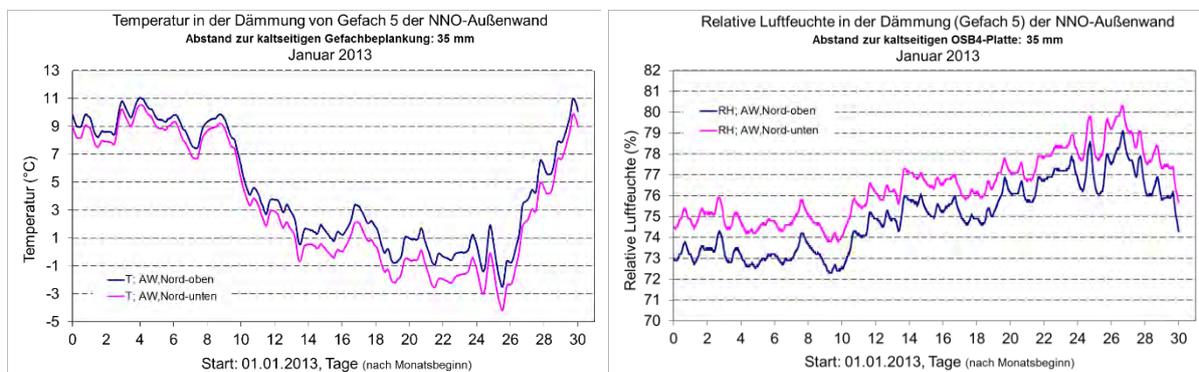


BILD 9-25 TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN DER SENSOREN 0-TRHNO UND 1-TRHNU IN DER DÄMMUNG VON GEFACH NUMMER 5 DER NNO-AUßENWAND IM JANUAR 2013

Ortstermin am 18.04.2013 – Nachsackungen der Dämmung in Gefach 4



BILD 9-26 NACHSACKUNG DER DÄMMUNG UM CA. 10MM IN GEFACH 4, AUFGENOMMEN AM 18.04.2013

Ortstermin am 04.03.2015 – Nachsackungen der Dämmung in Gefach 1 und in Gefach 4



BILD 9-27 NACHSACKUNG IN DER DÄMMUNG VON GEFACH 1 UND GEFACH 4, AUFGENOMMEN AM 03.04.2015

TABELLE 9.3-1 ERGEBNISSE DER SCHIMMELPILZDIAGNOSTIK AN DER SCHICHTGRENZE AUßENSEITIGE GEFACHBEPLANKUNG / GEFACHDÄMMUNG AUF DEN ENTNAHMEPROBEN DER OSB4- ODER UDP-PLATTEN AUF BASIS DER PRÜFPROTOKOLLE [22] BIS [24]

Nr.	für Schimmelpilzwachstum erforderlich sind												H+B: a _w -Wert > 0,9 Hefen(H) und Bakterien (B), weitere Pilze, spezielle Hefen (a _w >0,92)			
	a _w -Wert > 0,8 (RH > 80%)				a _w -Wert > 0,95 (r.F. > 95%)				H+B nicht bestimmt				H+B nicht bestimmt			
	Penicillium (Befallsstärke KBE)		Cladosporium spp o. herb. (Befallsstärke KBE)		Eurotium (Befallsstärke KBE)		Alternaria (Befallsstärke KBE)		Trichoderma (Befallsstärke KBE)		2012		2013		2015	
Gefach 1:	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	
1or	0	0	0	17	0	2	0	0	0	0	0	0	18 H+B	+++	+++	H+B nicht bestimmt
UDP-Platte	1	0	1	7	0	9	0	0	0	0	0	0	10 H+B	+++	+++	H+B nicht bestimmt
s _{di} ~12m	0	1	1	1	15	0	0	0	0	0	0	0		+++	+++	H+B nicht bestimmt
s _{de} ~0,2m	0	2	2	9	0	9	0	0	0	0	0	0		+++	+++	H+B nicht bestimmt
Gefach 2:	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	
2or	5	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	20 H+B	+++	+++	H+B nicht bestimmt
UDP-Platte	2	0	1	7	0	5	0	0	0	0	0	0	5 Rhodotorula	+++	+++	H+B nicht bestimmt
s _{di} ~4,6m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		+++	+++	H+B nicht bestimmt
s _{de} ~0,2m	0	3	3	9	0	9	0	0	0	0	0	0		+++	+++	Aspergillus versicolor (1)
2ul	0	0	2	3	2	4	0	0	0	0	0	0	2 H+B	+++	+++	H+B nicht bestimmt
Gefach 3:	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	
3or	20	0	3	20	2	1	0	0	0	0	0	0	90 Rhodotorula	+++	+++	H+B nicht bestimmt
OSB4-Platte	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	+++	+++	H+B nicht bestimmt
s _{di} ~4,6m	0	5	5	8	0	8	0	0	0	0	0	0		+++	+++	H+B nicht bestimmt
s _{de} ~4,5m	0	3	3	4	3	4	0	0	0	0	0	0		+++	+++	H+B nicht bestimmt
Gefach 4,	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015	
4or	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	4 H+B	+++	+++	H+B nicht bestimmt
Gefach 5:	0	0	0	9	0	7	0	0	0	0	0	0	3 Rhodotorula	+++	+++	H+B nicht bestimmt
OSB4-Platte	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	+++	+++	H+B nicht bestimmt
s _{di} ~104,6m	0	3	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0		+++	+++	H+B nicht bestimmt
s _{de} ~4,5m	0	5	5	19	0	7	0	0	0	0	0	0	25 H+B	+++	+++	H+B nicht bestimmt
5or	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	10 Rhodotorula	+++	+++	2 Hefen

9.4 Ausgewählte Messergebnisse

9.4.1 Außenklima in der Hinterlüftungsebene der NNO-Außenwand

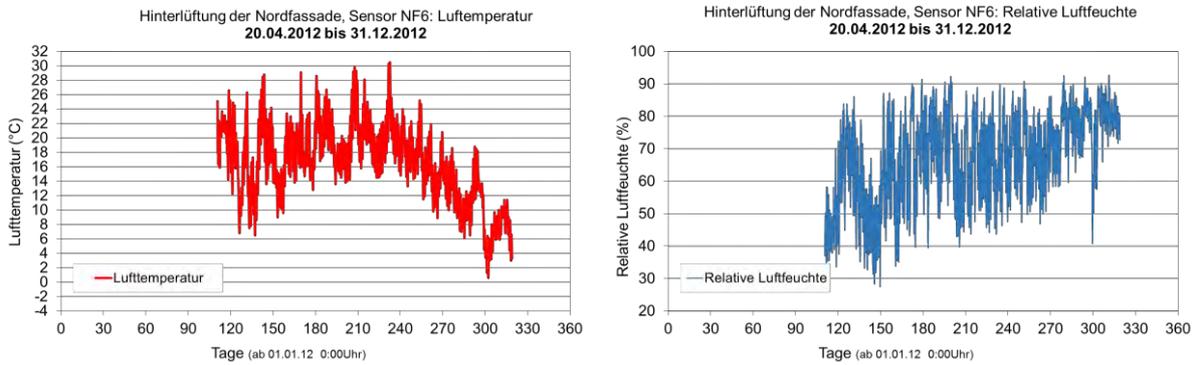


BILD 9-28 GEMESSENE TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND VON 2012

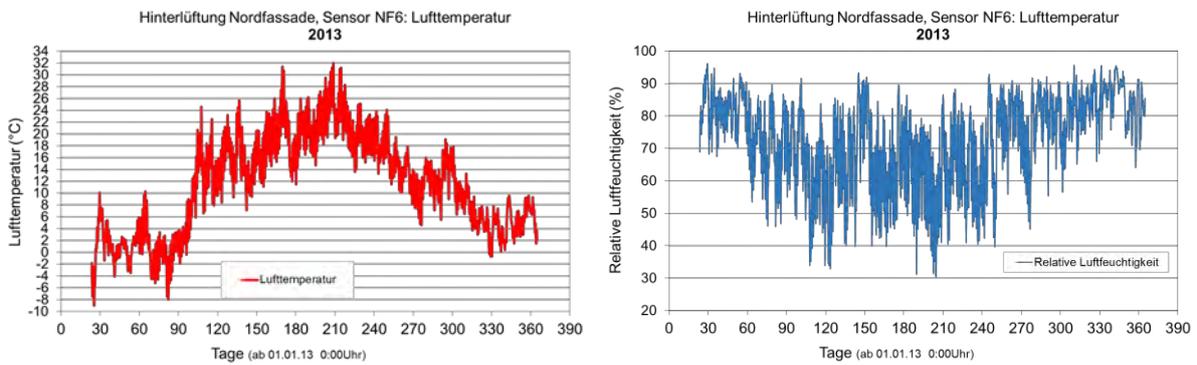


BILD 9-29 GEMESSENE TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND VON 2013

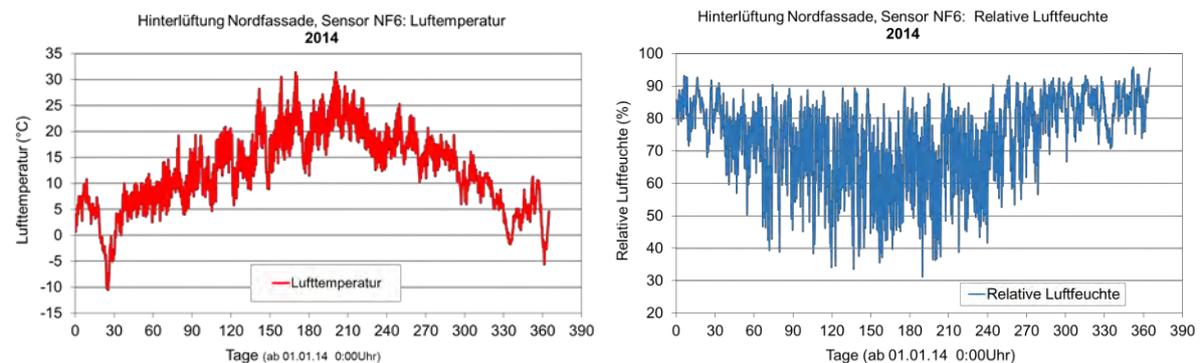


BILD 9-30 GEMESSENE TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND VON 2014

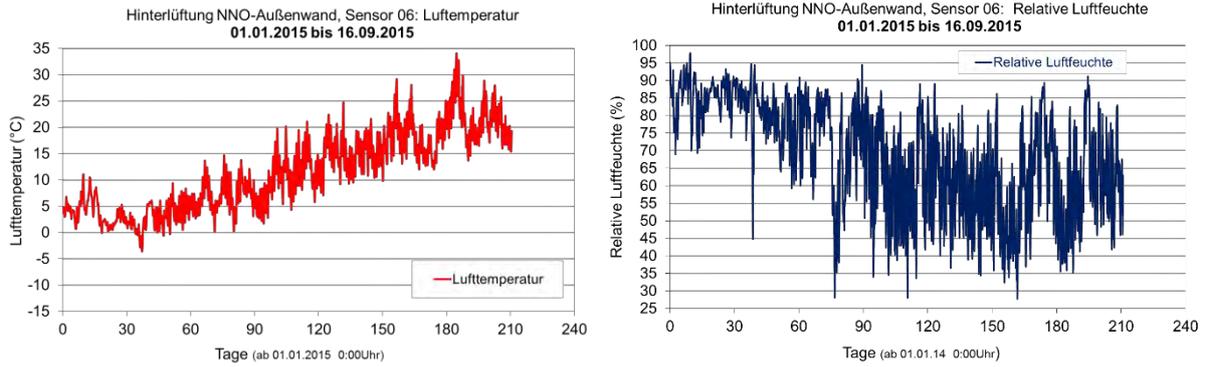


BILD 9-31 GEMESSENE TEMPERATUREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER HINTERLÜFTUNGSEBENE DER NNO-AUßENWAND VON 2015

9.4.2 Materialfeuchte in der außenseitigen Gefachbeplankung

NNO-Außenwand

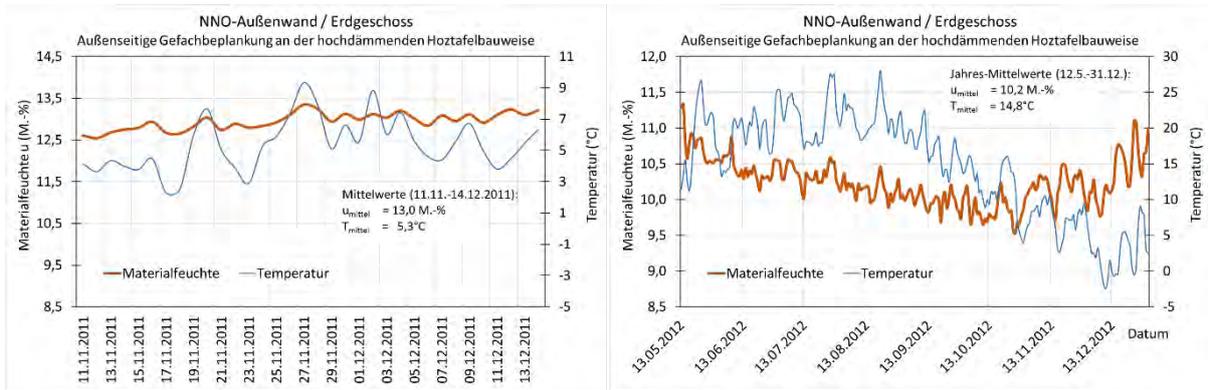


BILD 9-32 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND / ERDGESCHOSS FÜR DEZEMBER 2011 (EINBAU) UND FÜR 2012

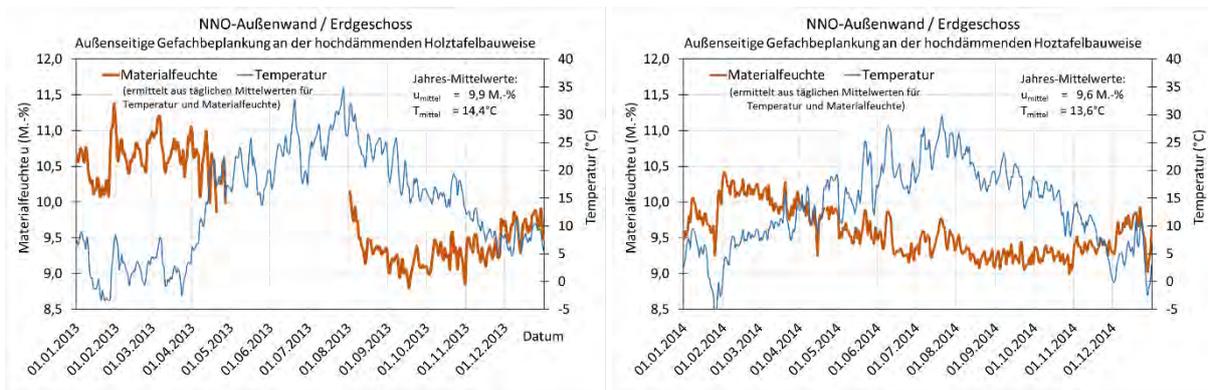


BILD 9-33 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND / ERDGESCHOSS FÜR 2013 UND 2014

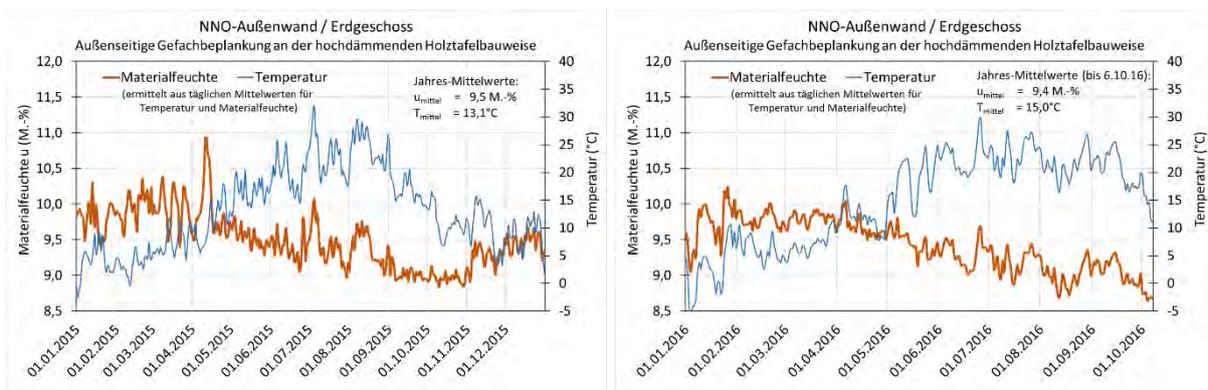


BILD 9-34 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER NNO-AUßENWAND / ERDGESCHOSS FÜR 2015 UND VOM 1.1.-06.10. 2016

SSW-Außenwand

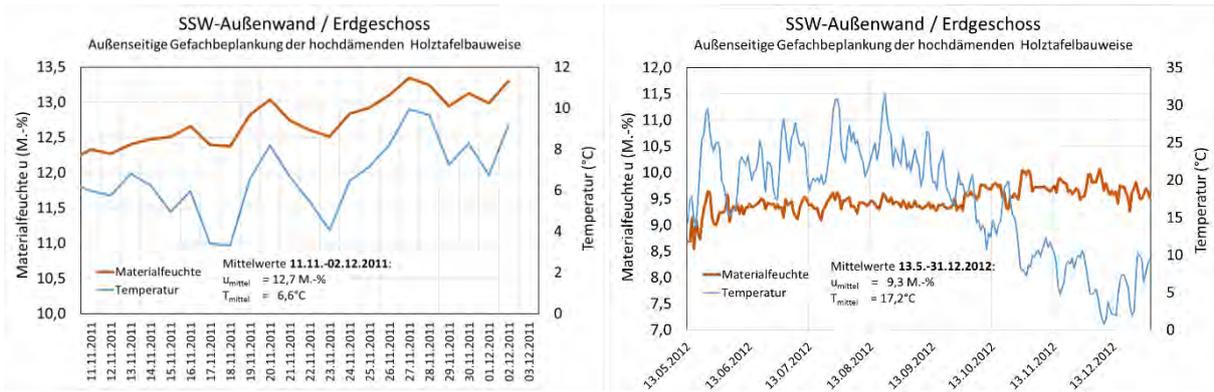


BILD 9-35 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER SSW-AUßENWAND / ERDGESCHOSS FÜR DEZEMBER 2011 (EINBAU) UND FÜR 2012

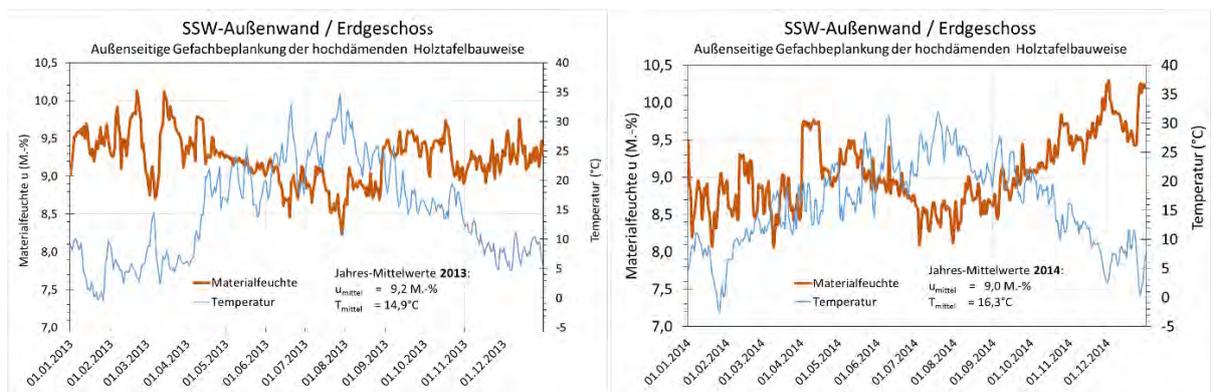


BILD 9-36 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER SSW-AUßENWAND / ERDGESCHOSS FÜR 2013 UND 2014

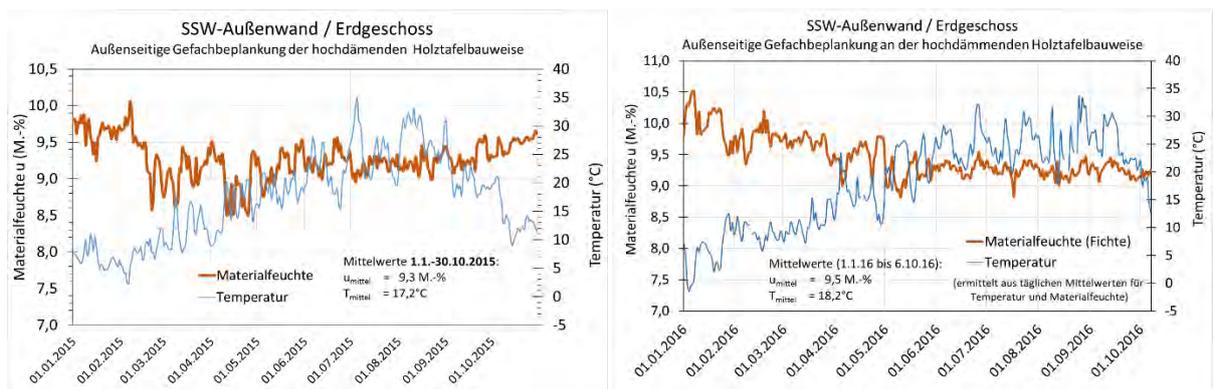


BILD 9-37 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER SSW-AUßENWAND / ERDGESCHOSS FÜR 2015 UND VOM 1.1.-06.10. 2016

Flachdach im Bereich der PV-Elemente

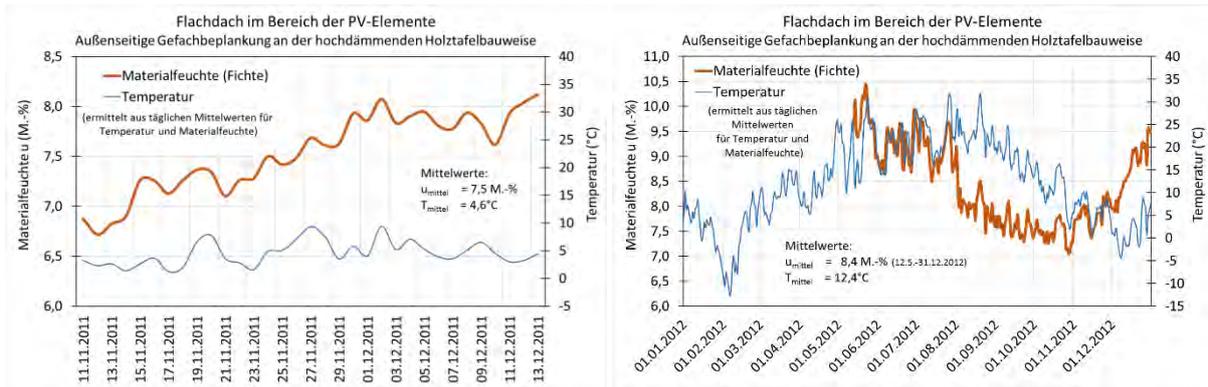


BILD 9-38 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DES FLACHDACHES IM BEREICH DER PV-ELEMENTE FÜR DEZEMBER 2011 (EINBAU) UND FÜR 2012

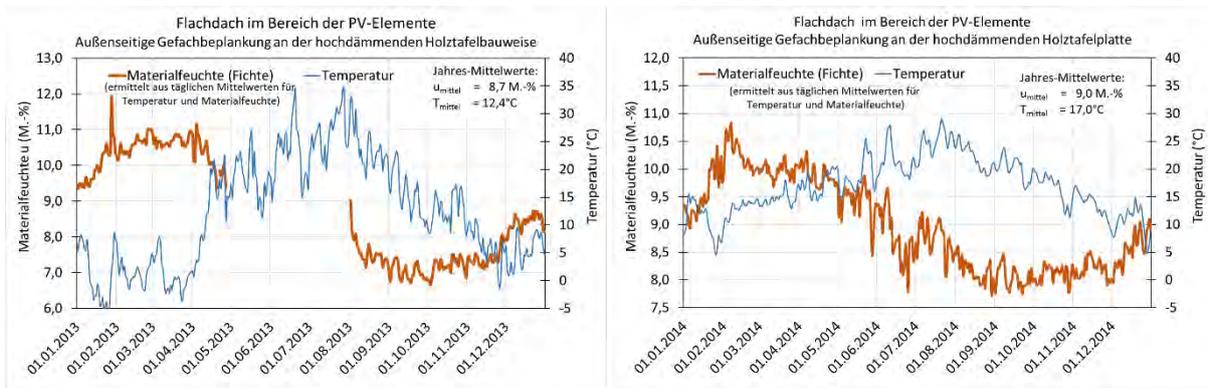


BILD 9-39 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DES FLACHDACHES IM BEREICH DER PV-ELEMENTE FÜR 2013 UND 2014

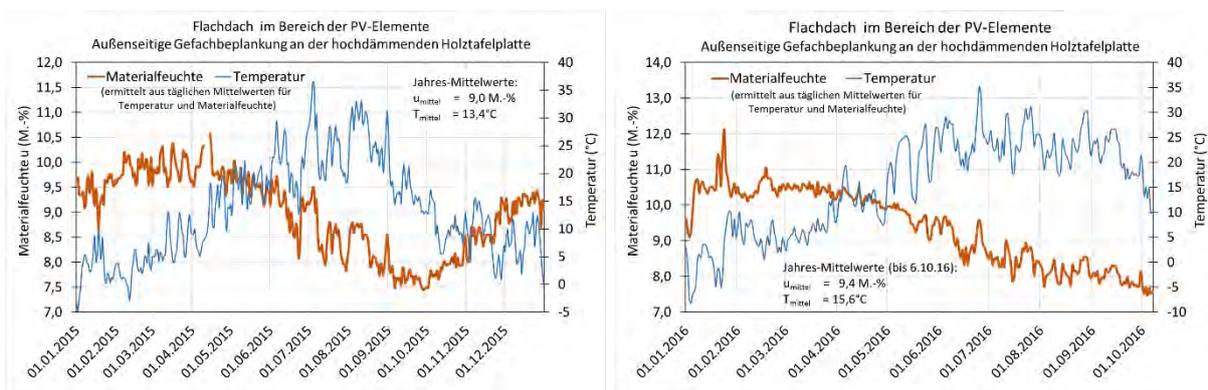


BILD 9-40 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DES FLACHDACHES IM BEREICH DER PV-ELEMENTE FÜR 2015 UND 1.1.-06.10. 2016

Flachdach außerhalb der PV-Elemente

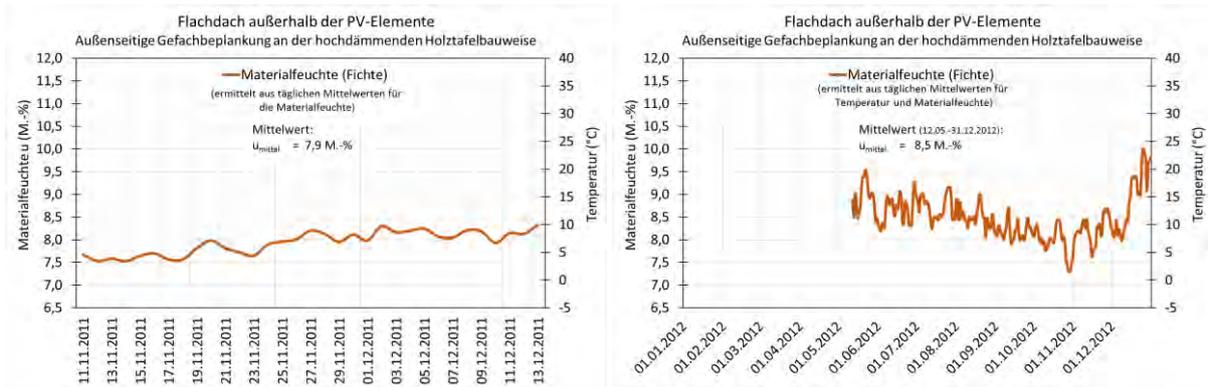


BILD 9-41 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DES FLACHDACHES AUßERHALB DER PV-ELEMENTE FÜR DEZEMBER 2011 (EINBAU) UND FÜR 2012

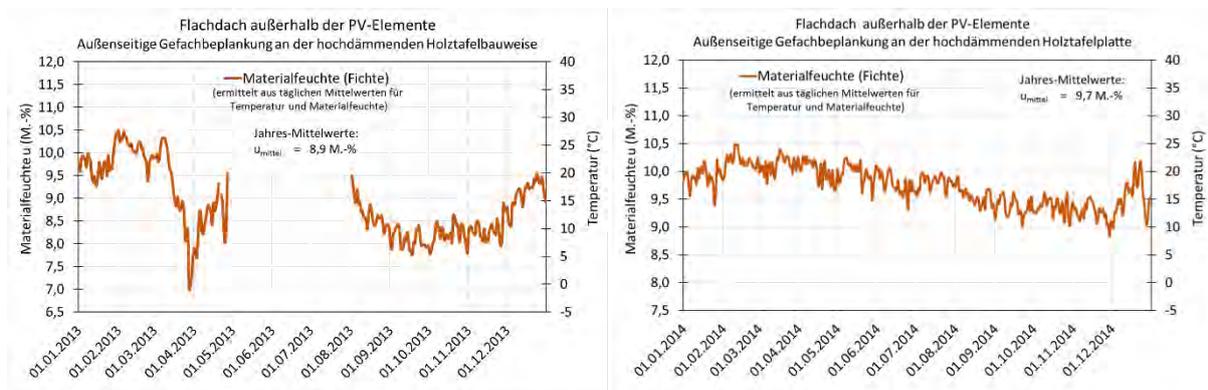


BILD 9-42 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DES FLACHDACHES AUßERHALB DER PV-ELEMENTE FÜR 2013 UND 2014

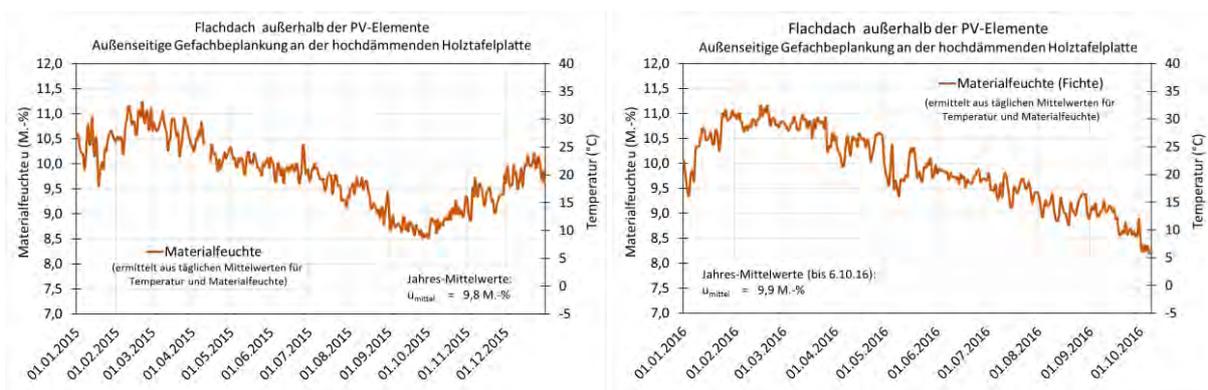


BILD 9-43 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE IN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DES FLACHDACHES AUßERHALB DER PV-ELEMENTE FÜR 2015 UND 1.1.-06.10. 2016

Bodenplatte

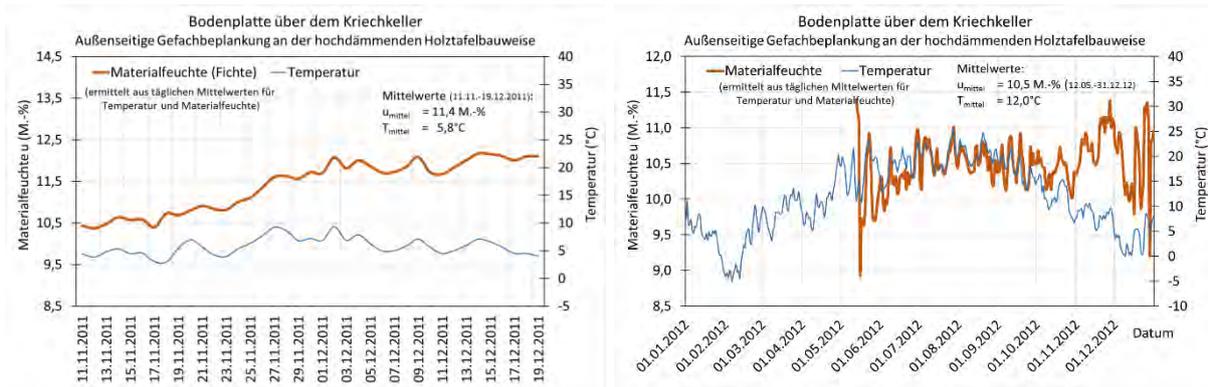


BILD 9-44 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE AN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECHKELLER FÜR DEZEMBER 2011 (EINBAU) UND FÜR 2012, MESSWERTE DER SENSOREN 6-BFF UND 7-BTF

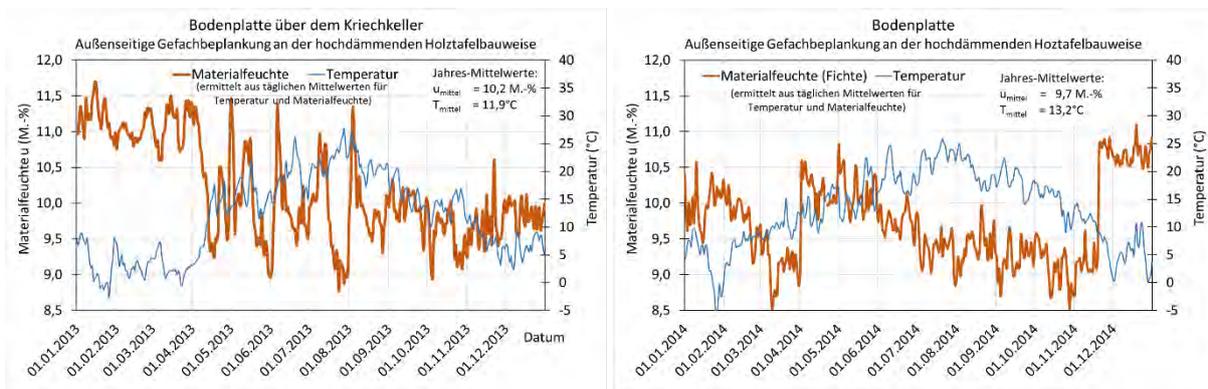


BILD 9-45 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE AN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECHKELLER FÜR 2013 UND 2014, MESSWERTE DER SENSOREN 6-BFF UND 7-BTF

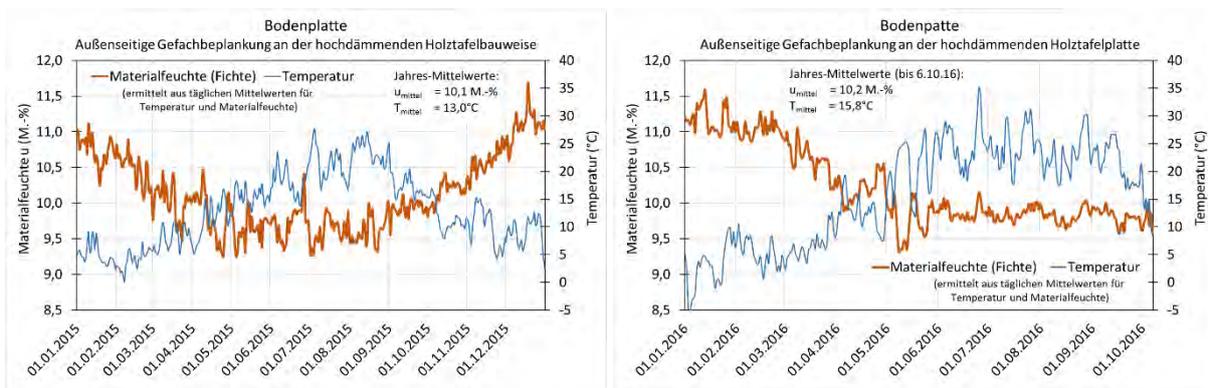


BILD 9-46 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE AN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECHKELLER FÜR 2015 UND 1.1.-06.10. 2016, MESSWERTE DER SENSOREN 6-BFF UND 7-BTF

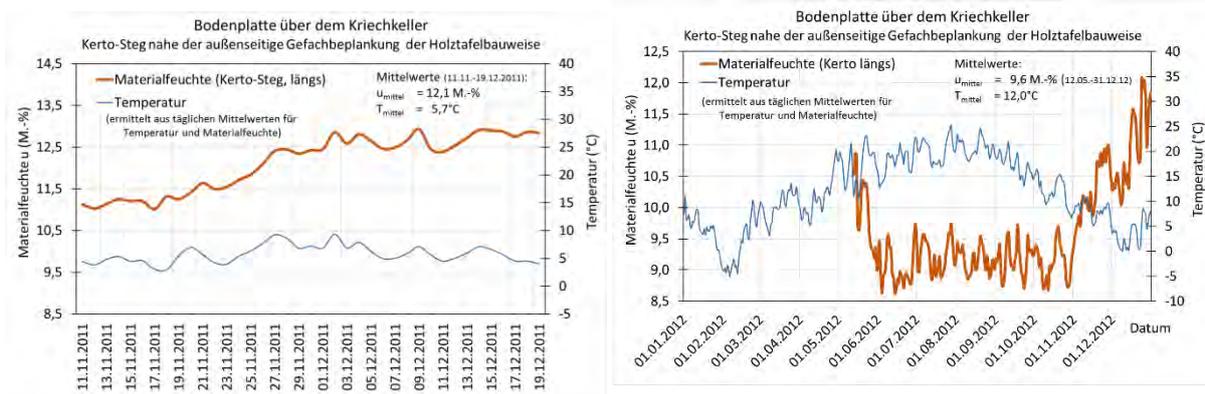


BILD 9-47 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE AN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECKELLER FÜR DEZEMBER 2011 (EINBAU) UND FÜR 2012, MESSWERTE DER SENSOREN 7-BFK1 UND 8-BTK-SW

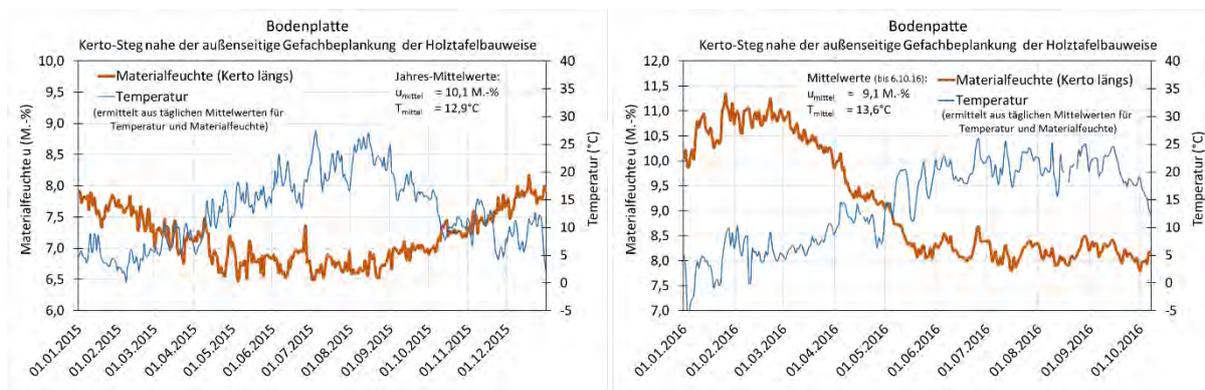


BILD 9-48 GEMESSENE MATERIALFEUCHTEN UND TEMPERATUREN ALS TÄGLICHE MITTELWERTE AN DER AUßENSEITIGEN GEFACHBEPLANKUNG DER HOLZTAFELPLATTE DER BODENPLATTE ÜBER DEM KRIECKELLER FÜR 2015 UND 2016, MESSWERTE DER SENSOREN 7-BFK1 UND 8-BTK-SW

9.4.3 Relative Luftfeuchte in der Dämmung der opaken Außenbauteile

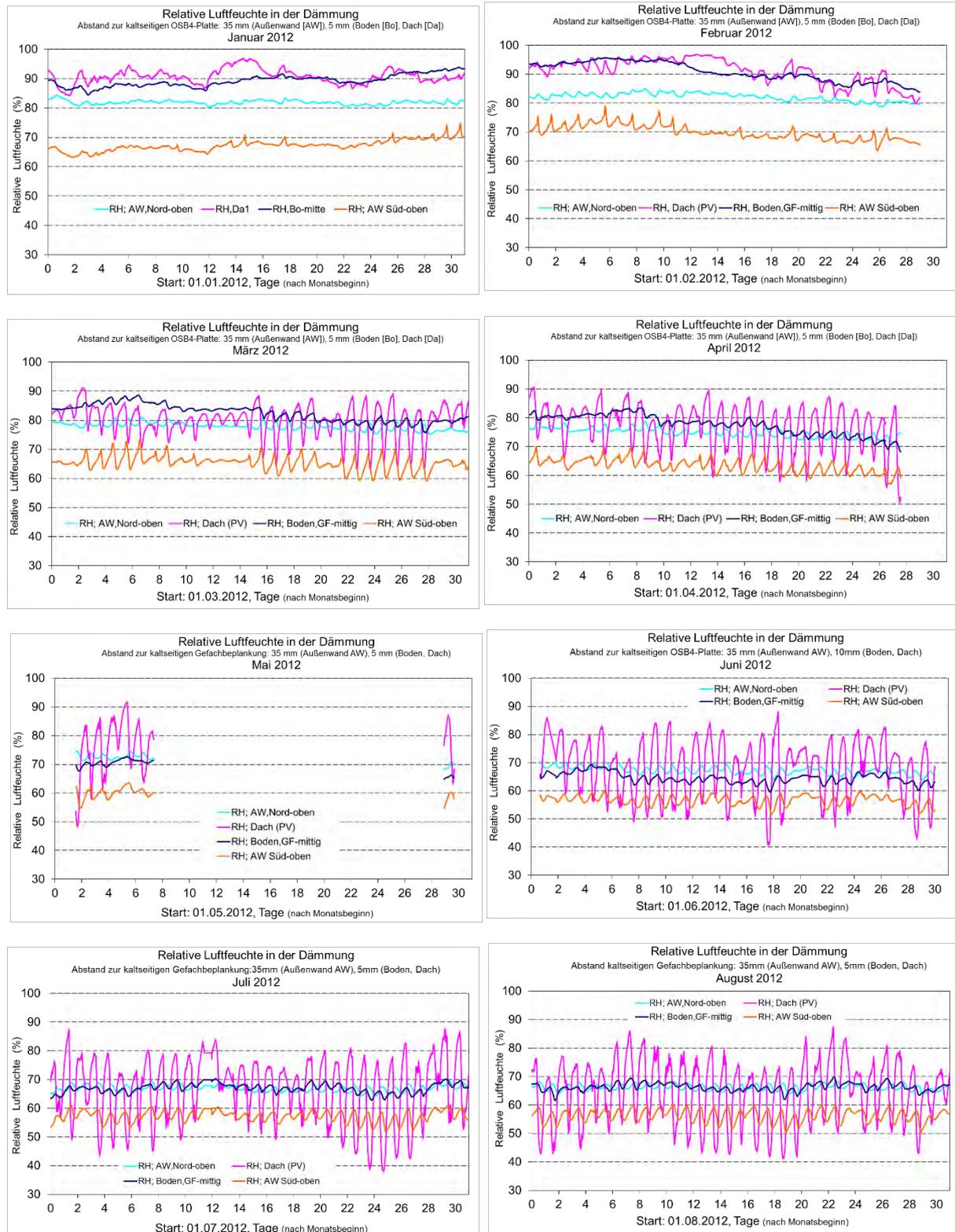


BILD 9-49 RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON JANUAR BIS AUGUST 2012

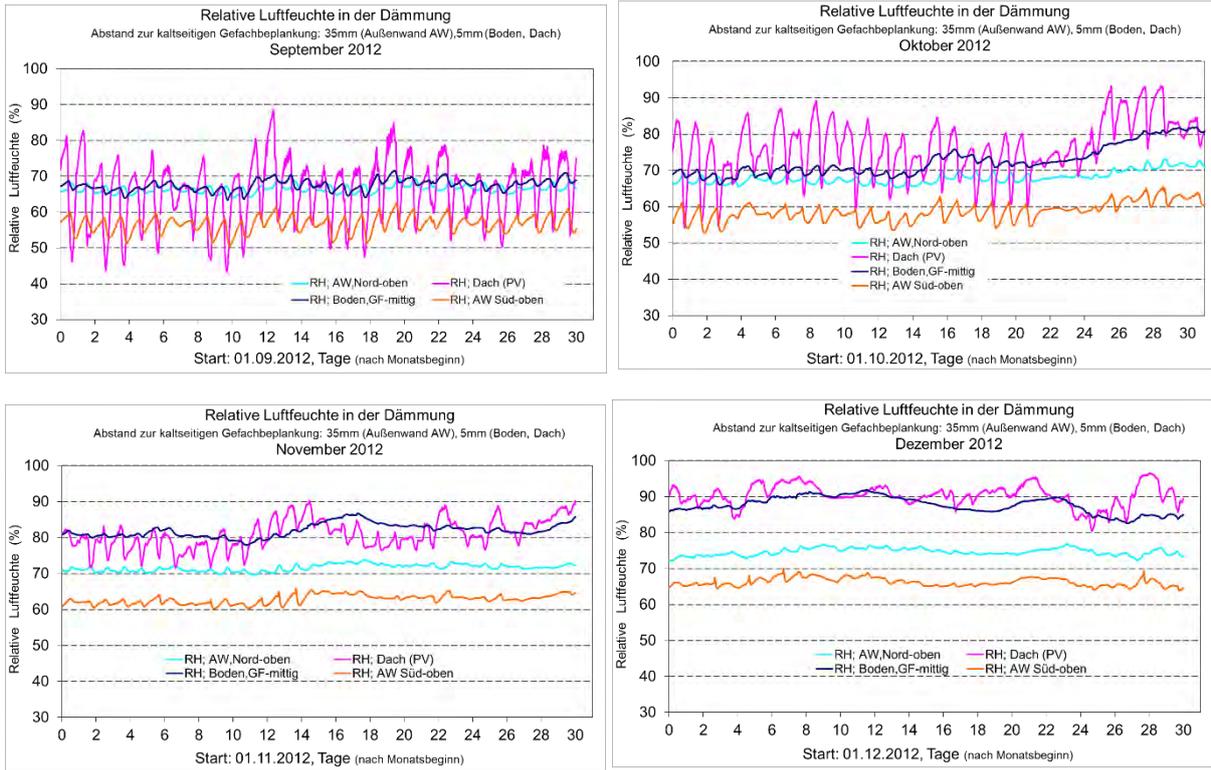


BILD 9-50 RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON SEPTEMBER BIS DEZEMBER 2012

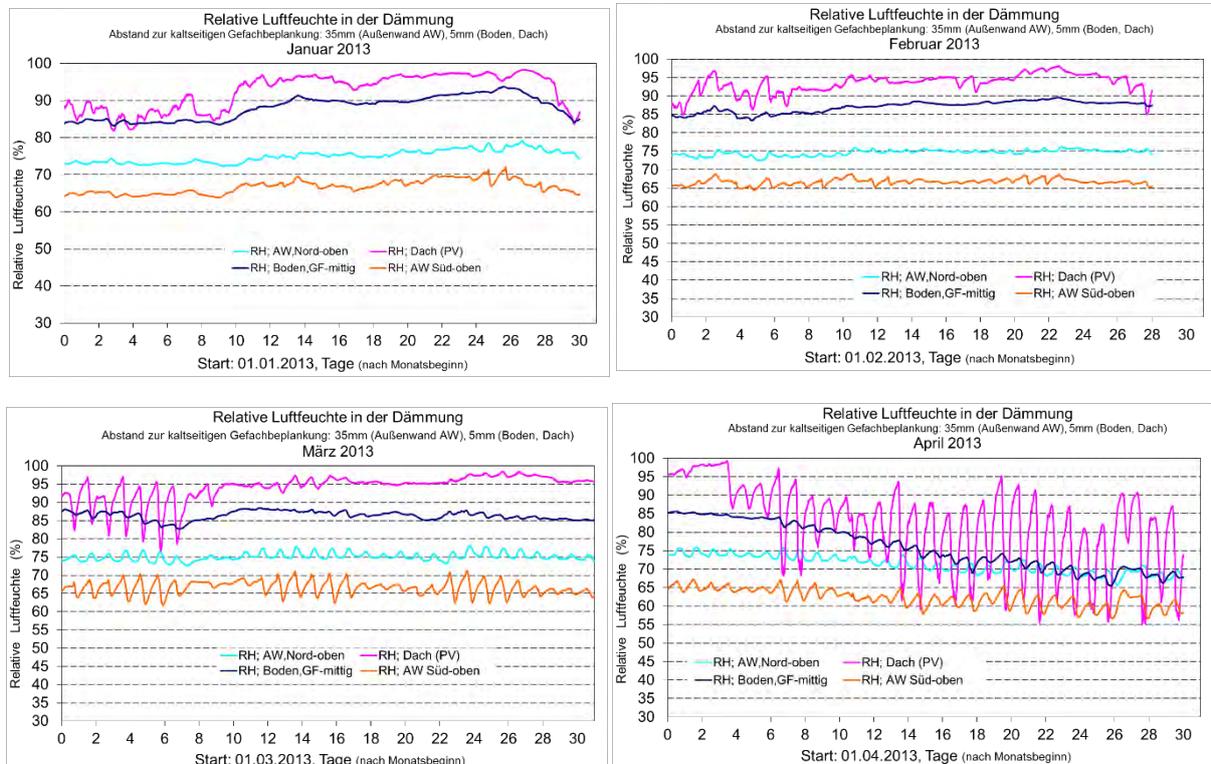


BILD 9-51 RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON JANUAR BIS APRIL 2013

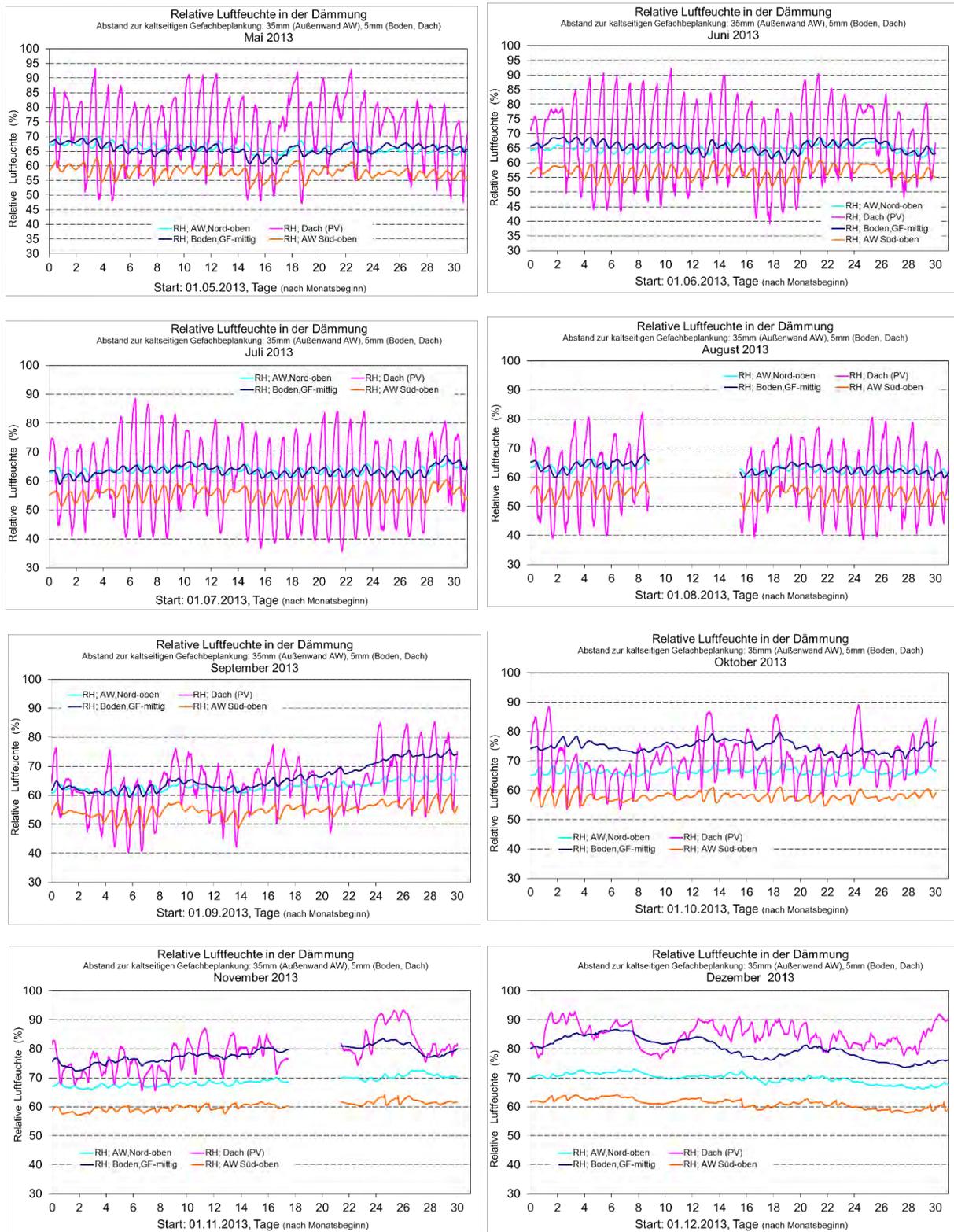


BILD 9-52 RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON MAI BIS DEZEMBER 2013

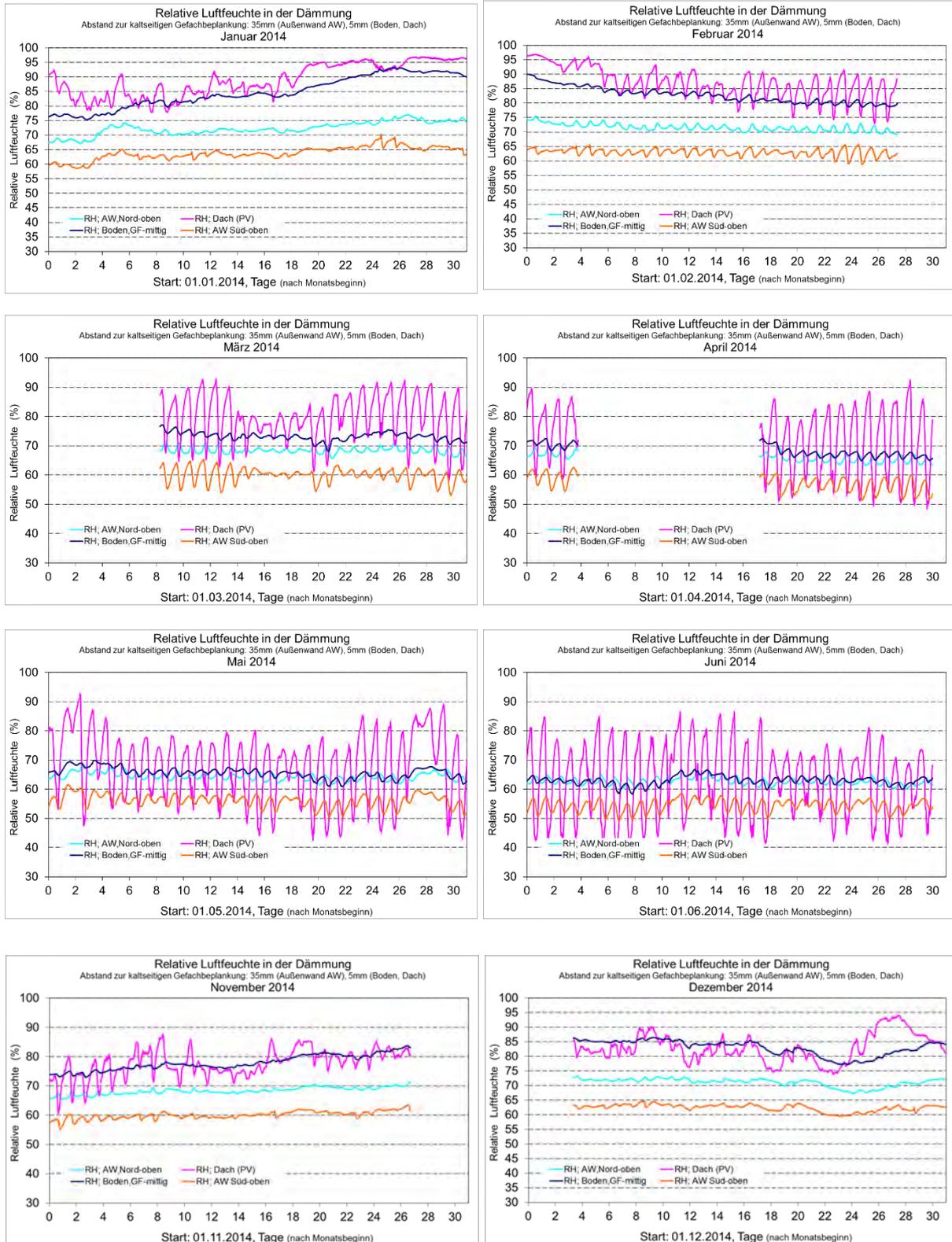


BILD 9-53 RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON JANUAR BIS JUNI 2014 UND VON NOVEMBER BIS DEZEMBER 2014

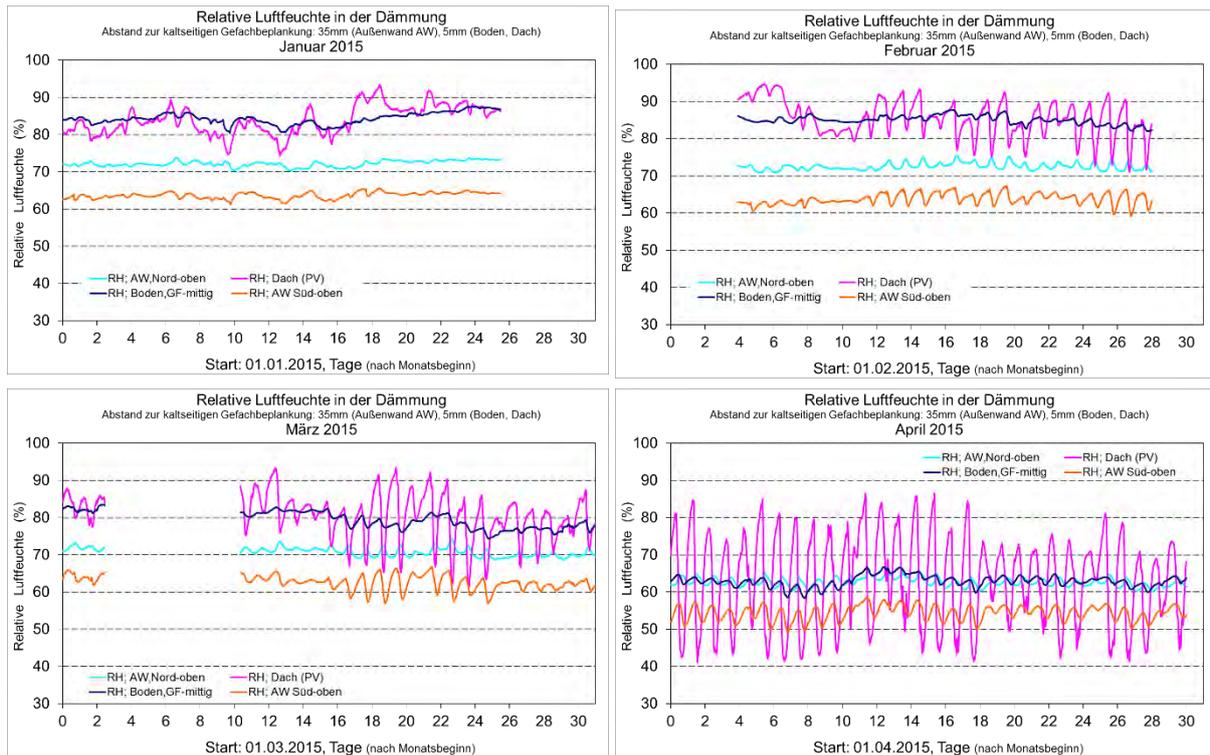


BILD 9-54 RELATIVE LUFTFEUCHTEN IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON JANUAR BIS APRIL 2015

9.4.4 Temperaturen in der Dämmung der opaken Außenbauteile

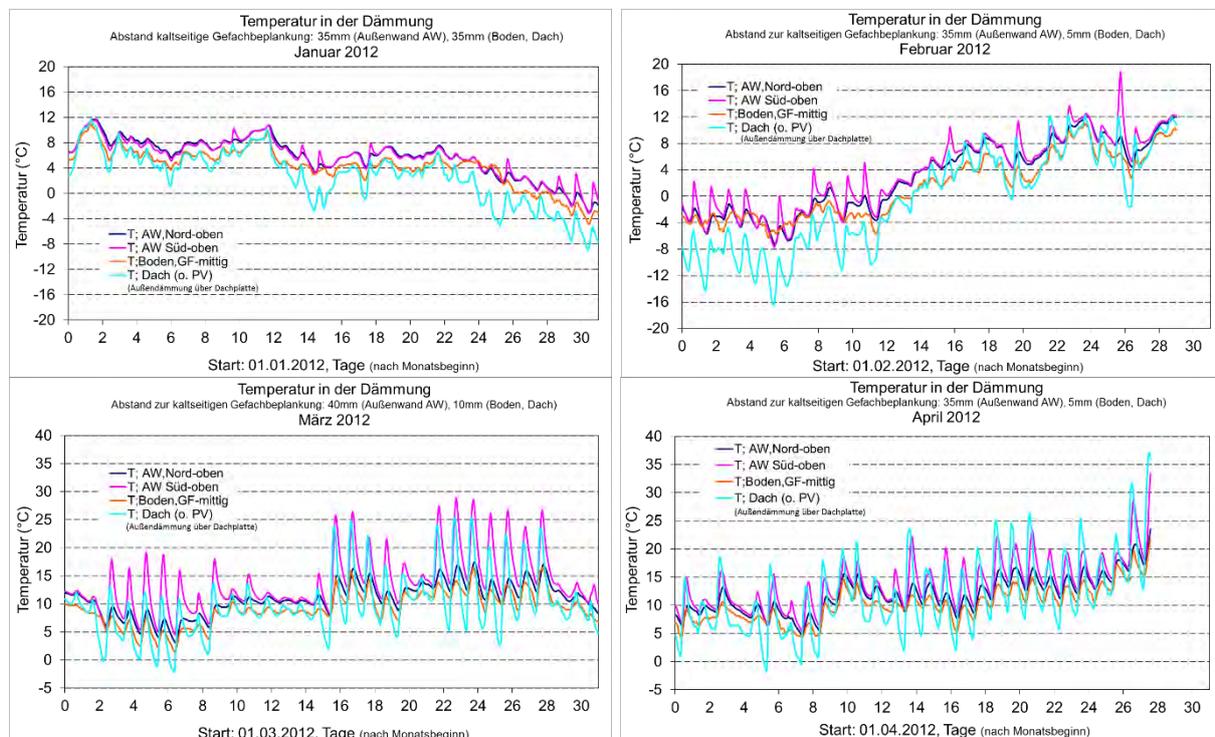


BILD 9-55 TEMPERATUR IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON JANUAR 2012 BIS APRIL 2012 (ZUZUORDNEN DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE AUS ABSCHNITT 9.4.3)

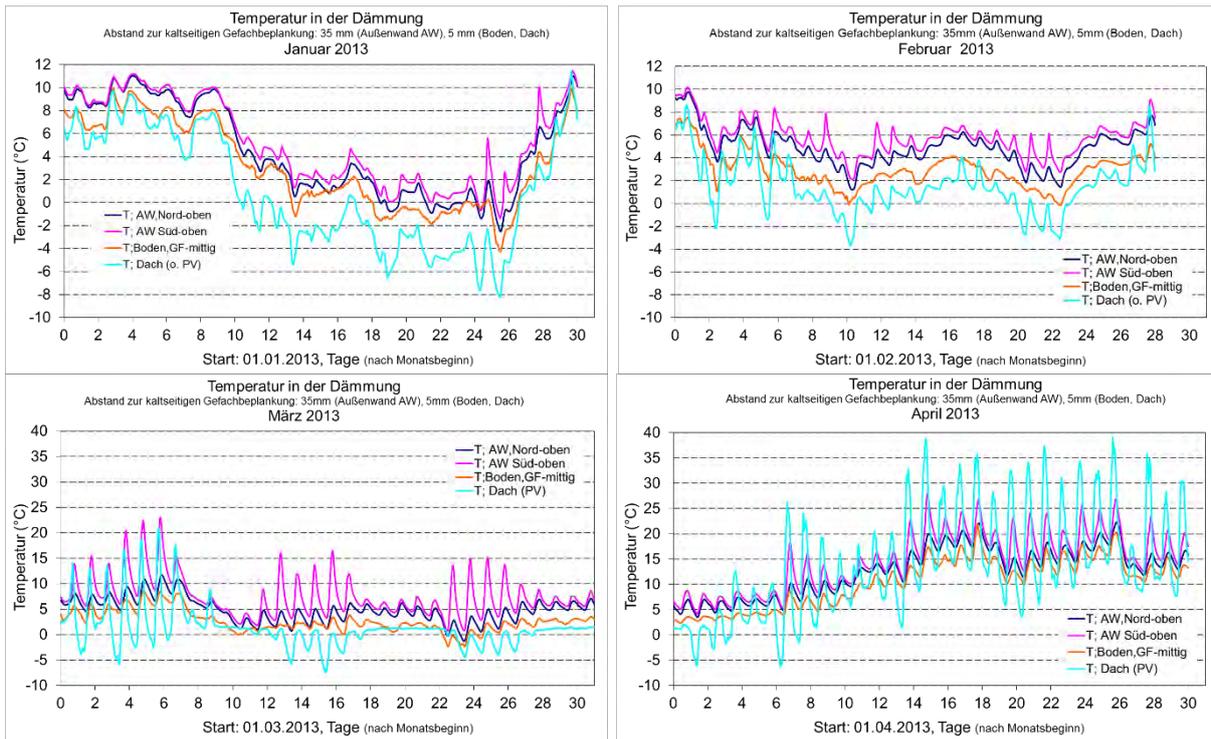


BILD 9-56 TEMPERATUR IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON JANUAR 2013 BIS APRIL 2013 (ZUZUORDNEN DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE AUS ABSCHNITT 9.4.3)

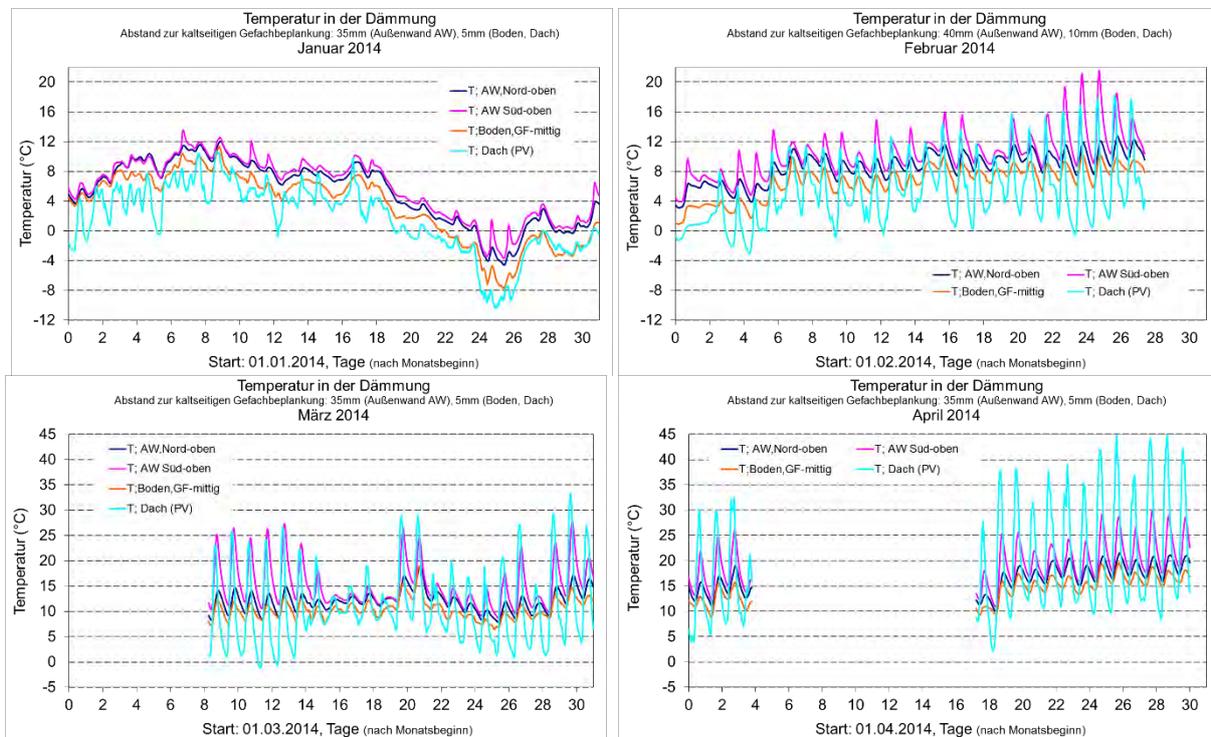


BILD 9-57 TEMPERATUR IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON JANUAR 2014 BIS APRIL 2014 (ZUZUORDNEN DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE AUS ABSCHNITT 9.4.3)

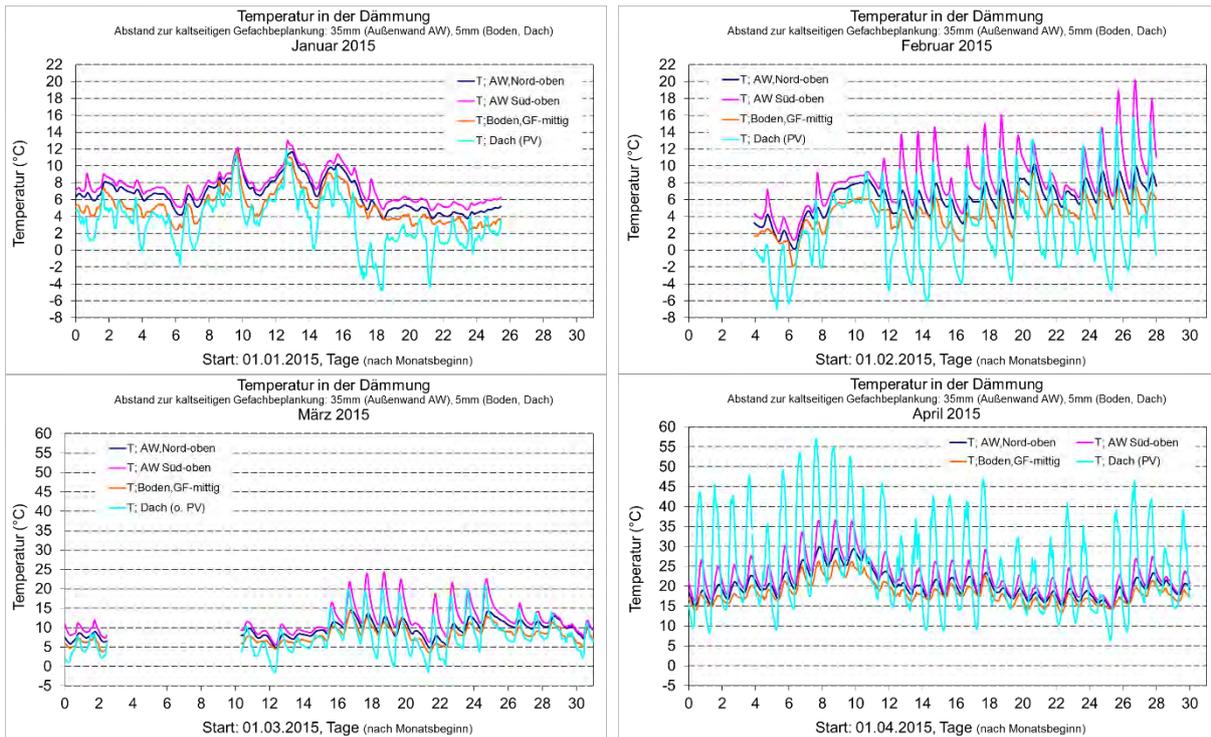


BILD 9-58 TEMPERATUR IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON JANUAR 2015 BIS APRIL 2015 (ZUZUORDNEN DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE AUS ABSCHNITT 9.4.3)

9.4.5 Massebezogene absolute Luftfeuchte in der Dämmung der opaken Außenbauteile

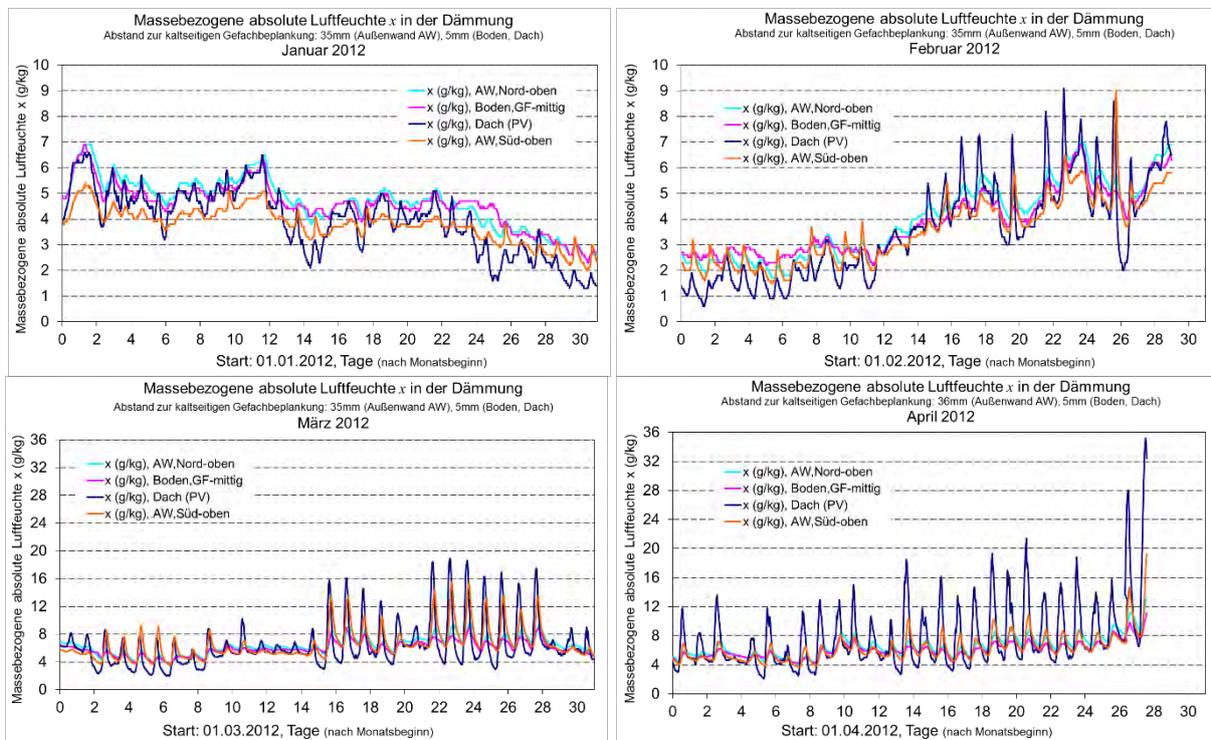


BILD 9-59 MASSEBEZOGENE ABSOLUTE LUFTFEUCHTE IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON JANUAR 2012 BIS APRIL 2012

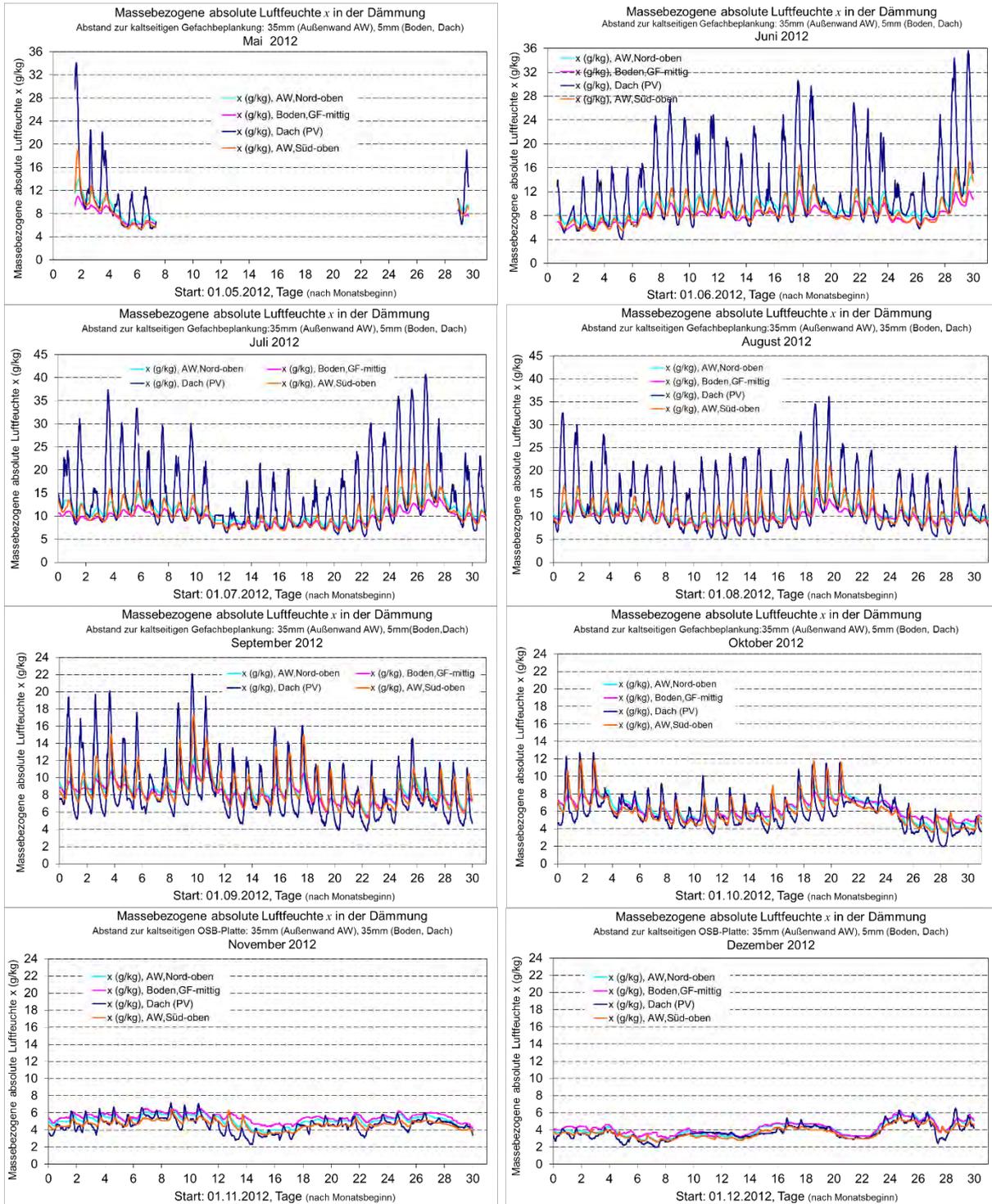


BILD 9-60 MASSEBEZOGENE ABSOLUTE LUFTFEUCHTE IN DER GEFACHDÄMMUNG DER AUßENWAND, DER BODENPATTE UND DES DACHES VON MAI 2012 BIS DEZEMBER 2012

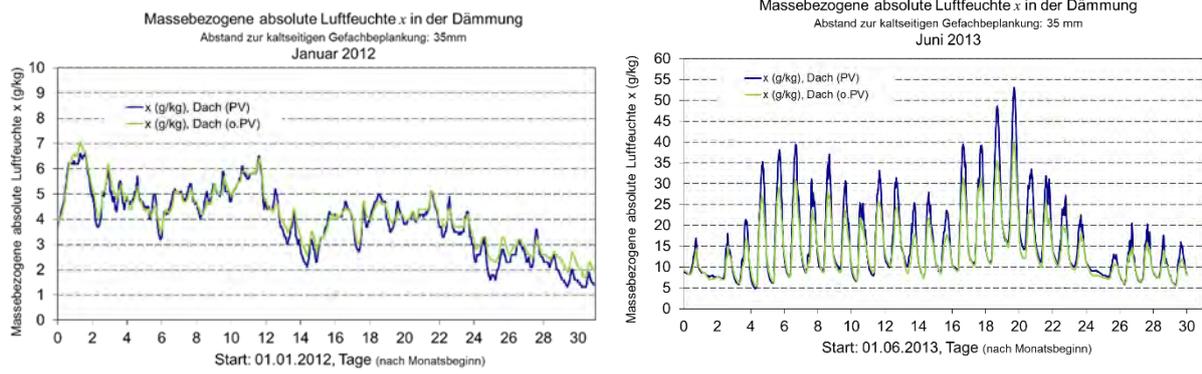


BILD 9-61 MASSEBEZOGENE ABSOLUTE LUFTFEUCHTE IN DER GEFACHDÄMMUNG DES DACHES IM BEREICH DER PV-ELEMENTE UND AUßERHALB DAVON IM JANUAR 2012 UND JUNI 2013