

Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale) als Nullenergiehaus in Holzbauweise

# **Abschlussbericht** Teil 6: Baukonstruktion

Prof. Dr.-Ing. K. Jagnow Dipl.-Ing. (FH) K. Gebhardt, M. Eng.

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Verfassern.

Magdeburg, September 2018

unter dem Förderkennzeichen FKZ 03274300 gefördert durch das:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

# **Impressum**

## Projektförderung:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen FKZ 0327430O Im Förderprogramm Energieoptimiertes Bauen (EnOB) – EnEff: Schule

#### Projektträger:

Projektträger Jülich (PTJ) Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich

## Projektlaufzeit:

01.04.2013 - 31.03.2018

# Fördermittelnehmer und Forschungskooperationspartner:



Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg Max-Josef-Metzger-Str. 1 39104 Magdeburg

#### Verantwortliche Berichtverfasser:



Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng. Fachbereich Wasser, Bau, Umwelt und Sicherheit Hochschule Magdeburg-Stendal Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg

## Projektbearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.

Sascha Gauer, M. Eng. Dipl.-Ing. (FH) Uwe Gebhardt, M. Eng. Lisa Haferung, M. Eng.

#### **Datenstand:**

Magdeburg, 30.09.2018

Dimitri Kleer, B. Eng. Melanie Münch, M. Eng. Robert Schulze, M. Eng. Maike Strahlendorff, M. Eng. Song, Jianbang, M. Eng. Philipp Weingart, M. Eng.

# Inhalt

Impressum3			
1	Zusammenfassung	7	
<b>2</b> 2.1	Konstruktion		
2.2	Innenwände		
2.3	Dach		
2.4	Innendecken	30	
2.5	Gründung und Bodenplatte		
2.6	Kastenfenster		
2.7	Pfosten-Riegel-Fassade		
2.8	Außentüren		
2.9	Treppenhäuser und Treppen		
3	Wärmedurchgangskoeffizienten	47	
3.1	Berechnungsergebnisse		
3.2	Messorte und Messtechnik		
3.3	Auswertung Bodenplatte		
3.4 3.5	Auswertung Außenwand Standard		
3.5 3.6	Auswertung DachProbleme und Verbesserungsansätze		
3.7	Verallgemeinerung und Fazit		
4	Wärmebrücken		
<del>4</del> 4.1	Überblick vorhandener Details		
4.1 4.2	Simulationsergebnisse		
4.2 4.3	Ausgewählte Details		
4.4	Probleme und Verbesserungsansätze		
4.5	Verallgemeinerung und Fazit		
5	Feuchteschutz	83	
5.1	Messorte und Messtechnik		
5.2	Bodenplatte		
5.3	Außenwand	94	
5.4	Dach		
5.5	Verallgemeinerung und Fazit		
6	Gebäudedichtheit		
6.1	Ausgewählte Details		
6.2	Messorte und Messtechnik		
6.3 6.4	Messergebnis		
6.5	Probleme und VerbesserungsansätzeVerallgemeinerung und Fazit		
7	Schallschutz		
<i>r</i> 7.1	Ausgewählte Details		
7.1 7.2	Messorte und Messtechnik		
7.2 7.3	Ergebnisse der Wandmessung zwischen Raum 2.01 und 2.02		
7.3 7.4	Ergebnisse der Wahlumessung zwischen Raum 2.01 und 2.02		
7.5	Ergebnisse der Deckenmessung über dem Raum der Stille		
7.6	Probleme und Verbesserungsansätze		
7.7	Verallgemeinerung und Fazit		
8	Kastenfenster		
8.1	Funktionsbeschreibung		
8.2	Messorte und Messtechnik		
8.3	Ergebnisse Südklassenraum 1.08		
8.4	Ergebnisse Nordklassenraum 2.01		
8.5 8.6	Probleme und VerbesserungsansätzeVerallgemeinerung und Fazit		
U.O	v =   a   y =		

9	PCM	169
9.1	Material- und Lagebeschreibung	169
9.2	Messorte und Messtechnik	
9.3	Ergebnisse Kinderzimmer der Hausmeisterwohnung	171
9.4	Probleme und Verbesserungsansätze	175
9.5	Verallgemeinerung und Fazit	175
10	Anhang	177
10.1	Literatur	177
10.2	Nomenklatur	
10.3	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	180
10.4	Tabelle zu Bestimmung des Holzfeuchtegleichgewichtes	
10.5	Verantwortliche Planer und Ausführende	
10.6	Überblick über separate Anhänge	186

# 1 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wird zunächst die Baukonstruktion der St. Franziskus-Grundschule hinsichtlich ihrer Aufbauten – insbesondere der Gebäudehülle – und der technischen Daten der verwendeten Materialien umfassend beschrieben (Kapitel 2). Weiterhin werden Aussagen zum vorliegenden Wärmedämmstandard getroffen, die berechneten U-Werte entsprechend eingeordnet sowie die im Bauteilquerschnitt gemessenen Temperaturen damit in Bezug gesetzt (Kapitel 3). Aussagen zum architektonischen Entwurf lassen sich in Abschlussbericht 2 nachlesen.

Abschnitt 4 befasst sich detailliert mit dem erfolgten Nachweis der Wärmebrückenfreiheit der Gebäudehülle. Das Thema Feuchteschutz wird darüber hinaus in Abschnitt 5 anhand der Bauteile Bodenplatte, Außenwand und Dach sowohl mit stationären als auch instationären Berechnungen näher beleuchtet. Messtechnische Ergebnisse zeichnen ein Bild der relativen Feuchten in verschiedenen Ebenen der Bauteilquerschnitte.

Maßgeblich für den Feuchte- und Wärmeschutz ist außerdem das Thema der Luftdichtheit, dessen Konzept für die St. Franziskus-Grundschule samt der Ergebnisse der beiden Luftdichtheitsmessungen in Kapitel 6 vorgestellt wird.

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Qualität der Baukonstruktion sind die gemessenen Schallschutzwerte ausgewählter Decken und Wände, die in Abschnitt 7 vorgestellt werden.

Abschließend widmet sich der Bericht der Besonderheit der Kastenfenster mit ihren Vor- und Nachteilen (Kapitel 8) sowie den in einem Kinderzimmer erprobten PCM-Materialien zur Abpufferung von Wärmespitzen (Kapitel 9).

#### Messziele

Für die St. Franziskus-Grundschule in Halle umfasst das Monitoring der Baukonstruktion folgende Teilaspekte:

- Untersuchen des Daches, der Nordwand und der Bodenplatte hinsichtlich erreichter Dämmwirkung, Feuchteverteilung im Bauteil und Luftdichtheit,
- Untersuchung der Kastenfenster in den verschiedenen Jahreszeiten auf erreichte Nutzung von Solarwärme bzw. Schutz vor Überhitzung,
- Untersuchung von zwei baugleichen Kinderzimmern in der Hausmeisterwohnung, wobei eines mit PCM-Deckenplatten (phase change material) ausgestattet ist, welche die sommerliche Überwärmung verzögern sollen.

#### **Baukonstruktion**

Das zur Ausführung gekommene Holzbausystem wurde vom ehemaligen Ingenieurbüro Naumann & Stahr aus Leipzig entwickelt, welches im Zuge der Bauphase Insolvenz anmeldete. Die Bauteile wurden im Werk als Halbfertigteile (einseitig offen) vorgefertigt und auf der Baustelle montiert, geschlossen und später mit Zellulose ausgeblasen.

Das Bausystem der Außenwand basiert auf einem Holzrahmentragwerk mit doppelten Holzträgern in einem Rastermaß von 1,28 m. Die Gurte der Träger bestehen aus Konstruktionsvollholz, der Steg aus einer 30 mm OSB-Platte. OSB-Platten bilden auch die Wandscheiben. Zwischen Trägergurt und der aussteifenden Platte befindet sich eine Dichtung aus Butylkautschuk, weiterhin wird die Luftdichtheit der Plattenstöße durch Dichtbänder hergestellt. Die Gurte der Träger werden zur Wärmebrückenreduzierung mit 30 mm starken Holzweichfaserplatten überdämmt. Gefache und Installationsebene sind vollständig mit Zellulose ausgeblasen.

Die Unterkonstruktion für die raumseitige Bekleidung besteht aus 30 x 80 mm OSB/4-Elementen. Die Wandinnenseite ist mit Fermacell-Gipsfaserplatten doppelt beplankt, dazwischen liegt eine feuchtevariable Dampfbremse (pro clima Intello). Diese war in der Planung des Büros Naumann & Stahr ursprünglich nicht vorgesehen. Nachdem sie aufgrund des beauftragten Feuchteschutzgutachtens im Flachdach zum Einbau empfohlen wurde (siehe Kapitel 2.3), kam sie auch im Wandbereich zum Einsatz.

An der Außenseite weist die Fassade eine hinterlüftete Beplankung mit bunten Faserzementplatten bzw. eine horizontale Thermoholzbekleidung aus Ulme auf. Bei der Unterkonstruktion der Fassadenbekleidung kamen OSB-Streifen zum Einsatz, die Hinterlüftung wird durch eine Unterspannbahn Solitex Fronta Quattro begrenzt.

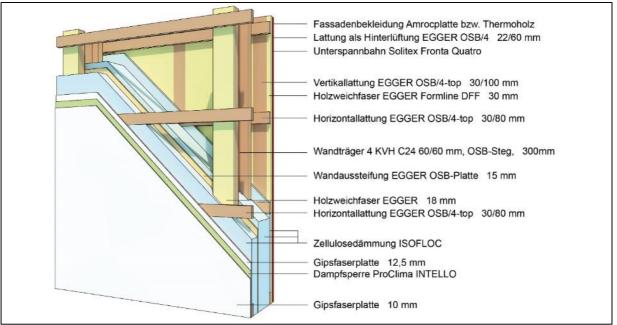


Abbildung 1-1: Detail Außenwand [1]



Abbildung 1-2: Foto Südseite, Gebäudeteil B

Es kommen fünf verschiedene Außenwandtypen vor, die sich in ihrem Aufbau unterscheiden: Außenwand Standard, Brandwand, Verlängerung der Brandwand, Solarkollektorwand und die Außenwand der Verkehrsflächen.

Ähnlich der Außenwände gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Innenwandtypen. Sie unterscheiden sich in nichttragende und tragende Holzbauwände, Gipskarton-Ständerwände und die Stahlbetonwände des Treppenhauses.

Beim Dach handelt es sich um ein bekiestes Flachdach mit einem Gefälle von 2 %. Die Dämmstärken liegen zwischen 40 und 70 cm, als Abdichtung kam das Fabrikat Tectofin GV von Wolfin in 1,5 mm Stärke zum Einsatz.

Innerhalb des oberen Holzrahmenaufbaus mit Zelluloseschicht befinden sich Längs- und Querträger aus Brettschichtholz unterschiedlicher Maße. Der Regelquerschnitt der Längsträger beträgt 100/280 mm, abweichende Querschnitte mit Maßen von 60/280 und 80/280 können je nach Statik vorkommen. Der Querschnitt der Längsträger im Bereich über der Aula beträgt 160/360 mm.

Unterhalb dieser geneigten Trägerebene befindet sich zum Ausgleich eine waagerechte OSB-Lage, welche eine keilförmige Dämmung aus Zellulose (im Mittel 183 mm) aufnimmt.

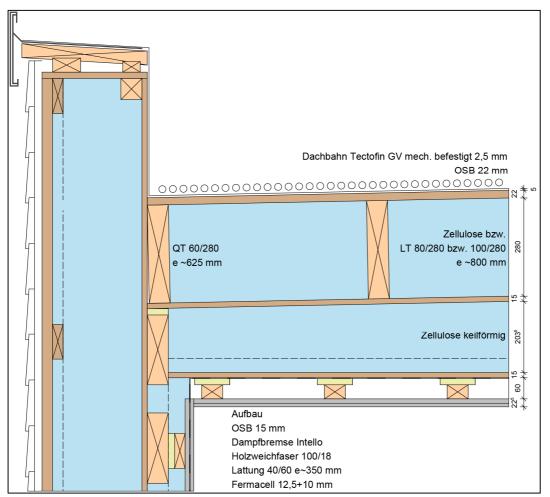


Abbildung 1-3: Detail Dach

Zwei Gipsfaserplatten mit einer Unterkonstruktion bilden die Installationsebene und gleichzeitig den raumseitigen Abschluss. In den Arbeitsbereichen der Klassenräume ist die Deckenunterseite zusätzlich mit Akustikplatten ("Sauerkrautplatte") beplankt.

Es liegt eine Untersuchung der Flachdachkonstruktion im Hinblick auf den klimabedingten Feuchteschutz vor, durch welche der Einbau einer ursprünglich nicht vorgesehenen Dampfbremse (pro clima Intello) initiiert wurde [2], deren Einbau sich daraufhin auch in der Außenwand fortsetzte.

Bei den Innendecken wird zwischen schallentkoppelten Decken und nicht entkoppelten Decken sowie jeweils zwischen F30- und F90-Decken unterschieden, wobei die Deckenstärke zwischen 392,5 mm und 404,5 mm beträgt.

Bei den Geschossdecken über dem EG und dem 1. OG im Gebäudeteil B (Hort und Klassen) und der Decke über dem 1. OG des Gebäudeteils A (Verwaltungstrakt) handelt es sich um schallentkoppelte Decken (außer Erschließungshalle). Im Rahmen des Monitorings wurden die Luftschalldämmung und der Trittschall der Geschossdecke gemessen.

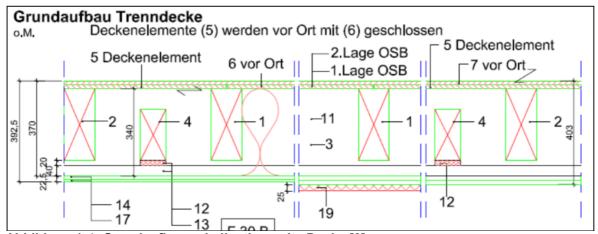


Abbildung 1-4: Grundaufbau schallentkoppelte Decke [3]

Für die Einbringung des Erdwärmeübertragers war ein umfangreicher Erdaushub notwendig. Die Gründung basiert auf Einzelfundamenten, auf die wiederum Streifenfundamente aus Spannbetonhohlplatten zur Aufnahme der Holzbodenplatte aufgelegt wurden.



Abbildung 1-5: Montage der Bodenplatte [4]

Die Baugrube wurde mit Betonrecycling und die Zwischenräume der Fundamente mit Schaumglasschotter verfüllt.

Das Grundprinzip der Bodenplatte ähnelt dem des Daches. In der Zelluloseschicht liegen die Längs- und Querträger aus Brettschichtholz mit Abmessungen der Längsträger von 60 x 280 bis 140 x 280 mm. Die Bodenplatte ist in das Gelände eingesenkt (OK Gelände = OK Rohfußboden). Den senkrechten Abschluss zum Erdreich bildet eine Schicht Faserzementplatten, die auf zwei OSB-Platten mit einer Schicht Wolfin-Folie in der Mitte angeordnet ist. Auf den oberen OSB-Platten sind unterschiedliche Fußbodenbeläge vorgesehen.

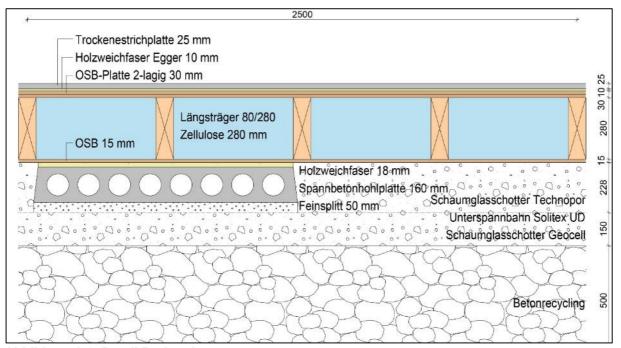


Abbildung 1-6: Detail Bodenplatte

Für den Aufbau der Holzbodenplatte liegt ein externes Gutachten hinsichtlich des klimabedingten Feuchteschutzes vor [5].

Auch die eingesetzten Kastenfenster sind eine Entwicklung des ehemaligen Büros Naumann & Stahr aus Leipzig. Sie kommen in allen Räumen außer der Aula (hier: Pfosten-Riegel-Fassade) zum Einsatz. Die Fenster können jederzeit geöffnet werden. Bei den Kastenfenstern handelt es sich um zwei zweifach- und wärmeschutzverglaste Flügel, sodass insgesamt eine Vierfachverglasung vorliegt. Das am häufigsten vorkommende Öffnungsmaß beträgt 2,53 x 1,86 m (vierflügelig) bzw. 1,25 x 1,86 m (zweiflügelig).



Abbildung 1-7: Links: Kastenfenster; Rechts: Pfosten-Riegel-Fassade Aula

# Wärmedurchgangskoeffizienten und Temperaturmessungen im Bauteil

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der opaken Außenbauteile liegen auf Passivhausniveau zwischen 0,10 und 0,13 W/(m²K) – etwa doppelt so gut wie nach geltender EnEV gefordert. Lediglich die Solarwand übersteigt die Anforderungen an Passivhausstandard.

Tabelle 1-1: Übersicht der Wärmedurchgangskoeffizienten

Bauteil	U-Wert St. Franziskus- Grundschule [W/m²K]	Vergleichswert (EnEV 2016) [W/m²K]	Vergleichswert (Passivhaus- Anforderung) [W/m²K]
Bodenplatte	0,092	0,35	0,15
Bodenplatte Treppenhaus	0,125	0,35	0,15
Außenwand Standard	0,117	0,28	0,15
Außenwand Brandwand	0,110	0,28	0,15
Außenwand in Verlängerung der Brandwand	0,103	0,28	0,15
Außenwand als Solarwand	0,161	0,28	0,15
Dach	0,104	0,20	0,15
Dach an Balkon	0,135	0,20	0,15

Die Bauteilmessungen erfolgten an der Außenwand Nord (Abbildung 3-5) und dem Dach im Klassenraum 201 mit Sensoren des Typs HYT. Die Messung der Bodenplatte erfolgt im Stromanschlussraum 004. Für die Messungen im Erdreich kamen Temperatursensoren vom Typ LM 75 zum Einsatz, für Messungen innerhalb der Bauteilschichten und für das Raumklima Sensoren vom Typ HYT.

Das Monitoring des Temperaturverlaufs in den Bauteilen zeigte keine Probleme und bestätigt die guten U-Werte. Es ist von korrekter und korrekt wirkender Dämmung und Dichtung auszugehen. Die gewählte Holzrahmenkonstruktion kann hinsichtlich ihrer wärmeschutztechnischen Eigenschaften wieder so errichtet werden und eignet sich hervorragend, um die Anforderungen an die Passivhausbauweise zu erfüllen.

Für die Nutzung als Schule sei gesagt, dass aufgrund der sehr hohen inneren Wärmequellen/Wärmelasten während der Belegungszeit in Kombination mit den solaren Gewinnen auch während der Heizperiode in den südorientierten Klassenräumen eher ein Wärmeüberangebot vorherrschte. In diesem Bereich wäre sogar aus winterlicher Sicht ein geringerer Wärmedämmstandard denkbar gewesen. Mit den Ergebnissen der Untersuchungen zu den Raumlufttemperaturen befasst sich der Abschlussbericht Teil 5 ausführlich.

#### Wärmebrücken

Für das Holzbausystem lag während der Planungsphase ein Zertifikat des Passivhausinstitutes Darmstadt als "Passivhaus geeignete Komponente – wärmebrückenfreier Anschluss" vor. Durch die Insolvenz des Fachplaners sind während der Bauphase sämtliche Wärmebrückenberechnungen für das Projekt verloren gegangen sowie das Zertifikat des Passivhausinstitutes erloschen. Es war zwar bekannt, dass die Konstruktionsdetails aus energetischer Sicht hochwertig sind, jedoch mangelte es an einer konkreten Verifizierung des Wärmebrückenzuschlages  $\Delta U_{WB}$ .

Für den korrekten Ansatz des Wärmebrückenzuschlags in der Energiebilanzierung des Gebäudes wurden diese Daten im Rahmen einer Masterarbeit [1] wiederhergestellt.

Die Zusammenstellung der Ergebnisse für alle 60 betrachteten Wärmebrücken ergab einen spezifischen Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$  von -0,001 W/(m²K), was einem hervorragenden Wert entspricht.

# Feuchteschutz und relative Feuchten im Bauteilquerschnitt

Zunächst wurden stationäre Berechnungen mit Hilfe der Software DÄMMWERK vorgenommen, instationäre Berechnungen erfolgten mit WUFI. Dies fand stets sowohl für den Gefachals auch für den Rahmenanteil statt. Bei instationären Temperatur- und Feuchteberechnungen wird mit realen Bedingungen und folglich mit schwankenden Temperaturen für das Innen- wie Außenklima sowie Aufheiz- und Abkühlvorgängen gerechnet. Die Wärmeleitung wird genauso wie Sonnenstrahlung berücksichtigt. Während bei der stationären Berechnung nur die Wasserdampfdiffusion berücksichtigt wird, werden bei der instationären Berechnung auch die Kapillarleitung und Oberflächendiffusion berücksichtigt.

Neben der Auswertung der Bauteiltemperaturen erfolgte auch eine eingehende Betrachtung der Bauteilfeuchten für die Regelbauteile Bodenplatte, Außenwand (Standard) und Dach.

Die Berechnungen zur Bodenplatte ergaben zunächst, dass diese tauwassersicher konstruiert ist. Die Messergebnisse der Bodenplatte liegen jedoch höher als die Simulationswerte. Die Ursache ist nicht bekannt. Da ein Messfühler ab Dezember 2016 einen unplausiblen Verlauf zeigt, liegt u. U. allgemein ein messtechnisches Problem vor.

Ob die hohen relativen Feuchten innerhalb der Bodenplatte darauf zurückzuführen sind, dass auf eine Abdichtung nach DIN 18195-4 verzichtet und lediglich eine Unterspannbahn gegen aufsteigende Feuchte eingebracht wurde, kann nicht abschließend geklärt werden. Ein weiteres kritisches Detail ist der geländegleiche Einbau mit OK Gelände = OK Rohfußboden, bei dem die Stirnseiten des Holzbauteils gegen seitlich eindringendes Niederschlagswasser abgedichtet sein müssen. (Abbildung 2-34) Es wird empfohlen, die bauphysikalischen Gegebenheiten innerhalb der Bodenplatte auch in den Folgejahren nach Ablauf des Monitoringprojektes zu beobachten.

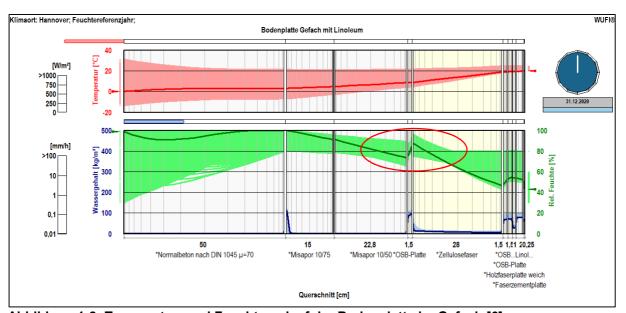


Abbildung 1-8: Temperatur- und Feuchteverlauf der Bodenplatte im Gefach [6]

Das Monitoring des Feuchteverlaufs in der Außenwand bestätigt einen sicheren Bauteilaufbau, welcher hinsichtlich der feuchteschutztechnischen Eigenschaften wieder so errichtet werden kann.

Beim Schichtenaufbau der Außenwand Standard ist kritisch anzumerken, dass die Dampfbremse pro clima Intello zwischen den beiden Gipsfaserplatten raumseitig der Installationsebene liegt.

Dadurch ist eine Beschädigung der Dampfbremse durch den Einsatz von Öffnungen, wie zum Beispiel Steckdosen, unvermeidbar. Dies widerspricht dem Sinn und Zweck einer Luftdichtheitsebene und ist grundsätzlich zu vermeiden, um das Einströmen feuchter Raumluft in den Bauteilguerschnitt zu unterbinden.

Mit dem Glaserverfahren wurde deshalb überprüft, ob ein Verzicht auf die Dampfbremse für das untersuchte Bauteil nachteilig gewesen wäre. Im Ergebnis zeigt sich, dass das Bauteil auch ohne den Einbau der Dampfbremse tauwassersicher funktioniert hätte.

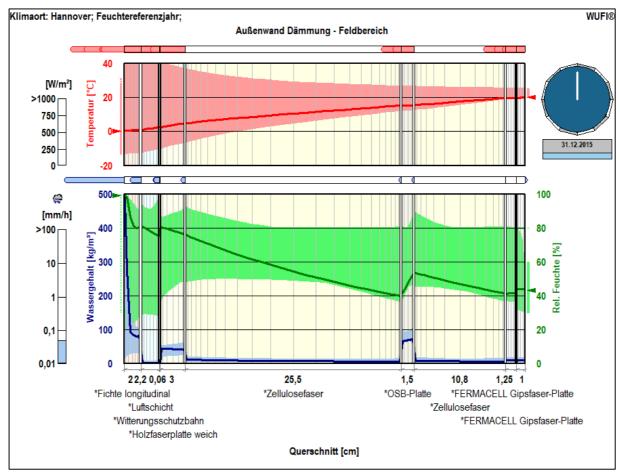


Abbildung 1-9: Temperatur- und Feuchteverlauf der holzverkleideten Außenwand im Gefach [6]

Die Simulation des Daches mit WUFI ergab Wassergehalte im Bereich der oberen OSB-Lage mit zeitweise 19,5 Masse-%, welche als grenzwertig hoch einzustufen sind. Insgesamt bleiben die Werte unter den kritischen 20 Masse-%. Es kann jedoch seitens des Monitorings keine Aussage über die reale Einbaufeuchte der kritischen OSB-Lage des Daches getroffen werden (Annahme: 15 Masse-%). Lag diese zum Zeitpunkt der Bauausführung schon höher oder war sie feuchter Witterung ausgesetzt, so kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Feuchtigkeit nicht ausreichend austrocknen kann und dies zu Holzschädigungen führt.

Im Hinblick auf die Empfehlungen für unbelüftete Flachdächer in Holzbauweise [7] erfüllt das Dach die Anforderung: der  $s_d$ -Wert raumseitig der Dämmung fällt dank der feuchteadaptiven Dampfbremse (deutlich) kleiner als 100 m aus und die sommerliche Umkehrdiffusion zur Austrocknung nach innen ist möglich. Darüber hinaus gibt es keine bekannten, unkontrollierbaren Hohlräume und eine geprüfte Luftdichtheit. Deckschichten wie die vorhandene Bekiesung oder andere Verschattungen (Solarmodule) werden jedoch nicht empfohlen, die Strahlungsabsorption der Dachhaut sollte a  $\geq$  80 % betragen, was hier nicht gegeben ist.

Dass die Dachhaut tatsächlich keine Sonneneinstrahlung absorbiert, zeigt sich daran, dass die Temperaturen in der oberen OSB-Lage ganzjährig in etwa den Außentemperaturen entsprechen oder max. 4 K darüber liegen. Die Bekiesung verhindert messbar eine Erwärmung der Dachhaut durch Sonneneinstrahlung.

Ob die Holzfeuchten von Tragwerk und Schalung dokumentiert wurden, ist nicht bekannt. Dies sei bei Folgeprojekten dringend empfohlen.

Die gemessenen Feuchtewerte bestätigen die Befürchtungen zunächst nicht. Der Dachaufbau sollte nach Projektablauf jedoch unbedingt messtechnisch weiterverfolgt werden. Die Messwerte in der oberen OSB-Lage sind derzeit unbedenklich, entscheidend ist jedoch die bauschadensfreie Entwicklung über die kommenden Jahre. Ggf. sollte an geeigneter Stelle durch eine Bauteilöffnung die Bauteilfeuchte an den kritischen Ebenen (obere OSB-Lage) nachgemessen werden.

Positiv ist in jedem Fall, dass die hervorragenden Ergebnisse der Luftdichtheitsprüfung einen Feuchteeintrag durch Konvektion sehr unwahrscheinlich machen. Die berechneten Feuchtegehalte des Flachdaches zeigen jedoch, wie wenig Spielraum bei Flachdachaufbauten dieser Art bleibt.

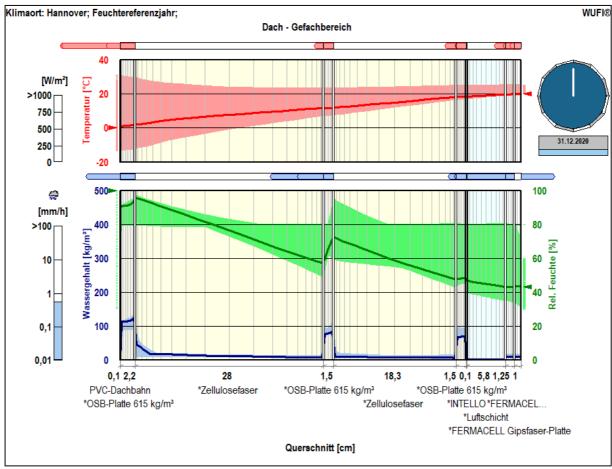


Abbildung 1-10: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach - Gefachanteil [6]

Luftdichtheit

Die Luftdichtheitsebene wird im Wand-, Boden und Deckenbereich durch OSB-Platten raumseitig der Dämmung gebildet. Um die luftdichte Ebene nicht durch haustechnische Durchdringungen (Rohre, Kabel, Steckdosen etc.) zu beschädigen, wurde eine raumseitige Installationsebene vorgesehen, welche ebenfalls mit Zellulose gedämmt und mit Gipsfaserplatten bekleidet wurde.

Die Fugen an den Plattenstößen, Decken- und Dachanschlüssen sowie an Fenster- und Türanschlüssen wurden mit einem 6 cm breiten Dichtband luftdicht verklebt. Die Anbindung der OSB-Platten an die Träger der Außenwand erfolgte durch eine vernagelte Pressfuge, in die eine Butylkautschukdichtung eingelegt ist.

Um die Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit zu überprüfen, wurde drei Jahre nach Baufertigstellung eine erneute Differenzdruckmessung des Gebäudes durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Messungen liegen sehr dicht beieinander:

Messung am 28.01.2014:  $n_{50} = 0.24$  1/h (Baufertigstellung)

Messung am 06.01.2017:  $n_{50} = 0.26 \text{ 1/h}$  (Nachmessung im Rahmen des Monitorings)

Die Gebäudehülle der St. Franziskus Grundschule in Halle (Saale) weist für die vorhandene Hüllfläche von 4.610 m² während des konstanten Unterdruckes von 50 Pascal wenige Leckagen auf. Es gibt keine nennenswerten Veränderungen, beide Ergebnisse liegen weit unter den Anforderungen an Passivhäuser mit  $n_{50} < 0,60$  1/h und verdeutlichen das gute Luftdichtheitskonzept der Planer. Das Holzbausystem hat sich hinsichtlich der Qualität der Planung und der Ausführung als sehr anspruchsvoll und aus jetziger Sicht dauerhaft erwiesen.

#### **Schallschutz**

Am 14. Oktober 2016 wurde im Rahmen des Monitorings das Luftschalldämmmaß von ausgewählten Wänden und Decken gemessen. Eine Trittschallmessung komplettierte die Untersuchungen. Folgende Bauteile wurden gemessen:

- die Wand zwischen den Klassenräumen 2.01 und 2.02
- die Decke zwischen den Klassenräumen 2.01 und 1.01 (auch Trittschallmessung)
- die Decke zwischen dem Raum der Stille und dem oberseitigen Kunstraum 2.14

Das bewertete Schalldämmmaß der schallentkoppelten Innenwand zwischen Raum 1.01 und 1.02 beträgt  $R'_w$  = 54 dB > 47 dB. Damit erfüllt die Wand einen hohen Schallschutzstandard.

Auch die schallentkoppelte Decke zwischen Raum 1.01 und 2.01 erfüllt mit einem bewerteten Schalldämmmaß von  $R'_w = 65 \text{ dB}$  den Anforderungswert von 55 dB bei weitem. Die Decke über dem Raum der Stille bestätigt diese hervorragende Ausführung auf ähnliche Weise – hier lag der gemessene Wert bei  $R'_w = 63 \text{ dB}$ .

Hinsichtlich des Trittschalls wurde ein guter Standard erreicht. Der bewertete Norm-Trittschallpegel der Decke ist mit **L**'<sub>n,w</sub> = **52 dB** kleiner als der zulässige Pegel von 53 dB.

Alle gemessenen Bauteile sind demnach sehr gutschallgedämmt.

#### Kastenfenster

Das Konzept der Kastenfenster basiert im Wesentlichen auf zwei Einstellungsmöglichkeiten der Öffnungsflügel: Der Sommerbetrieb sieht eine Öffnung des äußeren Flügels vor, um Stauwärme im Kasten zu vermeiden. Der Winterbetrieb setzt auf eine Öffnung des inneren Flügels, um Wärmeeinträge aus dem Kastenbereich für den Raum nutzen zu können. Jegliche Öffnung der Fenster hat manuell zu erfolgen.

Im Kastenbereich befindet sich am inneren Flügel eine elektrisch angetriebene mit einer Lamellenbreite von 25 mm. Wird der innere Fensterflügel geöffnet, bewegt sich demnach auch die Verschattung mit. Mit dieser Anordnung wird die Verschattungsanlage vor Witterungseinflüssen geschützt. Die Jalousetten weisen eine Absorberseite (schwarz) und eine Reflektorseite (reflektierend) auf, sodass entsprechend der Kippstellung der Lamellen die Sonneneinstrahlung absorbiert bzw. reflektiert werden kann.

Im Sommer soll die metallisch reflektierende Oberfläche zum Tragen kommen, welche den Wärmeeintrag in den Innenraum mindert. Um die solaren Gewinne im Winterfall zu generieren, soll die schwarze Oberfläche nach außen positioniert werden, um die Wärme zu absorbieren.

Ziel war die Messung der Zwischenraumtemperatur im Kastenbereich und der Abgleich mit dem Öffnungszustand der Fenster (Fensterkontakte), um Aussagen über die Nutzung des Wintergarteneffektes treffen zu können.

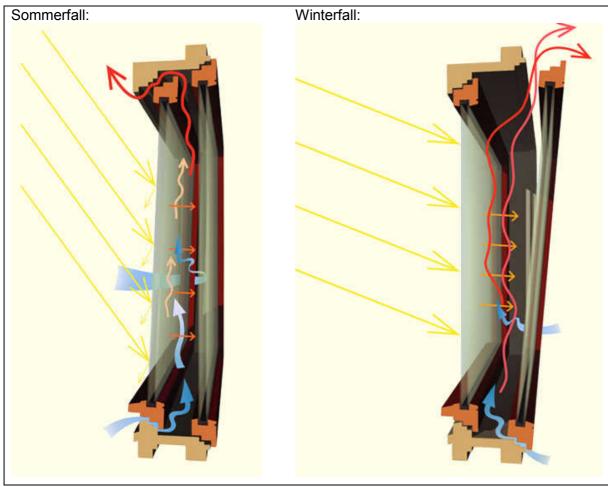


Abbildung 1-11: Links: Sommerfall, Rechts: Winterfall [3]

Die winterliche Wärmepufferung des Fensterkastens ist messtechnisch nachweisbar. Kritisch ist der Sommerfall: wird das äußere Fenster nicht rechtzeitig geöffnet, steigt die Temperatur im Kasten auf so hohe Werte (> 60 °C), dass die Fenstergriffe des äußeren Flügels nicht mehr gefahrlos angefasst werden können. Dieser Fall tritt auch an sehr sonnigen Wintertagen auf.

Hinsichtlich der Ausnutzung des Wintergarteneffektes (Winter) oder des Abführens von Stauwärme (Sommer) kann den Lehrern ein ständiges Öffnen und Schließen nach Wetterlage nicht zugemutet werden. Der Realbetrieb sieht daher so aus, dass der Hausmeister mit dem pauschalen Öffnen der Außenflügel im Frühjahr den Sommer einleitet – unabhängig vom wirklichen Bedarf. Im Herbst erfolgt die Einstellung auf den Winterfall. Die Nutzer sind hinsichtlich eigenmächtiger Veränderungen dieser Einstellungen verunsichert. Nicht alle haben das energetische Prinzip der Kastenfenster verstanden. Eine Automatisierung wäre jedoch viel zu aufwändig.

Es ist zu beobachten, dass die Temperaturen im Kastenbereich der südorientierten Fenster (Messung in Raum 1.08) sehr viel höher als die Temperaturen der Fenster in Nordrichtung (Messung in Raum 2.01) sind. Der Wintergarteneffekt tritt im nordorientierten Bereich praktisch nicht auf, weshalb die Einstellungen für den Sommer- bzw. Winterfall hier kaum relevant sind.

Es gibt keine signifikanten Unterschiede der Temperaturen vom oberen zum unteren Teil des Fensters. Lediglich zwischen links und rechts gibt es kleinere Temperaturunterschiede innerhalb der Fenster. Als mögliche Ursachen sind dabei der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf das Fenster und eventuelle Verschattungen zu benennen.

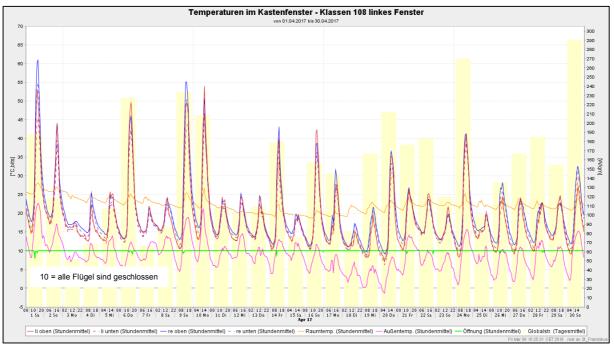


Abbildung 1-12: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 108 linkes Fenster – April 2017

Die Empfehlung zur Nachahmung der Kastenfenster ist zwiegespalten. Die Kastenfenster werden durch die Größe der Fensterflügel und ihr hohes Gewicht nach Aussage der Nutzer ungern bedient. Dies bestätigt auch das Monitoring des Fensteröffnungsverhaltens, welches teilweise über mehrere Wochen keine Bedienung der Fenster registriert. Positiv ist, dass aufgrund der maschinellen Lüftung eine häufige manuelle Bedienung der Fenster nicht zwingend notwendig ist. Grundsätzlich ist es zu begrüßen und in Folgeprojekten unbedingt zu empfehlen, dass das Öffnen der Fenster trotz der Passivhausbauweise ermöglicht wird. Dies trägt maßgeblich zur Nutzerzufriedenheit bei. Eine anderslautende Darstellung in der Lokalpresse, in der der Journalist zum Zeitpunkt des Einzuges über die Schule berichtete, man dürfe die Fenster nicht öffnen, führte zu vielen Nachfragen durch besorgte Eltern und zu langanhaltender Verunsicherung in der Lehrerschaft.

In Gebäuden ohne Lüftungstechnik wäre der gewählte Fensteraufbau hinsichtlich der Bedienerfreundlichkeit nicht nur aufgrund der Größe und des Gewichtes weniger zu empfehlen, sondern auch aufgrund der Notwendigkeit, stets Innen- und Außenflügel bedienen zu müssen.

Zwar sind großformatige Fenster bezüglich der Investitionskosten von Vorteil. Hinsichtlich der in der St. Franziskus-Grundschule vorhandenen Flügelbreite von ca. 1,25 m berichteten die Schüler jedoch, dass bei Stoßlüftungen die Gefahr besteht, dass sich die Nutzer an den in den Raum ragenden Flügeln stoßen. In Folgeprojekten, deren Lüftungskonzept eine manuelle Fensterlüftung (auch anteilig) vorsieht, sollte es daher einen ausgewogenen Mix aus breiten und schmalen Öffnungsflügeln geben, die leicht bedienbar sind und nicht weit in den Raum schwenken. Dies verbessert auch die Möglichkeit, die Schule im Sommer auch durch natürliche Belüftung anstelle der mechanischen Belüftung mit Frischluft zu versorgen.

Nachteilig bei zusätzlichen Unterteilungen der Fensterflächen ist jedoch, dass sich durch die Zunahme des Randverbundes die Wärmebrückenverluste der Fenster erhöhen und durch einen höheren Rahmenanteil die transparente Fläche verkleinert.

Der Fensterkastenbereich ist leider so konstruiert, dass bei einigen Fenstern das Schließen des Innenflügels auch zu einem Zudrücken des Außenflügels führt. Der lichte Abstand zwischen dem Innenflügel und dem Griff des Außenflügels ist so knapp bemessen (für den Griff gibt es sogar eigens eine Aussparung im Rahmen des Innenflügels), dass er bei Maßtoleranzen vereinzelt nicht ausreicht und der Außenflügel ungewollt zufällt. Würde man bei Folgeprojekten mit diesem Bausystem eine Verbreiterung des Fensterkastens anstreben, müsste man jedoch schon am Grundaufbau der Außenwand ansetzen, da der äußere Flügel bereits außen bündig und der innere Flügel bereits innen bündig (mit der Luftdichtheitsebene) sitzt.

Positiv ist, dass der Fensterkasten die Jalousie vor Wind und Vandalismus schützt. Jedoch schränkt er damit die Wahl und die Dimension des Sonnenschutzes entsprechend ein. Die Nutzer hätten sich Jalousien mit einer größeren Lamellenbreite gewünscht, da diese auch maßgeblich für die entstehenden Zwischenräume – und somit den Blick nach außen – in waagerechter Lamellenstellung ist. Dass dieser Außenbezug maßgeblich für die Nutzerzufriedenheit ist, zeigt sich auch in der Kritik, dass die Lamellen zur Vermeidung von thermischen Spannungen im Glas nicht halbhoch gefahren werden dürfen. Grundsätzlich sollte der gewählte Sonnenschutz hier keine Einschränkungen zur Folge haben.

#### **PCM**

Als Phase Change Material (PCM) kam das Fabrikat Alba balance der Firma Rigips zur Ausführung. Hierbei handelt es sich um 25 mm starke Vollgipsplatten mit eingelassenen Paraffinen. Die Wärmespeicherkapazität c<sub>wirk</sub> beträgt 83 Wh/m² entsprechend 300 kJ/m². [8] Die PCM-Platten wurden im Kinderzimmer 2.27 vollflächig an der Decke (15 m²) und den Wänden (44,5 m²) als innere Beplankung verbaut.

Ziel ist es, durch die Aggregatzustandsänderung der Paraffine bei einem Schmelzpunkt von 23 °C thermische Energie aufzunehmen und Temperaturspitzen abzufangen (Peakshifting), bis der Prozess abgeschlossen ist.

Die Messergebnisse haben für den Raum mit PCM-Decke im gesamten Jahresverlauf überwiegend geringere Raumtemperaturen gezeigt als im Referenzraum. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Platten im Bereich des Phasenübergangs über längere Zeit ihre Temperatur konstant gehalten haben und das Prinzip der latenten Wärmespeicherung grundsätzlich funktioniert.

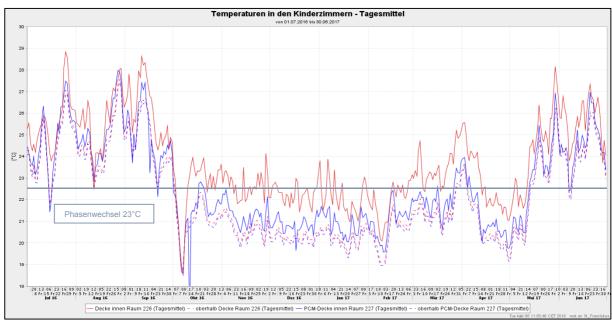


Abbildung 1-13: Deckentemperaturen in den Kinderzimmern, 01.07.16 - 30.06.17 - Tagesmittel

# 2 Konstruktion

Dieses Kapitel beschreibt die einzelnen Komponenten der Gebäudehülle und raumabschließenden Bauteile hinsichtlich ihrer Aufbauten und der technischen Daten ihrer Materialien (siehe Anhang A). Es wird zudem darauf eingegangen, welche Änderungen sich während der Bauphase ergaben.

## 2.1 Außenwände

Das zur Ausführung gekommene Holzbausystem wurde vom ehemaligen Ingenieurbüro Naumann & Stahr aus Leipzig entwickelt. Die Bauteile wurden im Werk als Halbfertigteile (einseitig offen) vorgefertigt und auf der Baustelle montiert, geschlossen und später mit Zellulose ausgeblasen. Einen Systemschnitt zeigt Abbildung 2-1.

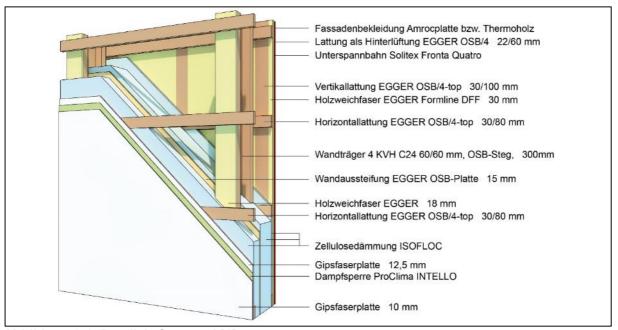


Abbildung 2-1: Detail Außenwand [1]

Das Bausystem basiert auf einem Holzrahmentragwerk mit doppelten Holzträgern in einem Rastermaß von 1,28 m. Die Gurte der Träger bestehen aus Konstruktionsvollholz der Festigkeitsklasse C24 (KVH C24), der Steg aus einer OSB-Platte von 30 mm Dicke. OSB-Platten des Fabrikates Egger Eurostrand (Klasse OSB/4), die an der Innenseite des Innengurtes des Trägers vernagelt sind, stellen die Wandscheiben dar.

Zwischen Trägergurt und der aussteifenden OSB-Platte befindet sich eine Dichtung aus Butylkautschuk. Die Luftdichtheit der Plattenstöße wird durch Dichtbänder des Fabrikates Tescon No.1 hergestellt. Die Gurte der Träger werden zur Wärmebrückenreduzierung mit 30 mm starken Holzweichfaserplatten überdämmt.

Die Gefache im Wandinneren sowie in der Installationsebene sind vollständig mit Zellulose (Fa. Isofloc) ausgeblasen.

Die Unterkonstruktion für die raumseitige Bekleidung besteht aus 30 x 80 mm OSB/4-Elementen. Die Wandinnenseite ist mit Fermacell-Gipsfaserplatten doppelt beplankt, dazwischen liegt eine feuchtevariable Dampfbremse (pro clima Intello). Diese war in der Planung des Büros Naumann & Stahr ursprünglich nicht vorgesehen. Nachdem sie aufgrund des beauftragten Feuchteschutzgutachtens im Flachdach zum Einbau empfohlen wurde (siehe Kapitel 2.3), kam sie auch im Wandbereich zum Einsatz.

Ein weiterer Unterschied gegenüber den Planungsdetails des Büros Naumann & Stahr ist, dass die Fassadenbekleidung aus Thermoholz nun hinterlüftet ausgeführt wurde (anstelle einer vollflächigen Holzweichfaserdämmung).



Abbildung 2-2: Außenwand im Bereich einer Fensterbrüstung [4]



Abbildung 2-3: Außenwand im Bereich des Fußpunktes [4]

An der Außenseite weist die Fassade eine hinterlüftete Beplankung mit bunten Faserzementplatten vom Fabrikat AMROC Color Finish 12 mm (befestigt mit Fassadenschrauben TW-S-D  $12-4.8 \times 44$ ) bzw. eine horizontale Thermoholzbekleidung aus Ulme mit Firstwood Fassadenprofilen auf.

Bei der Unterkonstruktion kamen OSB Platten der Fa. Kronoply der Klasse OSB/4 zum Einsatz, bei der Unterspannbahn handelt es sich um eine Solitex Fronta Quattro.



Abbildung 2-4: Foto Südseite, Bauteil B

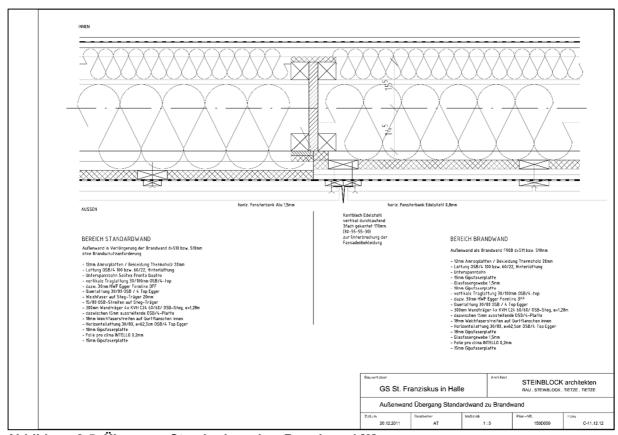


Abbildung 2-5: Übergang Standardwand zu Brandwand [9]

Die Wandaufbauten der Außenwand unterscheiden sich im Aufbau minimal. Eine Übersicht über die Anordnung gibt Abbildung 2-6.



Abbildung 2-6: Anordnung der verschiedenen Außenwandtypen [10]

In den Verkehrsflächen (gelb) ist der untere Sockelbereich bis zu einer Höhe von 90 cm mit einer 8 mm starken, bedruckten Eternitplatte versehen, ansonsten ist der Wandaufbau identisch mit der normalen Wand (grün).



Abbildung 2-7: Sockelbereiche mit bedruckten Eternitplatten

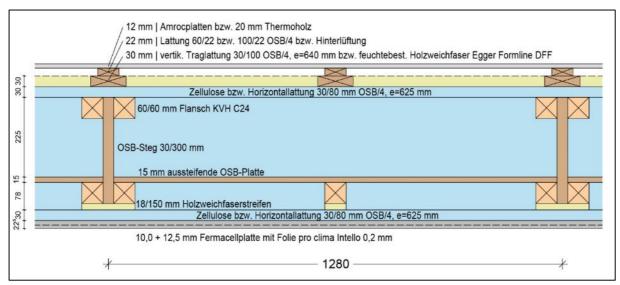


Abbildung 2-8: Detail Außenwand

Im Treffpunkt der beiden Gebäudeteile befindet sich die Brandwand (blau in Abbildung 2-6). Diese unterscheidet sich im Aufbau zur normalen Außenwand durch eine zusätzliche Glasfasergewebeschicht (1,5 mm) zwischen den Gipsfaserplatten der Innenseite sowie auf der Außenseite durch zwei Gipsfaserzementplatten (15 bzw. 18 mm). Zwischen diesen ist eine Schicht Glasfasergewebe (1,5 mm) integriert. Infolge der zusätzlichen Schichten ergibt sich eine veränderte Schichtstärke von 511 mm im Bereich der Amroc-Platten und 519 mm im Bereich des Thermoholzes. (siehe Abbildung 2-9)

Bezüglich der Brandwand in Holzbauweise bestanden sogar noch nach Baubeginn scheinbar unüberbrückbare Differenzen mit der Stadt Halle, welche eine massive Brandwand einforderte. Glücklicherweise konnte eine Lösung gefunden und ein drohender Baustopp abgewendet werden.

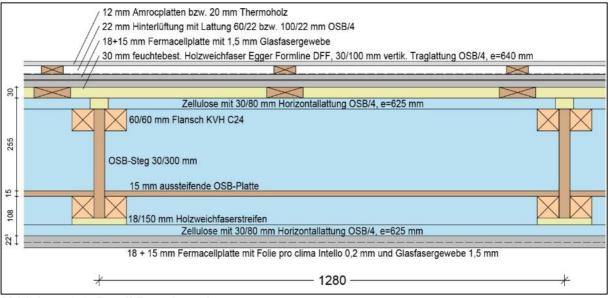


Abbildung 2-9: Detail Brandwand

Um die Außenwand absatzfrei bis zur Gebäudeaußenecke fortführen zu können, unterscheidet sich die Verlängerung der Brandwand (rot in Abbildung 2-6) nochmals vom normalen Wandaufbau (grün in Abbildung 2-6), siehe Abbildung 2-10. Gegenüber der Brandwand fehlen hier die Gipsfaserzementplatten mit Glasfasergewebe an der Außenseite. Stattdessen ist auf der äußeren Trägergurtseite zusätzlich zur Holzweichfaser eine Schicht OSB-Platte vorgesehen. Die verlängerte Brandwand und die Brandwand sind zur Unterbrechung der Fassadenbekleidung durch ein vertikal durchlaufendes Kantblech aus Edelstahl getrennt.

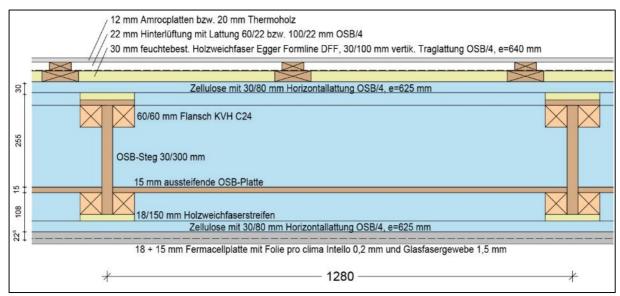


Abbildung 2-10: Detail Verlängerung der Brandwand

Im Bereich der Südfassade der Aula befinden sich wandintegrierte Solarthermiekollektoren. Die Solarfassade an der Gebäudesüdseite hat den in Abbildung 2-11 dargestellten Aufbau.

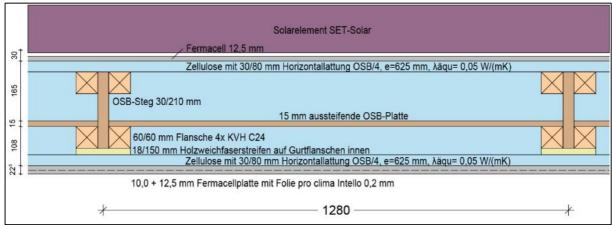


Abbildung 2-11: Detail Solarwand

# 2.2 Innenwände

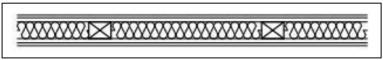
Ähnlich der Außenwände gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Innenwandtypen. Sie unterscheiden sich in nichttragende, tragende Wände, Gipskarton-Ständerwände und die Stahlbetonwände des Treppenhauses. Es werden die in Tabelle 2-1 aufgeführten Innenwandtypen unterschieden.

Tabelle 2-1: Innenwandtypen

Wandbezeichnung	Wanddicke
Innenwand als Brandwand F90B	447 mm
Tragende Innenwand T II	218 mm
Tragende Innenwand T II	198 mm
Nichttragende Innenwand NT I, entkoppelt	200 mm
Nichttragende Innenwand NT II	175 mm
Nichttragende Innenwand NT III	110 mm
Gipskarton-Ständerwand	100 mm
Gipskarton-Ständerwand	200 mm

Bei den Gipskartonwänden kam das System des Herstellers Rigips zum Einsatz.

Es gibt drei verschiedene nichttragende Wände mit Wandstärken von 100, 175 und 200 mm. Die Beplankung der schmalsten nichttragenden Wand NT III (d=100 mm) besteht innen und außen aus jeweils einer 10 mm starken Gipsfaserplatte und einer 15 mm starken OSB/4-Platte. Sie bilden die Begrenzung für die Zelluloseschicht von 60 mm, in der im Raster von 625 mm eine Wandstütze aus KVH C24 mit den Abmessungen 80 x 60 mm liegt – siehe Abbildung 2-12.



# Abbildung 2-12: Innenwand NT III [9]

Die äußere Beplankung des in Abbildung 2-13 dargestellten Wandtyps NT II (d=175 mm) besteht aus zwei Gipsfaserplatten, welche 10 mm und 12,5 mm stark sind. Die innere Beplankung hingegen ist aus einer 15 mm starken OSB/4 und einer 10 mm starken Gipsfaserplatte aufgebaut. Zwischen der äußeren und inneren Beplankung befindet sich eine 128 mm starke Zelluloseschicht. In dieser sind eine horizontale Lattung (NH C24) mit den Maßen 30 x 50 mm und in einem Raster von 625 mm die Wandstützen (KVH C24) vorhanden. Auf letzteren ist ein 18 mm starker Holzweichfaserstreifen vorgesehen.

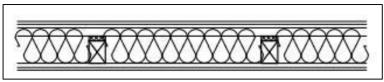


Abbildung 2-13 - Innenwand NT II [9]

In Abbildung 2-14 ist Wandtyp I (d=200 mm) dargestellt. Dieser besteht innen und außen aus jeweils einer 12,5 mm starken Gipsfaserplatte und einer 15 mm starken OSB/4-Platte. Dazwischen befindet sich eine 145 mm starke Schicht Zellulose. In dieser sind im Raster von 625 mm je zwei Wandstützen (KVH C24) mit den Maßen 60 x 80 mm vorgesehen. Die zwei Wandstützen sind um ein kleines Stück versetzt.

Für diese Wand wurde eine Schallschutzmessung durchgeführt (Ergebnisse siehe Kap. 7.3).

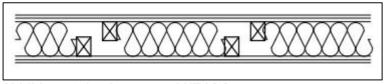


Abbildung 2-14 - Innenwand NT I [9]

Die beiden tragenden Wandtypen T II unterscheiden sich nur in den Schichtstärken (d=218 sowie d=198 mm) und den Abmessungen der Wandstützen. Die äußere Beplankung besteht aus zwei Gipsfaserplatten, welche 10 mm und 12,5 mm stark sind. Die innere Beplankung hingegen ist aus einer 15 mm starken OSB/4 und einer 12,5 mm starken Gipsfaserplatte aufgebaut. Zwischen der äußeren und inneren Beplankung ist eine Schicht Zellulose in zwei Stärken – entweder 168 mm (d=218 mm) oder 148 mm (d=198 mm) – vorhanden. In der Zelluloseschicht ist zudem im Raster von 625 mm eine Wandstütze aus KVH C24 mit einem Holzweichfaserstreifen von 18 mm vorhanden. Die Abmessungen betragen 120 x 120 mm (d=218 mm) oder 100 x 100 mm (d=198 mm).

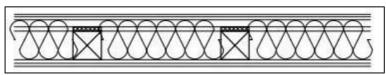


Abbildung 2-15 - Innenwand T II [9]

Nachstehende Abbildung 2-16 zeigt den Aufbau der Gipskarton-Ständerwand, welche sich vor allem in den Sanitärräumen befindet. Es können zwei Ausführungsarten (d=100 mm sowie d=200 mm) unterschieden werden. Der Grundaufbau ist jedoch gleich. Die äußere und innere Beplankung bestehen aus je zwei 12,5 mm starken Gipskartonplatten. Dazwischen befindet sich die Metallständerkonstruktion (50 mm) und in deren Zwischenraum eine 40 mm starke Schicht Mineralwolle.

Bei der Gipskarton-Ständerwand mit einer Schichtstärke von 200 mm kommen zwei Reihen der Metallständer vor. Zwischen den Metallständerkonstruktionen ist ein Raum für Installationen von 50 mm vorhanden.

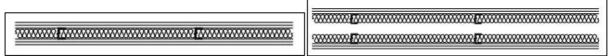


Abbildung 2-16: Links: GK-Ständerwand 100 mm, Rechts: GK-Ständerwand 200 mm

Zwischen der Aula und dem angrenzenden Flur befindet sich eine mobile Trennwand des Fabrikates Dorma-Hüppe Variflex 1.

#### 2.3 Dach

Beim Dach handelt es sich um ein bekiestes Flachdach mit einem Gefälle von 2 % (entspricht  $1,145^{\circ}$ ). Die Dämmstärken liegen zwischen 40 und 70 cm, als Abdichtung kam das Fabrikat Tectofin GV von Wolfin in 1,5 mm Stärke ( $\mu$  =  $20.000 \pm 5.000$ ) zum Einsatz.

Innerhalb des oberen Holzrahmenaufbaus mit Zelluloseschicht befinden sich Längs- und Querträger aus Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 24h unterschiedlicher Maße. Der Regelquerschnitt der Längsträger beträgt 100/280 mm und liegt in einem Raster von 65 bis 75 cm. Vom Regelquerschnitt abweichende Querschnitte mit Maßen von 60/280 und 80/280 können je nach Statik vorkommen. Der Querschnitt der Längsträger im Bereich über der Aula beträgt 160/360 mm. Im Bereich der Terrasse der Hausmeisterwohnung kommen als Längsträger Querschnitte mit dem den Maßen 80/120 mm aus Konstruktionsvollholz vor. Die Querträger bestehen ebenso aus GL 24h mit den Maßen 60/280.

Unterhalb dieser geneigten Trägerebene befindet sich zum Ausgleich eine waagerechte OSB-Lage, welche eine keilförmige Dämmung aus Zellulose (im Mittel 183 mm) aufnimmt.

Tabelle 2-2: Träger des Daches

Träger	Querschnitt	Raster
Längsträger, Regelquerschnitt	100/280 mm	65 bis 75 cm
Längsträger, abweichende Querschnitte	60/280 und 80/280	68 bis 75 cm
Querträger	60/280	
Längsträger im Bereich über der Aula	160/360	61,5 cm
Längsträger im Bereich des Hausmeisterbalkons	80/120	
Unterzüge in Längs- u. Querrichtung, BSH GL 32c	120/480 bis 240/720	

Zwei Gipsfaserplatten mit einer Unterkonstruktion bilden die Installationsebene und gleichzeitig den raumseitigen Abschluss. In den Arbeitsbereichen der Klassenräume ist die Deckenunterseite zusätzlich mit Akustikplatten beplankt (Fabrikat Heradesign der Firma Knauf).

Der Dachaufbau mit seiner PVC-Dachbahn ist nach oben sehr dampfdiffusionsdicht ausgeführt, es gibt keine Hinterlüftung im Bereich der oberen OSB-Schalung. Es liegt eine Untersuchung der Flachdachkonstruktion im Hinblick auf den klimabedingten Feuchteschutz vor, durch welche der Einbau einer ursprünglich nicht vorgesehenen diffusionshemmenden Schicht mit variablem Diffusionswiderstand (pro clima Intello) initiiert wurde [2].

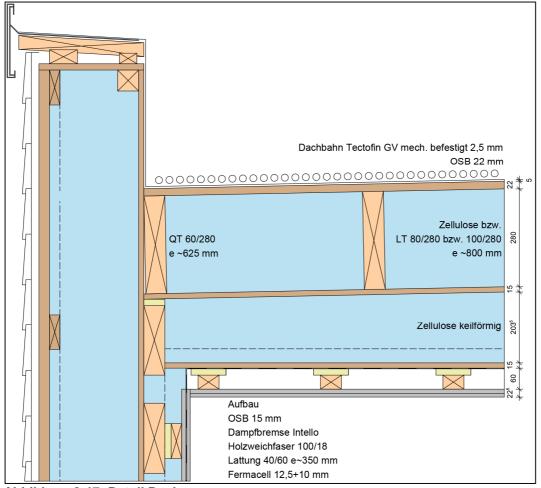


Abbildung 2-17: Detail Dach

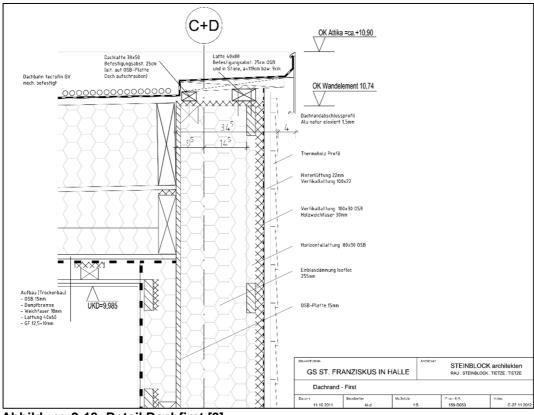


Abbildung 2-18: Detail Dachfirst [9]

#### 2.4 Innendecken

Bei den Innendecken wird zwischen schallentkoppelten Decken und nicht entkoppelten Decken unterschieden. Bei beiden Aufbauten wird nochmals zwischen F30- und F90-Decken unterschieden, wobei die Deckenstärke bei F30-Decken 392,5 mm und bei F90-Decken 404,5 mm beträgt.

Bei den Geschossdecken über dem EG und dem 1. OG im Gebäudeteil B (Hort und Klassen) und der Decke über dem 1. OG des Gebäudeteils A (Verwaltungstrakt) handelt es sich um schallentkoppelte Decken (außer in der Erschließungshalle im nordöstlichen Bereich des Gebäudes). Der Aufbau der schallentkoppelten Decke ist Abbildung 2-19 zu entnehmen.

Im Rahmen des Monitorings wurden die Luftschalldämmung und der Trittschall der Geschossdecke gemessen. Ergebnisse sind in Kapitel 7.4 und 7.5 nachzulesen.

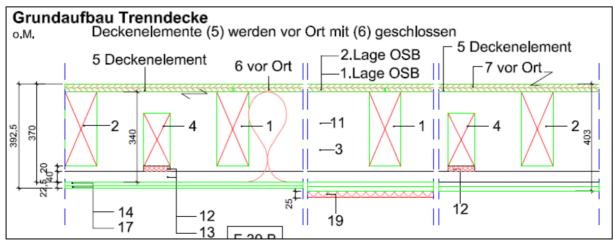


Abbildung 2-19: Grundaufbau schallentkoppelte Decke [3]



Abbildung 2-20: Schallentkoppelte Decke [4]

Der Grundaufbau der normalen Geschossdecken ist Abbildung 2-21 zu entnehmen.

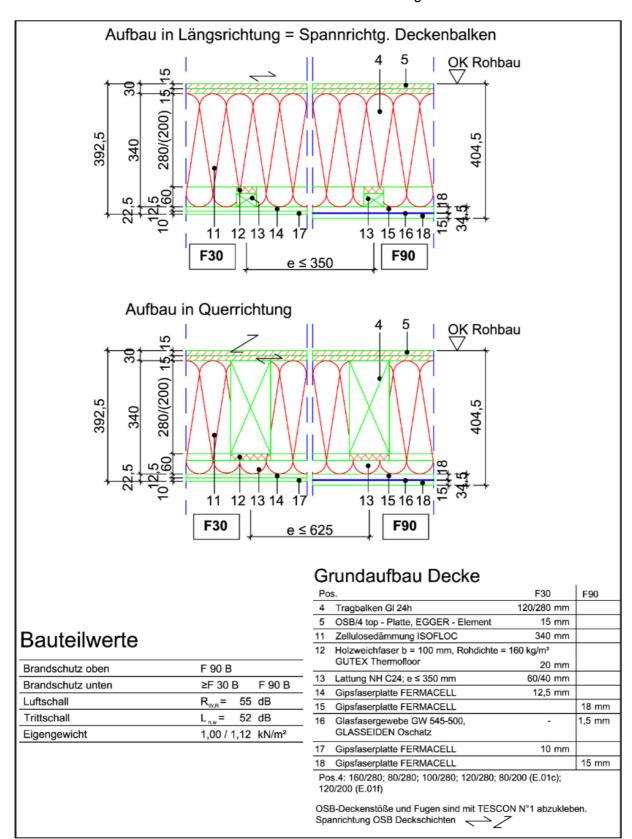


Abbildung 2-21: Grundaufbau Decke [3]

# In Abbildung 2-22 ist beispielhaft der Unterzug zwischen Flur und Klassenraum dargestellt.

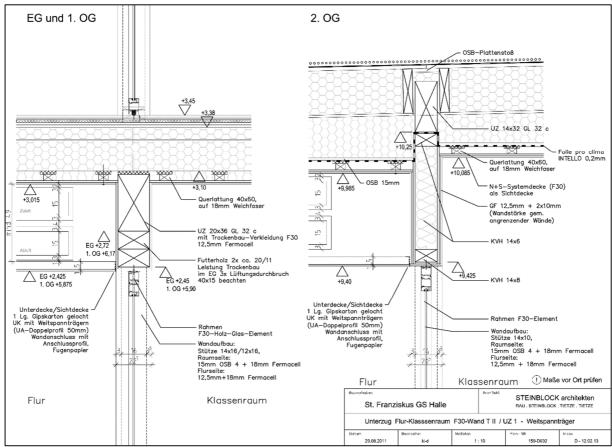


Abbildung 2-22: Unterzug Flur-Klassenraum [9]

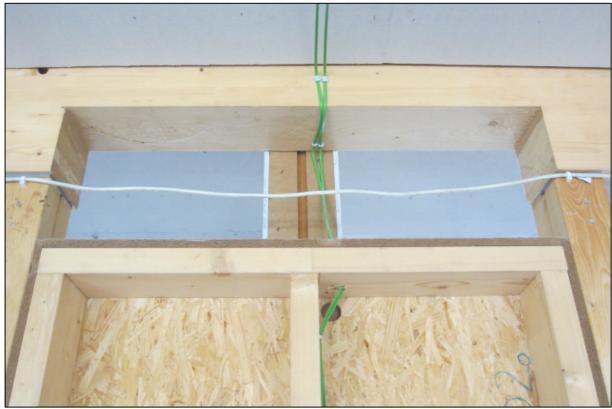


Abbildung 2-23: Unterzug Flurtrennwand mit Lüftungsdurchlass

Eine Übersicht über die verwendeten Bodenbeläge geben die Grundrisse bzw. die Legende in Abbildung 2-24 bis Abbildung 2-27.

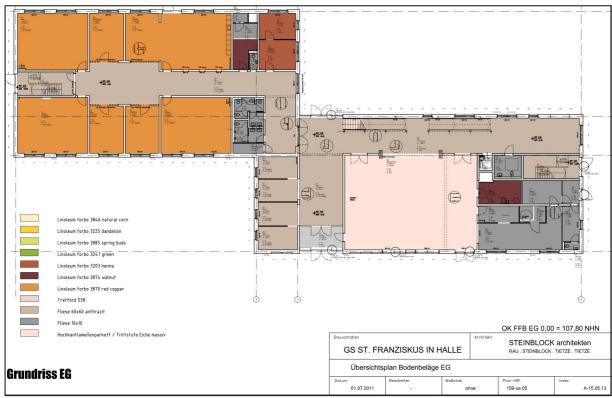


Abbildung 2-24: Bodenbeläge Erdgeschoss

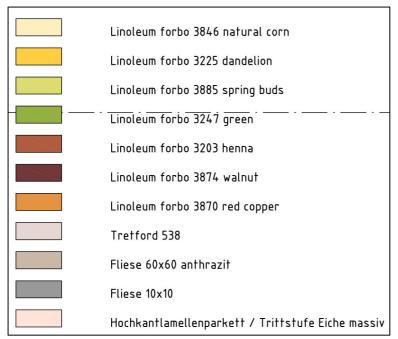


Abbildung 2-25: Legende Bodenbeläge

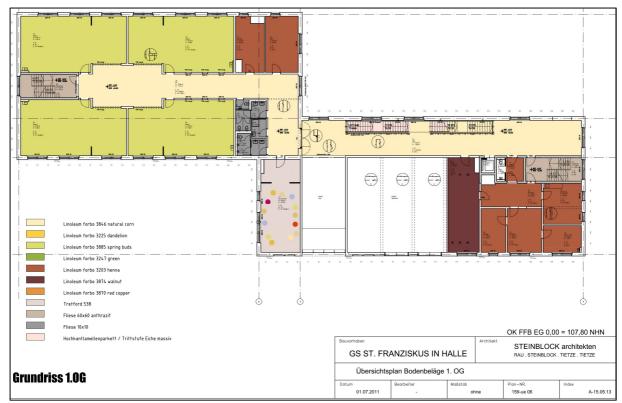


Abbildung 2-26: Bodenbeläge 1. Obergeschoss

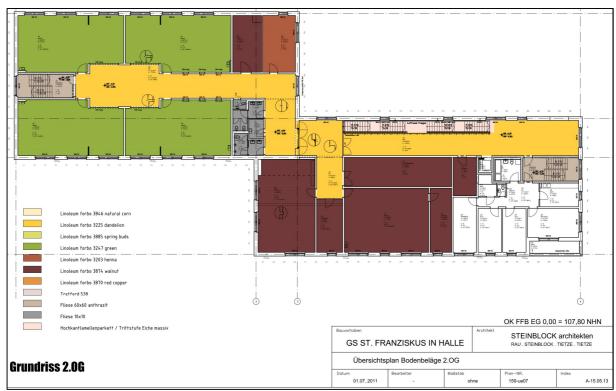


Abbildung 2-27: Bodenbeläge 2. Obergeschoss

# 2.5 Gründung und Bodenplatte

Für die Gründung und die Einbringung des Erdwärmeübertragers war ein umfangreicher Erdaushub notwendig. Nachdem der Erdwärmeübertrager hergestellt und die Fundamente betoniert waren, wurde der Untergrund verfüllt und verdichtet.



Abbildung 2-28: Erdaushub für Erdwärmeübertrager [4]

In Abbildung 2-29 stehen bereits die Treppenhauskerne und die Fundamente sind betoniert. Unter Einzelstützen und je nach Statik sind zusätzliche Einzelfundamente angeordnet.

Zwischen den Fundamenten wurde eine 15 cm starke Lage Schaumglasschotter eingebracht und mit einer Unterspannbahn Solitex UD abgedeckt.



Abbildung 2-29: Gründung und Treppenhauskerne [4]

Unter den Treppenhäusern ist eine 0,25 m starke Stahlbetonplatte als Fundament angeordnet, unter der sich zunächst eine Lage Solitex-Folie und abschließend eine 0,30 m starke Schicht Foamglas-Dämmung befindet.

Auf die Fundamente wurden Streifenfundamente aus Spannbetonhohlplatten aufgelegt (getrennt durch eine Lage Splitt). Die Baugrubenauffüllung unter den Streifenfundamenten besteht aus einer 0,50 m starken Schicht Betonrecycling. An dieser Stelle befinden sich in allen Ecken jeweils die Eckverankerungen aus einem pyramidenstumpfförmigen Fundament aus Beton (0,50 m) mit einer innenliegenden Gewindestange vom Typ M16. Unter den Eckverankerungen ist eine Schicht Betonrecycling von 0,25 m Dicke vorgesehen.



Abbildung 2-30: Streifenfundamente [4]

Über den Streifenfundamenten ist eine Lage Holzweichfaser angeordnet. Darauf wird die fertige Bodenplatte aufgelegt.



Abbildung 2-31: Montage der Bodenplatte [4]

Das Grundprinzip der Bodenplatte ähnelt dem des Daches. In der Zelluloseschicht liegen die Längs- und Querträger aus Brettschichtholz in der Festigkeitsklasse GL 24h in verschiedenen Querschnittsgrößen.

Dabei betragen die Abmessungen der Längsträger 60 x 280 bis 140 x 280 mm, die der Querträger 80 x 280 oder 100 x 280 mm. Die Bodenplatte ist in das Gelände eingesenkt, so dass die Geländeoberkante der Oberkante des Rohfußboden entspricht. Den senkrechten Abschluss zum Erdreich bildet eine Schicht AMROC-Platten, die auf zwei OSB-Platten mit einer Schicht Wolfin-Folie in der Mitte angeordnet ist. Auf den oberen OSB-Platten sind unterschiedliche Fußbodenaufbauten vorgesehen.

Für den Aufbau der Holzbodenplatte liegt ein Gutachten hinsichtlich des klimabedingten Feuchteschutzes vor, in welchem die Bodenplatte mit dem Glaser-Verfahren durchgerechnet wurde [5]. Näheres siehe Kapitel 5.2.

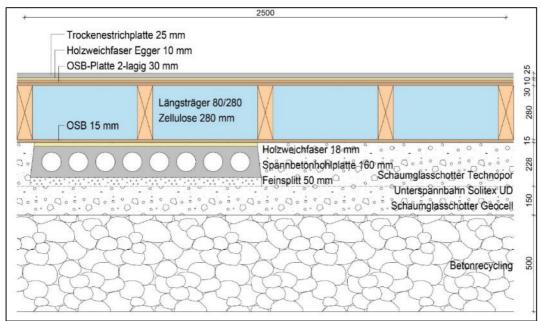


Abbildung 2-32: Detail Bodenplatte

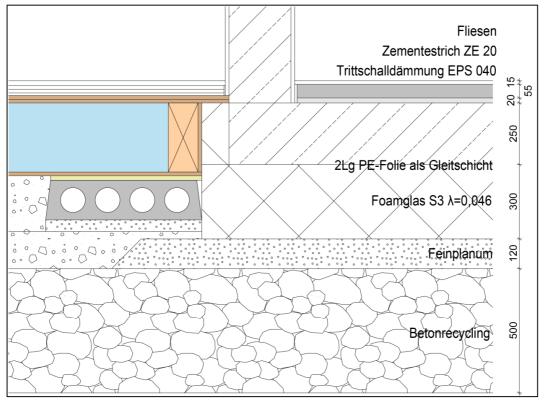


Abbildung 2-33: Detail Bodenplatte Stahlbeton

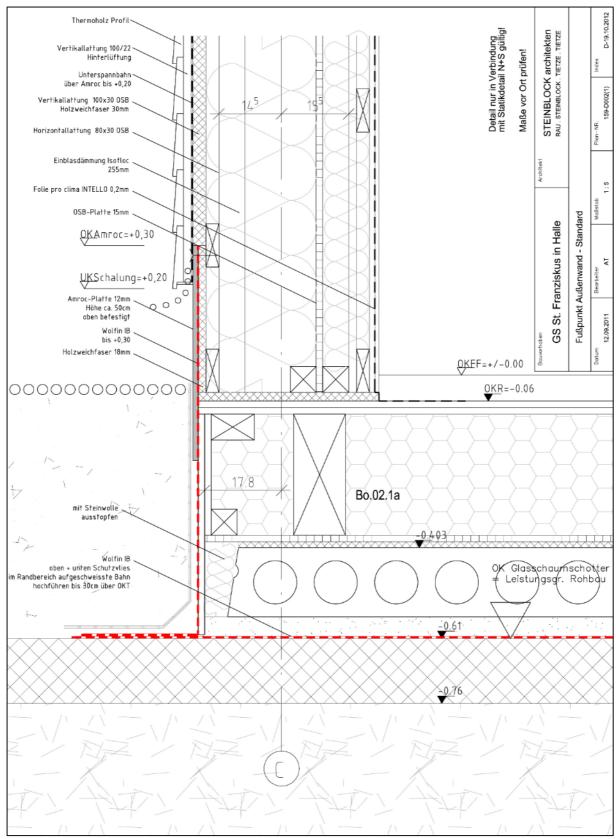


Abbildung 2-34: Fußpunkt Außenwand an Bodenplatte [9]

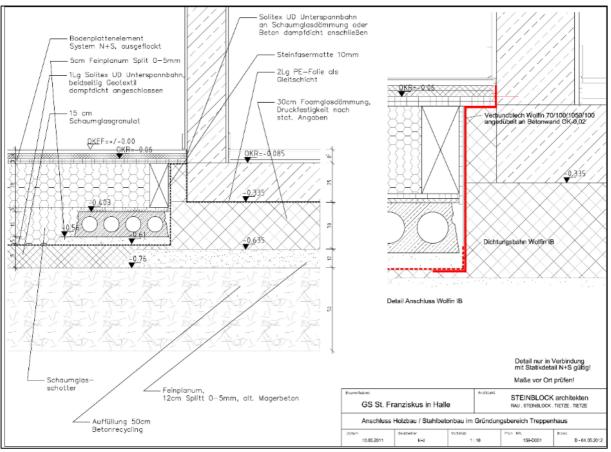


Abbildung 2-35: Anschluss Holzbau an Stahlbetontreppenhaus [9]

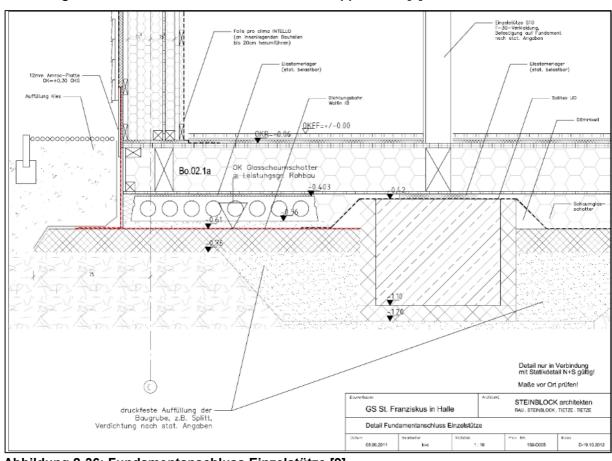


Abbildung 2-36: Fundamentanschluss Einzelstütze [9]

#### 2.6 Kastenfenster

Auch die eingesetzten Kastenfenster sind eine Entwicklung des ehemaligen Büros Naumann & Stahr aus Leipzig. Sie kommen in allen Räumen außer der Aula (Pfosten-Riegel-Fassade) zum Einsatz. Die Fenster können jederzeit geöffnet werden.

Bei den Kastenfenstern handelt es sich um zwei zweifach- und wärmeschutzverglaste Flügel, sodass insgesamt eine Vierfachverglasung vorliegt. Der Scheibenzwischenraum ist mit dem Edelgas Argon gefüllt. Eine Zertifizierung des Passivhaus Institutes Darmstadt für die Kastenfenster sowie die Fensterrahmen lag bis zum 31.12.2010 bzw. bis zum 31.12.2011 vor.

# Zertifikat

Passivhaus geeignete

Kastenfenster Komponente:

Hersteller: Naumann und Stahr, 04299 Leipzig

Produktname: Passivhaus Kastenfenster

#### Folgende Kriterien wurden für die Zuerkennung des Zertifikates geprüft:

#### Passivhaus-Behaglichkeitskriterium:

Unter folgenden Vorraussetzungen erfüllt das Kastenfenster die U-Wert Bedingung:

- zweimal zweifach Wärmeschutzverglasungen mit jeweils U<sub>g</sub> \* 1,1 W/(m²K) nach EN 673
   Verwendung eines thermisch getrennten Randverbundes, geprüft wurde der Thermix Randverbund

 $U_w = 0.68 \le 0.80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (Fensterbreite 1,23 m, Fensterhöhe 1,48 m)

#### Rahmenkennwerte:

Rahmen	Laibung	Brüstung
<i>U<sub>f</sub></i> [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,62	0,71
Breite [mm]	163	160

Abstandhalter	Thermix
Ψ <sub>g</sub> [W/(mK)]	0,022

Passiv haus Institut

Dr. Wolfgang Feist Rheinstraße 44/46 D-64283 Darmstadt

#### Passivhaus-Energiekriterium für die Verglasung:

 $g * 1,6 \text{ W/(m}^2\text{K}) < U_g$  $U_a = 0.62 \,\text{W/(m}^2\text{K)}$  g = 0.47 U<sub>s</sub> und g-Wert beziehen sich jeweils auf die Glaskombination (2 x zweifach WSVG), d.h. insgesamt vier Scheiben. Der g-Wert wird nach EN 410 berechnet .

#### Passivhaus-Einbausituationen:

Einschlie Blich Einbauwärmebrückein erfüllt das Fenster

 $U_{w,eingebaut} \le 0.85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ 

wenn die in der Anlage dokumentierten Einbaudetails des Fenslers in Passiyhaus geeignete Wandaufbaulen (Wärmedämmverbundsystem, Holzbaufassade und Betonschalungsstein) eingehalten werden.

#### Das Zertifikat ist wie folgt zu verwenden:

PASSIV HAUS geeignete KOMPONENTE Dr. Wolfgang Feist



Fensterrahmen / Verglasung:  $U_f = 0.62/0.71 \text{ W/(m}^2\text{K})$  $\Psi_a = 0.022 \text{ W/(mK)}$ Breite = 163/160 mm

 $U_q = 0.62 \text{ W/(m}^2\text{K)}; g = 0.47$ 

Abbildung 2-37: Zertifikat Kastenfenster [11]



# Zertifikat

gültig bis 31 12 2011

Passivhaus geeignete

Komponente: Fensterrahmen

Hersteller: Holz-Glasbaugesellschaft mbH, D- 04249 Leipzig

Produktname: SWS 05

Folgende Kriterien wurden für die Zuerkennung des Zertifikates geprüft:

#### Passivhaus-Behaglichkeitskriterium:

Als Kastenfenster mit einer Verglasung von  $U_g$  = 0,5475 W/(m°K) und unter Standardbedingungen (Fensterbreite 1,23 m, Fensterhöhe 1,48 m) erfüllt der Fenster-U-Wert die Bedingung:

 $U_w = 0.60 \le 0.80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ 

#### Rahmenkennwerte:

Rahmen	unten	seitl./oben
<i>U<sub>f</sub></i> [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,63	0,58
Breite [mm]	161	172/162

Abstandhalter	Swisspacer V
$\Psi_g$ [W/(mK)]	0,015

Passivhaus

Dr. Wolfgang Feist Rheinstraße 44/46 D-64283 Darmstadt

Institut

#### Passivhaus spezifische Auflagen:

Die Passivhauseignung wurde nur mit dem o.g. Abstandhalter geprüft; andere Abstandhalter, vor allem solche aus Aluminium, führen zu wesentlich höheren Warmeverlusten.

#### Passivhaus-Einbausituationen:

Einschließlich Einbauwärmebrücken erfüllt das Fenster

 $U_{w,eingebaut} \leq 0.85 \text{ W/(m}^2\text{K})$ 

wenn die in der Anlage dokumentierten Einbaudetails des Fensters in Passivhaus geeignete Wandaufbauten (Warmedämmverbundsystem, Holzbaufassade und Betonschalungsstein) eingehalten werden.

Das Zertifikat ist wie folgt zu verwenden:

PASSIV
HAUS
geeignete
KOMPONENTE
Dr. Wolfgang Feist



Fensterrahmen:

 $U_f = 0.63 / 0.58 \text{ W/(m}^2\text{K})$ 

 $\Psi_g = 0.015 \text{ W/(mK)}$ 

Breite = 161/172/162 mm

### Abbildung 2-38: Zertifikat Fensterrahmen [12]

Lediglich die Fenster der Flure 009, 105 und 205 erhielten außen eine F90-Festverglasung, da sie sich in der Brandwand befinden. Die Innenflügel lassen sich zu Reinigungszwecken öffnen.

Gemäß Dokumentation der ausführenden Firma HOLZ-GLASBAUGESELLSCHAFT MBH LEIPZIG haben die Passivhauskastenfenster die in Tabelle 2-3zusammengestellten Eigenschaften.

**Tabelle 2-3: Technische Daten der Kastenfenster** 

Komponente	Technische Daten
Fensterrahmen SWS 05	$U_{f,Leibung} = 0.58 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
	$U_{f,Brüstung} = 0.63 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
	Breite unten = 161 mm
	Breite oben = 162 mm
	Breite seitlich = 172 mm
Verglasung	4 x PLANILUX 4 mm
	2 x 16 mm SZR mit Argon 90%
	SZR im Kastenbereich 100 mm
	Beschichtung Planitherm Ultra N
	$U_g = 0.55 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Lichttechnische Daten	$T_{D65} = 0.65$
	Reflektion außen 20 %
	Reflektion innen 20 %
Energie-Faktoren EN 410	Transmission 38 %
	Reflektionsgrad außen 33 %
	Reflektionsgrad innen 33 %
	g = 0,52
	Shading coefficient = 0,60
Abstandhalter	Swisspacer V
	$\Psi_{g} = 0.015 \text{ W/(mK)}$
Fenster gesamt	$U_{\rm W} = 0.60  {\rm W/(m^2 K)}$
Nominale Dicke	148 mm
Gewicht	40 kg/m²
Luftdurchlässigkeit	4
Widerstandsfähigkeit bei Windlast	B3
Schlagregendichtheit	9A

Die Details zur Funktion der Fenster sind in Kapitel 8 näher beschrieben.



Abbildung 2-39: Links: Fensteröffnung im Rohbauzustand, Rechts: Lieferung

Die äußeren Fensterbänke gehen über die gesamte Breite, um Tropfnasen an der Fassade zu vermeiden.



Abbildung 2-40: Äußerer Fensteranschluss

## 2.7 Pfosten-Riegel-Fassade

Bei der Südfassade der Aula handelt es sich um eine Pfosten-Riegel-Konstruktion mit den in Tabelle 2-4 zusammengestellten technischen Daten. Die Profile haben eine Ansichtsbreite von 60 mm.

Tabelle 2-4: Technische Daten der Pfosten-Riegel-Fassade

Komponente	Technische Daten
Wärmedurchgang U <sub>CW</sub>	0,6 W/(m <sup>2</sup> K)
Verglasung	Dreifachverglasung SGG Climatop Ultra N
	3 x PLANILUX 4 mm
	2 x 16 mm SZR mit Argon 90%
	Beschichtung Planitherm Ultra N
	Folie PVB standard 0,76 mm
	$U_g = 0.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Abstandhalter	Swisspacer grau V
Lichttechnische Daten	Transmission 68 %
	Reflektion außen 15 %
	Reflektion innen 15 %
Energie-Faktoren EN 410	Transmission 36 %
	Reflektionsgrad außen 22 %
	Reflektionsgrad innen 22 %
	g = 0.46
	Shading coefficient = 0,52
Eigenlast	0,62 kN/m²
Stoßfestigkeit	Klasse I5/E5
Luftdurchlässigkeit	Klasse AE
Schlagregendichtheit	RE 1650
Luftschalldämmung	32 dB

Im Scheibenzwischenraum befindet sich eine innenliegende Jalousie vom Typ Isolette, welche mit einem Jalousieantrieb Encoder BA 11-300/500 bewegt wird. Durch den hermetischen Einbau ist die Jalousie vor äußeren Einflüssen geschützt und gemäß Herstellerangaben wartungsfrei. Jedoch kam es bei einer Scheibe bereits zu einem Defekt, der den Ausbau der Scheibe, die Öffnung des Randverbundes und eine Reparatur notwendig machte.

Seither herrscht die globale Anweisung, den Sonnenschutz nicht mehr zu bedienen – die Jalousetten sind nun dauerhaft geschlossen (Abbildung 2-41).



Abbildung 2-41: Pfosten-Riegel-Fassade Aula

## 2.8 Außentüren

Die  $U_D$ -Werte der Außentüren sind gemäß Dokumentationsunterlagen der ausführenden Firma wie folgt angegeben.

Tabelle 2-5: U-Werte der Außentüren

Tür	U-Wert
Tür Haupteingang	0,78 W/(m <sup>2</sup> K)
Tür Hofeingang	0,78 W/(m <sup>2</sup> K)
Tür Horteingang	0,79 W/(m <sup>2</sup> K)
Tür Treppenhauseingang	0,80 W/(m <sup>2</sup> K)
Tür Aulaeingang	≤ 0,80 W/(m²K)
Tür Kücheneingang	≤ 0,80 W/(m²K)

Bei der Verglasung handelt es sich um die Dreifachverglasung Climatop Ultra N VSG.



Abbildung 2-42: Außentür Aula

## 2.9 Treppenhäuser und Treppen

In jedem Gebäudeteil A und B ist je ein Treppenhaus aus Stahlbeton vorhanden. Dabei wurde Beton der Festigkeitsklasse C 30/37 und Betonstahl BSt 500 verwendet. Im Gebäudeteil A befindet sich zudem ein Aufzug. Die Stahlbetonwände und -decken des Treppenhauses Ost laufen weiter bis zum Aufzugsschacht.

Die Wände bestehen aus 0,25 m starken Stahlbetonwänden. 0,19 m starke Stahlbetondecken bilden die Zwischenpodeste zwischen den Geschossen. Die Geschossdecken hingegen sind 0,24 m stark. Bei der Treppe handelt es sich um eine geradläufige Elementtreppe. Die Treppen besitzen vier Läufe mit einer unterschiedlichen Anzahl an Stufen (6, 10 oder 14 Stück) und je einem Auftritt von 0,28 m sowie einer Steigung von 0,175 m. Das Geländer im Treppenauge besteht aus Stahlblech und einem Handlauf aus Eiche.

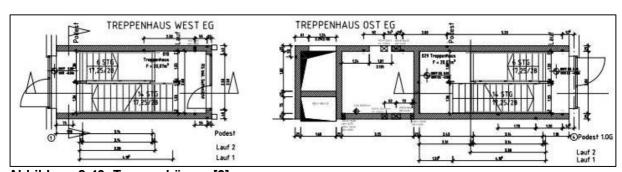


Abbildung 2-43: Treppenhäuser [9]

An der Nordseite des Gebäudeteils A ist eine weitere Treppe vorgesehen. Diese besteht aus Stahl, dabei sind die Stufen mit Belägen aus Eiche bekleidet. Hierbei ist die Setzstufe mit 22 mm und die Trittstufe mit 40 mm Eiche versehen. Bei dieser Treppe existieren 2 Läufe mit je 23 Stufen. Die Steigung beträgt 0,15 m und der Auftritt 0,30 m. Das Zwischenpodest besteht aus der normalen Holzbalkengeschossdecke. Die Geländerhöhe beläuft sich auf 1,10 m. Es besteht aus Geländerstäben aus Flachstahl (40 x 5 mm). Deren Abstand untereinander beträgt 12 cm. Auch hier ist der Handlauf in Eiche gehalten.



Abbildung 2-44: Links: Treppenhaus West, Rechts: Haupttreppe im Flur Nord

# 3 Wärmedurchgangskoeffizienten

In diesem Abschnitt werden die Berechnungsergebnisse der U-Wert-Berechnungen zusammengefasst. Im weiteren Verlauf werden die Temperaturverläufe innerhalb der Bodenplatte, der Außenwand und des Daches theoretisch und messtechnisch betrachtet und auf Plausibilität überprüft.

## 3.1 Berechnungsergebnisse

Die Berechnungen der Wärmedurchgangskoeffizienten ergaben die in Tabelle 3-1 aufgeführten Werte. Sämtliche U-Werte unterschreiten deutlich die Anforderungen nach Energieeinsparverordnung (hier im Vergleich: EnEV 2016) und erfüllen ebenfalls sehr gut die Vergleichswerte nach Passivhauskriterien, mit Ausnahme der Solarkollektorwand.

Bauteil	U-Wert St. Franziskus- Grundschule [W/m²K]	Vergleichswert (EnEV 2016, Referenzgebäude) [W/m²K]	Vergleichswert (Passivhaus- Anforderung) [W/m²K]
Bodenplatte	0,092	0,35	0,15
Bodenplatte Treppenhaus	0,125	0,35	0,15
Außenwand Standard	0,117	0,28	0,15
Außenwand Brandwand	0,110	0,28	0,15
Außenwand in Verlängerung der Brandwand	0,103	0,28	0,15
Außenwand als Solarwand	0,161	0,28	0,15
Dach	0,104	0,20	0,15
Dach an Balkon	0,135	0,20	0,15

Tabelle 3-1: Übersicht der Wärmedurchgangskoeffizienten

Eine Herausforderung bei der Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten bestand in der enormen Komplexität der ausgeführten Holzbauweise. Im Folgenden sollen Aufwand und Nutzen einer sehr detaillierten Berechnung nach DIN EN ISO 6946 gegenüber einer vereinfachten Variante anhand der Außenwand kurz dargestellt werden. [13]

#### 3.1.1 Detaillierte Berechnung

Bei einer normgerechten U-Wert-Berechnung der Außenwand ergaben sich zwölf verschiedene zu betrachtende Teilbereiche. Die Einteilung ist in Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 schematisch dargestellt.

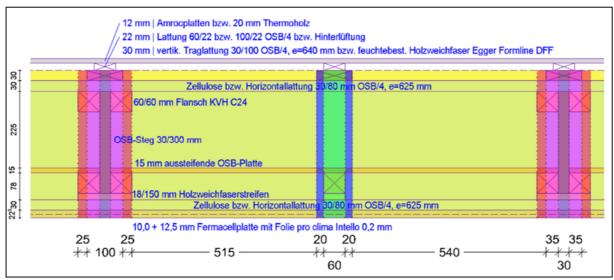


Abbildung 3-1: Schnitt Außenwand mit U-Wert-Teilbereichen

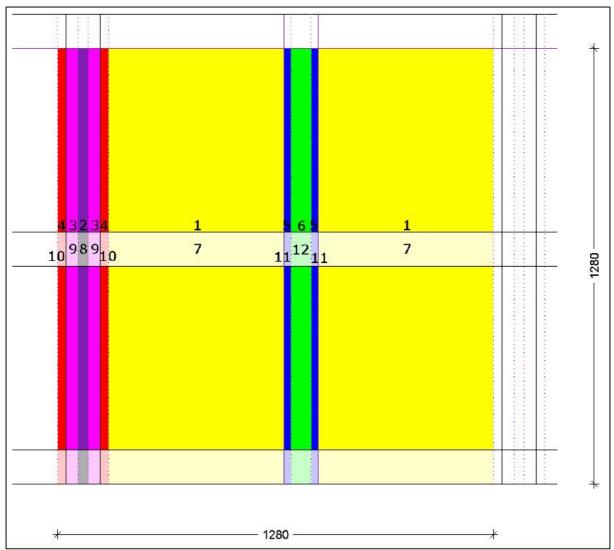


Abbildung 3-2: Ansicht Außenwand mit U-Wert-Teilbereichen

Die Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgte mit Microsoft Excel auf Basis des Tabellenblattes "U-Werte" aus dem Passivhausprojektierungspaket (PHPP) des Passivhausinstitutes Darmstadt [14]. Da das PHPP jedoch nur drei Teilbereiche für die Berechnung vorsieht, wurde in einem neuen Exceldatenblatt eine Umprogrammierung auf zwölf Teilbereiche vorgenommen.

Der folgende Screenshot der Bauteileingabe - nur der Teilbereiche, ohne Nebenrechnungen - lässt die Komplexität erahnen:

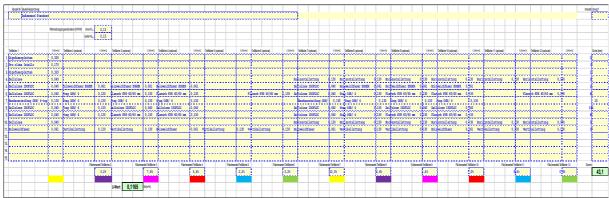


Abbildung 3-3: Screenshot Berechnung der Außenwand mit zwölf Teilbereichen

Hieraus ergeben sich die in Tabelle 3-2 aufgeführten anteiligen U-Werte und Flächenanteile der Teilbereiche. Den größten Anteil hat das Gefach mit 64,1 %, welches gleichzeitig die besten Wärmedämmeigenschaften aufweist.

Tabelle 3-2: Teilbereiche der Außenwand mit Anteilen und 1/R-Werten der Teilfläche

		Teilbereich										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1/R	0,100	0,214	0,133	0,129	0,103	0,115	0,111	0,276	0,154	0,148	0,115	0,130
Anteil	0,641	0,032	0,076	0,054	0,022	0,032	0,103	0,006	0,014	0,010	0,004	0,006

Mit dieser detaillierten Berechnungsmethode wurde ein **U-Wert von 0,1165 W/(m²K)** ermittelt, welcher auf **0,12 W/(m²K)** zu runden ist.

## 3.1.2 Vereinfachte Berechnung

Hält man sich an die Möglichkeiten des PHPP-Datenblattes mit den drei Teilbereichen und nimmt entsprechende Vereinfachungen vor, gestaltet sich das Ergebnis ähnlich, jedoch mit deutlich geringerem Aufwand.

Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung Innendämmung? Außenwand Standard 0,13 0,13 1. Gipsfaserplatten 2. Pro clima Intello 0,170 3. Gipsfaserplatten 0,320 4. Zellulose + Horizon 0,052 0,130 6. Zellulose ISOFLOC Steg OSB/ 4 Flansch KVH 60/60 mm Steg OSB/ 4 7. Wandaussteifung OSB/ 4-top 0,130 Steg OSB/ 4 0,130 Steg OSB/ 4 8. Zellulose ISOFLOC 0,040 0,130 100/640\*0,13) (100/640\*0,13)  $\lambda_{aqu} =$ 43,1 0,1124

Abbildung 3-4: Screenshot Berechnung der Außenwand mit drei Teilbereichen [14]

Von den ehemaligen Teilbereichen 1 bis 6 werden die Teilbereiche 1 (Gefach) und 2 (Steg) beibehalten, die Teilbereiche 3 und 4 (Flansch) zusammengefasst und die Teilbereiche 5 und 6 (Aussteifung) vernachlässigt.

Die Teilbereiche 7 bis 12 bilden die gleichen Bereiche auf Höhe der Horizontallattung ab. Diese wurde im Vorfeld in zwei Bauteilebenen über äquivalente  $\lambda$ -Werte zur Vereinfachung in die Berechnung mit einbezogen.

Im Endergebnis wird ein **U-Wert von 0,1124 W**/(m²K) erreicht, welcher auf **0,11 W**/(m²K) zu runden ist.

Fazit: Das Ergebnis der vereinfachten Berechnung liefert einen um 3,6 % besseren U-Wert im Vergleich zur detaillierten Berechnung. Es wurde mit dem Ergebnis der detaillierten Berechnung weitergearbeitet, siehe Anhang B.

#### 3.2 Messorte und Messtechnik

Die Bauteilmessungen erfolgen an der Außenwand Nord (Abbildung 3-5) und dem Dach im Klassenraum 201 mit Sensoren des Typs HYT. Die Messung der Bodenplatte erfolgt im Stromanschlussraum 004. Für die Messungen im Erdreich kamen Temperatursensoren vom Typ LM 75 zum Einsatz, für Messungen innerhalb der Bauteilschichten und für das Raumklima Sensoren vom Typ HYT. Eine detaillierte Beschreibung der Fühler ist dem Abschlussbericht Teil 4 - Messtechnik zu entnehmen.

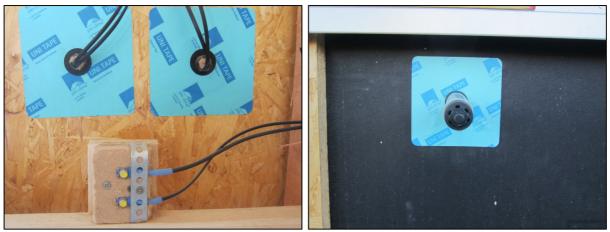


Abbildung 3-5: Links: Raumseitige Sensoren in der Außenwand. Rechts: Sensoren in Hinterlüftung der Fassade

Die Sensoren geben alle 10 Minuten einen Mittelwert aus.

## Messkonzept:

- im Boden werden Temperaturen und Feuchten nachvollzogen; es lassen sich Rückschlüsse auf Diffusion und U-Wert ziehen
- in der Nordwand werden Temperaturen und Feuchten in der Wand nachvollzogen; es lassen sich Rückschlüsse auf Diffusion und U-Wert ziehen
- im Dach werden Temperaturen und Feuchten nachvollzogen; es lassen sich Rückschlüsse auf Diffusion und U-Wert ziehen
- Innen- und Außentemperatur sowie Erdreichtemperatur werden ebenfalls erfasst.

Die Messungen wurden grundsätzlich wie geplant umgesetzt, jedoch mit einer größeren Anzahl von Messfühlern, da viele Messstellen redundant ausgestattet wurden. Statt geplanten 24 Temperatur- und Feuchtefühlern (nachfolgend "T/F"), wurden 15 T/F-Fühler sowie 17 Temperaturfühler installiert.

Es erfolgen ebenfalls Messungen der Außenwand Solar. Da diese Messungen zum Ziel hatten, einen unter Umständen negativen Einfluss auf die Temperaturbehaglichkeit der Aula zu untersuchen, sind die Ergebnisse Bestandteil des Abschlussberichtes Teil 5.

## 3.3 Auswertung Bodenplatte

### 3.3.1 Messpunkte

Die Messpunkte der Bodenplatte sind lotrecht angeordnet, wie in Abbildung 3-6 dargestellt.

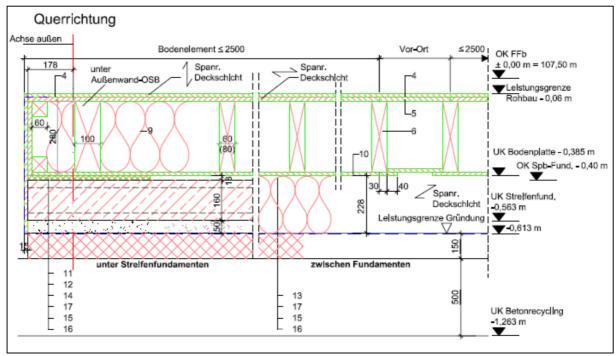


Abbildung 3-6: Lage der Messfühler in der Bodenplatte Raum 0.04

Dabei werden zusätzlich die Innen- und Erdreichtemperaturen in unterschiedlichen Tiefen berücksichtigt. Die Tiefen der installierten Messfühler beziehen sich auf die Unterkannte des Schaumglasschotters (Technopor). Demzufolge beträgt die Tiefe der Erdsonde 0 cm tatsächlich 0,588 m gegenüber dem Gelände (siehe Abbildung 3-6).

Die in Tabelle 3-3 aufgeführten Messpunkte sind im Raum 0.04 und im Erdreich installiert:

Tabelle 3-3: Messpunkte in der Bodenplatte Raum 004

Kürzel	Einheit	Gruppe	Untergruppe	Beschreibung
DF0321-514E-0	°C	BAU	BOD	Temperatur auf OSB-Schicht unten
DF0321-514E-1	%	BAU	BOD	Feuchte auf OSB-Schicht unten
DF0321-5154-0	°C	BAU	BOD	Temperatur in Zellulose
DF0321-5154-1	%	BAU	BOD	Feuchte in Zellulose
DF0321-5156-0	°C	BAU	BOD	Temperatur in OSB-Schicht oben
DF0321-5156-1	%	BAU	BOD	Feuchte in OSB-Schicht oben
DF0321-5152-0	°C	RAU	TGA	Raumluft_Temperatur_Raum_004
DF0321-5158-0	°C	RAU	TGA	Raumluft_Temperatur_Raum_004
DF0321-5152-1	%	RAU	TGA	Raumluft_Feuchte_Raum_004
DF0321-5158-1	%	RAU	TGA	Raumluft_Feuchte_Raum_004
DF0220-5192-0	°C	RLT	EWT	Temperatur_Erdsonde_50_cm
DF0220-5194-0	°C	RLT	EWT	Temperatur_Erdsonde_0_cm
DF0220-519A-0	°C	RLT	EWT	Temperatur_Erdsonde_10_cm
DF0220-519C-0	°C	RLT	EWT	Temperatur_Erdsonde_100_cm

## 3.3.2 Plausibilitätsprüfung

Bei stationären Temperatur- und Feuchteberechnungen wird davon ausgegangen, dass die Temperaturen auf der Außen- beziehungsweise Innenseite des Bauteils dauerhaft konstant sind. Außerdem werden die Aufheiz- und Abkühlvorgänge in den einzelnen Schichten nicht berücksichtigt. Durch diese Vereinfachung wird die Wärmestromdichte q in dem Bauteilquerschnitt konstant. Die Temperaturgradienten innerhalb einer Schicht sind in Folge dieser Annahmen ebenfalls konstant. [15, p. 103].

Die Plausibilitätsprüfung der Bauteiltemperaturen erfolgt durch einen Vergleich der berechneten (stationären) und gemessenen (instationären) Temperaturen im Bauteilquerschnitt.

Bei der Berechnung des Temperaturverlaufes der Bodenplatte wurden der Gefach- sowie der Rahmenanteil betrachtet. Grundlage der Berechnung bilden die gemittelten Messwerte über 24 h vom 01.03.2016 um 6:00 Uhr bis 02.03.2016 um 6:00 Uhr.

Tabelle 3-4 zeigt die berechneten Schichttemperaturen im Vergleich zu den gemittelten Werten am Beispiel des Gefachbereiches.

Tabelle 3-4: Berechnung des Temperaturverlaufs in der Bodenplatte (Gefach)

Bodenplatte Regelfläche Holzbau - G	efach						
Innentemperatur gemessen	20,63	°C	Mittelwer	te vom 0°	1.03. bis 02	2.03.2016	6:00 Uhr
Außentemperatur gemessen	9,56	°C					
Schicht	S	S <sub>kumuliert</sub>	λ	R	Δϑ	$artheta_{ ext{berechnet}}$	ϑ <sub>gemessen</sub>
	mm	mm	W/mK	m²K/W	K	°C	°C
GEFACH	-20	-20,00				20,63	20,63
$R_{si}$	0	0	-	0,17	0,155	20,48	
Trockenestrichplatte FERMACELL	25	25	0,13	0,192	0,175	20,30	
Holzweichfaserplatte EGGER	10	35	0,061	0,164	0,149	20,15	17,42
Obere Beplankung 2-lagig	30	65	0,13	0,231	0,210	19,94	
Zellulose	140	205	0,04	3,500	3,189	16,75	16,39
Zellulose	140	345	0,04	3,500	3,189	13,57	
Untere Beplankung OSB	15	360	0,13	0,115	0,105	13,46	15,04
Schaumglasschotter Technopor	228	588	0,085	2,682	2,444	11,02	13,60
Glasschaumgranulat Geocell	150	738	0,11	1,364	1,242	9,77	
Betonrecycling	500	1238	2,10	0,238	0,217	9,56	11,82
$R_{se}$	-	1238	-	0,00	0,000	9,56	
Erdreich 100 cm unter UK Technopor		1588				9,56	9,56
			R <sub>T</sub> =	12,156	(m <sup>2</sup> K)/W		
			q =	0,911	W/m²		
			U =	0,082	W/(m²K)		

Abbildung 3-7 stellt den berechneten Temperaturverlauf und die gemessenen Werte im Diagramm gegenüber. Die x-Achse markiert dabei die einzelnen Schichten der Bodenplatte mit fortlaufender Tiefe. Die jeweiligen Ebenen der installierten Messpunkte werden durch eine grüne vertikale Linie gekennzeichnet. Die gemessenen Temperaturen erscheinen plausibel.

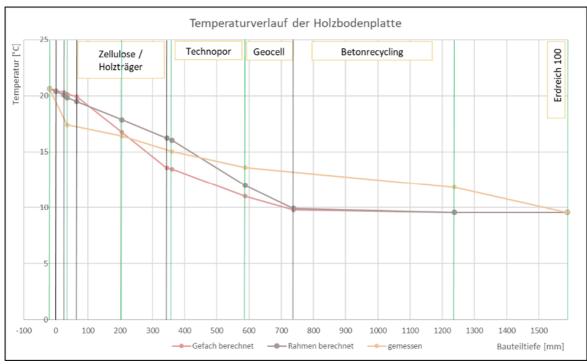


Abbildung 3-7: Temperaturverlauf der Holzbodenplatte

## 3.3.3 Temperaturverlauf im Sommer

Nachfolgend soll der sommerliche Temperaturverlauf vom 20.06. bis 24.07.2016 beispielhaft betrachtet werden. Am 07.07.2017 um 16:00 Uhr beträgt die Außenlufttemperatur 30,7 °C. Zeitgleich ist im Erdreich bei 100 cm Tiefe eine Temperatur von 14,2 °C festzustellen. Am 14.07.2017 um 4:00 Uhr fällt die Außenlufttemperatur bis auf 11,1 °C ab. Dabei ist mit 14,7 °C kein Absinken der Temperaturen in 100 cm Tiefe zu verzeichnen. Temperaturschwankungen sind lediglich in den oberen Schichten (OSB oben und Zelluloseebene) zu verzeichnen, darunter laufen sie eher konstant. Warum die Temperatur der Erdsonde in 10 cm Tiefe so stark schwankt, ist nicht bekannt.

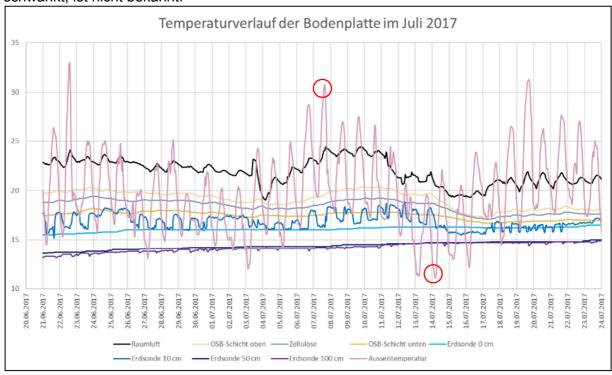


Abbildung 3-8: Temperaturverlauf der Bodenplatte im Juli 2017

## 3.3.4 Temperaturverlauf im Winter

Ein beispielhafter Blick auf die Wintermonate Januar bis März 2016 zeigt trotz starker Schwankungen der Außenlufttemperatur relativ konstante Temperaturwerte innerhalb der Bodenplatte. Die Schwankungen der Innentemperatur im Raum 0.04 bewegen sich in einem sehr kleinen Fenster. Die Erdreichtemperatur in 100 cm Tiefe liegt im Winter mit ca. 10 °C im Schnitt 4 K unter der Erdreichtemperatur im Sommer mit ca. 14 °C.

Mit Fortschreiten des Winters ist ein leichter Temperaturabfall im Erdreich von ca. 10 °C auf ca. 8 °C (Erdsonde 100 cm) zu verzeichnen.

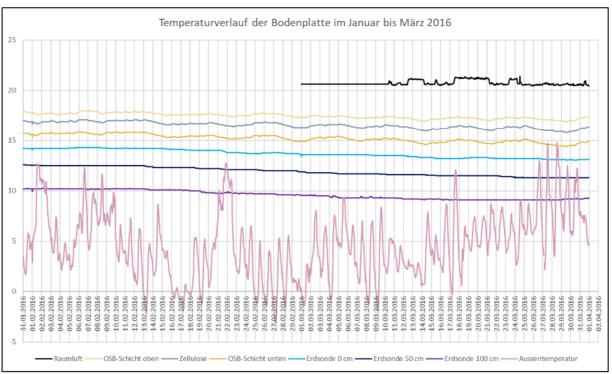


Abbildung 3-9: Temperaturverlauf der Bodenplatte im Januar bis März 2016

#### 3.3.5 Jahresverlauf 2016

Der Blick auf den Jahresverlauf 2016 zeigt, dass die Erdreichtemperatur im Gegensatz zur Außenlufttemperatur keinen großen Schwankungen unterliegt. Sie steigt und sinkt minimal mit der Außenlufttemperatur.

Die niedrigste Temperatur von 9,1 °C wurde für das Jahr 2016 Mitte März 2016 verzeichnet. Die höchste Temperatur wurde mit 16,23 °C am 26.07.2016 gemessen.

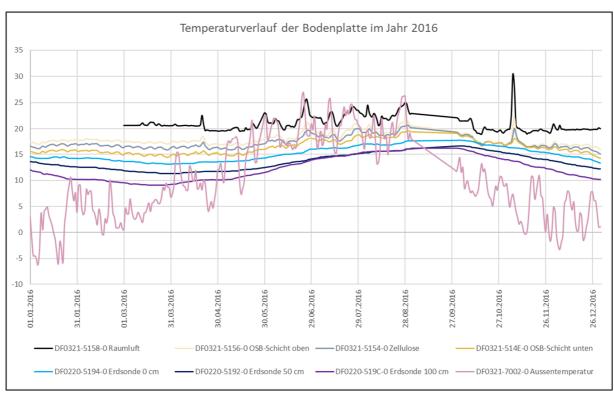


Abbildung 3-10: Temperaturverlauf der Bodenplatte im Jahr 2016

## 3.4 Auswertung Außenwand Standard

## 3.4.1 Messpunkte

Die Messfühler der Außenwand zur Aufzeichnung der Bauteiltemperaturen und Bauteilfeuchten befinden sich in der Nordwand in Raum 2.01 in zwei benachbarten Wandabschnitten ("Wand 1" und "Wand 2"). Um den Einfluss der Globalstrahlung möglichst gering zu halten, wurde bereits bei der Konzeption des Monitorings auf die Auswahl einer nordorientierten Außenwand geachtet.

Tabelle 3-5: Messpunkte in der Nordwand Raum 2.01

Kürzel	Einheit	Gruppe	Untergruppe	Beschreibung
DF0321-5512-0	°C	BAU	AWN	Klasse_201_Wand_2_mitte_Temperatur
DF0321-5512-1	%	BAU	AWN	Klasse_201_Wand_2_mitte_Luftfeuchte
DF0321-5518-0	°C	BAU	AWN	Klasse_201_Wand_2_aussen_Temperatur
DF0321-5518-1	%	BAU	AWN	Klasse_201_Wand_2_aussen_Luftfeuchte
DF0321-5546-0	°C	BAU	AWN	Klasse_201_Wand_1_mitte_Temperatur
DF0321-5546-1	%	BAU	AWN	Klasse_201_Wand_1_mitte_Luftfeuchte
DF0321-555E-0	°C	BAU	AWN	Klasse_201_Wand_1_aussen_Temperatur
DF0321-555E-1	%	BAU	AWN	Klasse_201_Wand_1_aussen_Luftfeuchte
DF0321-7002-0	°C	WET	WET	Außentemperatur
DF0321-7002-1	%	WET	WET	Luftfeuchte

Die folgende Abbildung zeigt die Position der Messfühler im Wandquerschnitt.

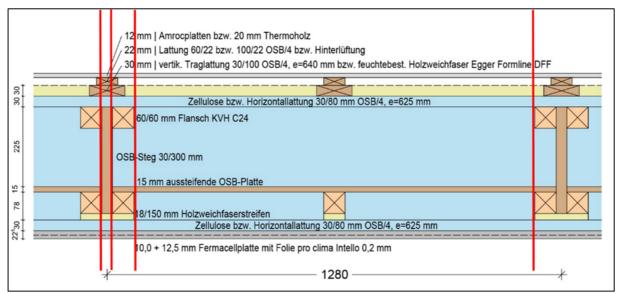


Abbildung 3-11: Lage der Messfühler in der Außenwand Nord Raum 2.01

## 3.4.2 Plausibilitätsprüfung

Die Plausibilitätsprüfung der Bauteiltemperaturen erfolgt durch den Vergleich der berechneten (stationären) und gemessenen (instationären) Temperaturen im Bauteilquerschnitt. Bei der Berechnung des Temperaturverlaufes der Außenwand wurden der Gefach- sowie der Steg und der Flanschanteil betrachtet (Bereichseinteilung siehe Abbildung 3-11).

Tabelle 3-6 zeigt die berechneten Schichttemperaturen im Vergleich zu den gemittelten Werten am Beispiel des Gefachbereiches.

Tabelle 3-6: Berechnung des Temperaturverlaufs in der Außenwand (Gefach)

Außenwand Regelfläche Holzbau - Gefach								
Innentemperatur gemessen	19,503	°C	vom 16.0	1.2017 bi	s 17.01.20	17 um 23:	:00 Uhr	
Außentemperatur gemessen	-1,206	°C						
Schicht	S	S <sub>kumuliert</sub>	λ	R	Δϑ	$\vartheta_{berechnet}$	$\vartheta_{\text{gemessen,1}}$	ϑ <sub>gemessen,2</sub>
	mm	mm	W/mK	m²K/W	K	°C	°C	°C
GEFACH	-20	-20,00				19,50	19,50	19,50
$R_{si}$	0	0	-	0,13	0,281	19,22		
Gipsfaserplatten	23	23	0,320	0,072	0,156	19,07		
Zellulose + Horizontallattung	30	53	0,052	0,577	1,248	17,82		
Zellulose ISOFLOC	18	71	0,040	0,450	0,974	16,84		
Zellulose ISOFLOC	60	131	0,040	1,500	3,245	13,60		
Wandaussteifung OSB/ 4-top	15	146	0,130	0,115		13,35		
Zellulose ISOFLOC	115	261	0,040	2,875	6,220	7,13	9,94	9,24
Zellulose ISOFLOC	50	311	0,040	1,250	2,705	4,42		
Zellulose ISOFLOC	60	371	0,040	1,500	3,245	1,18		
Zellulose + Horizontallattung	30	401	0,054	0,556	1,202	-0,02		
Holzweichfaser + Vertikallattung	30	431	0,072	0,417	0,902	-0,92	-0,88	-0,85
$R_{se}$	-	431	=	0,13	0,281	-1,21		
Außenluft		781				-1,21	-1,21	-1,21
			R <sub>T</sub> =	9,571	(m <sup>2</sup> K)/W			
			q =		W/m²			
			U =	0,104	W/(m <sup>2</sup> K)			

Grundlage der Berechnung bilden die gemittelten Messwerte über 24 h vom 16.01.2016 um 23:00 Uhr bis 17.01.2016 um 23:00 Uhr. Dieser Tag wurde beispielhaft gewählt, da die Innentemperatur zu diesem Zeitpunkt (Sonntag) nicht stark schwankte, sondern einen kontinuierlichen Abfall aufgrund des Wochenendbetriebes erfahren hatte. Gleichzeitig lag eine möglichst große Temperaturdifferenz zur Außentemperatur vor (Minusgrade).

Aus den Berechnungswerten der drei Teilbereiche in Kombination mit den Messwerten (jeweils aus dem Gefachbereich) ergibt sich das in Abbildung 3-7 dargestellte Diagramm zum Temperaturverlauf. Die x-Achse stellt dabei die einzelnen Schichten der Außenwand von innen nach außen dar. Die jeweiligen Ebenen der installierten Messpunkte werden durch eine grüne vertikale Linie gekennzeichnet.

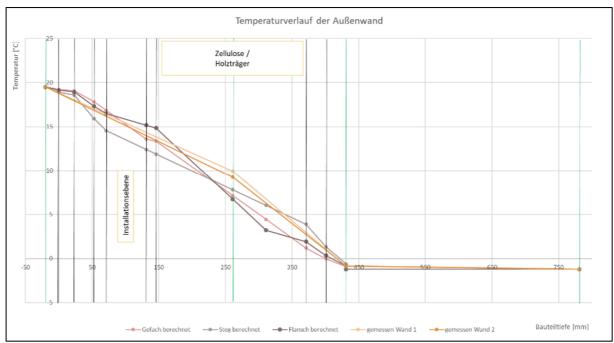


Abbildung 3-12: Temperaturverlauf der Außenwand am 17.01.2016 um 23:00 Uhr

## 3.4.3 Temperaturverlauf im Sommer

Im Folgenden sollen die Temperaturentwicklungen in der Außenwand Nord im Sommer dargestellt werden. Gewählt wurde die Woche vom 07.08. bis 15.08.2016, da sie hohe Schwankungen bei den Außentemperaturen aufweist.

Im Gegensatz zum Winterhalbjahr hat die Globalstrahlung nun am Spätnachmittag und Abend Einfluss auf die Temperatur der Außenwandoberfläche. Die in Abbildung 3-13 dargestellte Globalstrahlung bezieht sich auf die Messwerte der Wetterstation auf dem Dach und stellt nicht die unmittelbare Einstrahlung auf die Außenwand dar.

Man kann deutlich erkennen, dass die Außenwand teils sehr träge reagiert. Während die Außentemperatur z. B. am 13. August um 16:00 Uhr ihren Tageshöhepunkt erreicht hat, steigt die Temperatur innerhalb der Dämmung noch bis 21:00/22:00 Uhr weiter an.

Trotz stark sinkender Außentemperatur von 28 °C auf 8 °C innerhalb von 3 Tagen (08. August bis 11. August 2016) sinkt die Rauminnentemperatur nur sehr langsam. Durch den hohen Wärmedämmstandard und durch das im Sommer nur kurzzeitig in den Nachtstunden auftretende Temperaturgefälle zwischen innen und außen gibt es kaum Transmissionswärmeverluste.

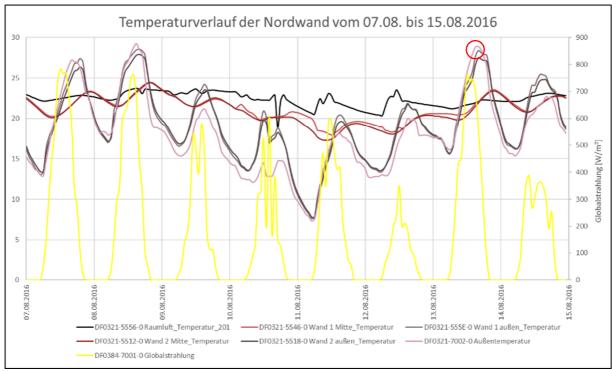


Abbildung 3-13: Temperaturverlauf der Außenwand vom 07.08. bis 15.08.2016

Betrachtet man die Temperaturen in der Fassadenhinterlüftung, so wird deutlich, dass sich in diesem Bereich die Schwankungen der Außentemperatur (zwischen 8 und 28 °C) nicht so stark abbilden (zwischen 17 und 24 °C). Insbesondere in den Abendstunden ist die Temperatur in der Hinterlüftung zeitweilig höher als die vorherrschende Außentemperatur (z. B. 08. August bis 10. August 2016). Die Differenz beträgt bis zu 5 K.

#### 3.4.4 Temperaturverlauf im Winter

Betrachtet wurde die Woche vom 14. bis 21.01.2016, da in dieser Zeit ein Außentemperaturabfall von Temperaturen um den Gefrierpunkt auf bis zu -10 °C zu verzeichnen war. Untersucht man die Messfühler hinter der Fassade (Wand außen, gelb/hellblau) und vergleicht deren Temperaturen mit den Temperaturen der Außenluft, so ist zu erkennen, dass diese gelegentlich nicht nur über, sondern auch unter der Außenlufttemperatur liegen.

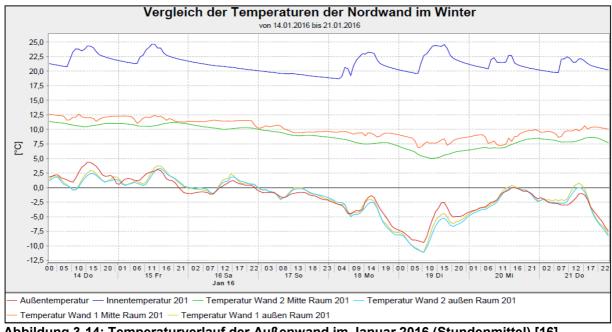


Abbildung 3-14: Temperaturverlauf der Außenwand im Januar 2016 (Stundenmittel) [16]

Am 19.01.2016 um 08:00 Uhr wurde ein Temperaturunterschied von 3 °C gemessen. Die Temperatur der Außenluft betrug zu diesem Zeitpunkt -9 °C und die Temperatur hinter der Fassade -12 °C.

Es sind allerdings auch Wertepaare zu finden, bei welchen die Außentemperatur kleiner ist als die Temperatur hinter der Fassade. Am 21.01.2016 um 16:00 wurde beispielsweise für die Außentemperatur ein Wert von -2 °C und für die Temperatur an der Außenwand ein Wert von 0 °C gemessen.

## 3.4.5 Temperaturverlauf im Herbst

Exemplarisch sei in Abbildung 3-15 noch eine Herbstwoche gezeigt.

Deutlich zu erkennen ist, dass die Innentemperatur im Schnitt weniger als 20 °C beträgt. Grund dafür sind die zu dieser Zeit vorherrschenden Schulferien. Aufgrund der fehlenden Personen fallen auch die internen Gewinne sehr gering aus und es wird nicht geheizt. Auch in dieser Grafik ist ein deutlicher Anstieg der Temperaturen hinter der Fassade am Nachmittag zu beobachten. Am 10.10.2016 um 16:00 Uhr beträgt die Temperatur an der Wand 1 etwa 13 °C und die Außentemperatur 10 °C. Begründet werden kann dieses Phänomen durch die erhöhte solare Einstrahlung zu den Nachmittagsstunden.

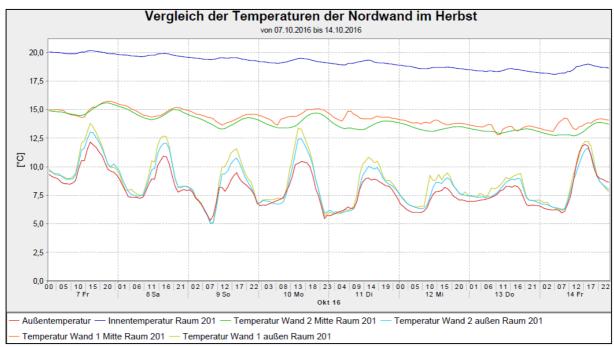


Abbildung 3-15: Temperaturverlauf der Außenwand im Oktober 2016 (Stundenmittel) [16]

### 3.5 Auswertung Dach

#### 3.5.1 Messpunkte

Die Messfühler des Daches zur Aufzeichnung der Bauteiltemperaturen und Bauteilfeuchten befinden sich in Raum 201 in zwei benachbarten Dachfeldern ("Dach 1" und "Dach 2").

Abbildung 3-16 zeigt die Lage der Messfühler im Dachquerschnitt, Tabelle 3-7 stellt diese tabellarisch dar.

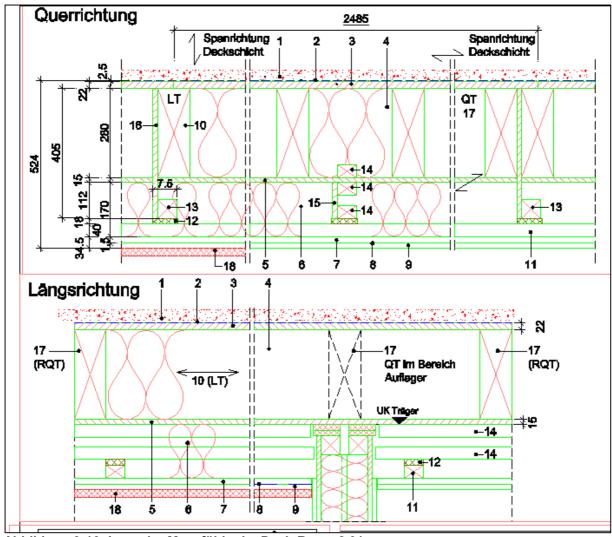


Abbildung 3-16: Lage der Messfühler im Dach Raum 2.01

Tabelle 3-7: Messpunkte im Dach Raum 2.01

Kürzel	Einheit	Gruppe	Unter-	Beschreibung
			gruppe	
DF0321-5534-0	°C	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_2_aussen_Temperatur
DF0321-5534-1	%	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_2_aussen_Luftfeuchte
DF0321-553C-0	°C	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_1_innen_Temperatur
DF0321-553C-1	%	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_1_innen_Luftfeuchte
DF0321-5542-0	°C	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_2_mitte_Temperatur
DF0321-5542-1	%	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_2_mitte_Luftfeuchte
DF0321-5544-0	°C	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_1_innen_Decke_Temperatur
DF0321-5544-1	%	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_1_innen_Decke_Luftfeuchte
DF0321-554C-0	°C	BAU	DAC	Temperatur_Klasse_201_Dach_Lage_unbekannt
DF0321-554C-1	%	BAU	DAC	Feuchte_Klasse_201_Dach_Lage_unbekannt
DF0321-5552-0	°C	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_1_aussen_Temperatur
DF0321-5552-1	%	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_1_aussen_Luftfeuchte
DF0321-555C-0	°C	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_1_mitte_Temperatur
DF0321-555C-1	%	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_1_mitte_Luftfeuchte
DF0321-5564-0	°C	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_2_innen_Decke_Temperatur
DF0321-5564-1	%	BAU	DAC	Klasse_201_Dach_2_innen_Decke_Luftfeuchte
DF0321-7002-0	°C	WET	WET	Außentemperatur
DF0321-7002-1	%	WET	WET	Luftfeuchte

## 3.5.2 Plausibilitätsprüfung

Die Plausibilitätsprüfung der Bauteiltemperaturen erfolgt durch den Vergleich der berechneten (stationären) und gemessenen (instationären) Temperaturen im Bauteilquerschnitt des Daches 1. Bei der Berechnung des Temperaturverlaufes des Daches wurden der Gefach- sowie der Rahmenbereich und der Anteil der Unterkonstruktion betrachtet.

Grundlage der Berechnung bilden die gemittelten Messwerte über 24 h vom 16.01.2016 um 23:00 Uhr bis 17.01.2016 um 23:00 Uhr. Wie bei der Außenwand auch, hatte die Innentemperatur zu diesem Zeitpunkt einen kontinuierlichen Abfall aufgrund des Wochenendbetriebes erfahren, ohne stark zu schwanken. Gleichzeitig herrschten draußen Minusgrade. Tabelle 3-6 zeigt die berechneten Schichttemperaturen im Vergleich zu den gemittelten Werten am Beispiel des Gefachbereiches.

Tabelle 3-8: Berechnung des Temperaturverlaufs im Dach 1 (Gefach)

Dach Regelfläche Holzbau - Gefach	1						
Innentemperatur gemessen	19,50		vom 16.0	1.2017 bi	s 17.01.20	)17 um 23:	00 Uhr
Außentemperatur gemessen	-1,21	°C					
Schicht	s	S <sub>kumuliert</sub>	λ	R	Δϑ	$\vartheta_{berechnet}$	$\vartheta_{\text{gemessen,1}}$
	mm	mm	W/mK	m²K/W	K	°C	°C
GEFACH	-20	-20,00				19,50	19,50
$R_{si}$	0	0	-	0,13	0,216	19,29	
Gipsfaserplatten	23	23	0,320	0,072	0,119	19,17	
Installationsebene (ruhende Luft)	40	63	0,355	0,113	0,187	18,98	
Installationsebene (ruhende Luft)	18	81	0,355	0,051	0,084	18,90	15,88
OSB-Platte	15	96	0,130	0,115	0,191	18,71	
Zellulose ISOFLOC	165	261	0,040	4,125	6,841	11,87	
Zellulose ISOFLOC	18	279	0,040	0,450	0,746	11,12	10,45
OSB-Platte	15	294	0,130	0,115	0,191	10,93	
Zellulose ISOFLOC	140	434	0,040	3,500	5,804	5,12	10,82
Zellulose ISOFLOC	140	574	0,040	3,500	5,804	-0,68	2,38
OSB-Platte	22	596	0,130	0,169	0,281	-0,96	
Tectofin	3	599	0,170	0,018	0,029	-0,99	
$R_{se}$	-	599	-	0,13	0,216	-1,21	
Außenluft		699				-1,21	-1,21
			$R_T = 12,488 \text{ (m}^2\text{K)/W}$				
			q =	1,658	W/m²		
			U =	0,080	W/(m <sup>2</sup> K)		

Aus den Berechnungswerten der drei Teilbereiche in Kombination mit den Messwerten (gelb) ergibt sich das in Abbildung 3-17 dargestellte Diagramm zum Temperaturverlauf. Die x-Achse stellt dabei die einzelnen Schichten des Daches von innen nach außen dar. Die jeweiligen Ebenen der installierten Messpunkte werden durch eine grüne vertikale Linie gekennzeichnet.

Der Messwert unterhalb der unteren OSB-Platte erscheint niedriger als vermutet, während der Messwert innerhalb der Zellulose zu hoch erscheint und gegenüber dem Wert der unteren OSB-Lage nicht wie erwartet abfällt. Dies bestätigt sich auch im darauffolgend beschriebenen Jahresverlauf.

Im Folgenden wird die Lage der Fühler im Dach deshalb noch einmal näher untersucht.

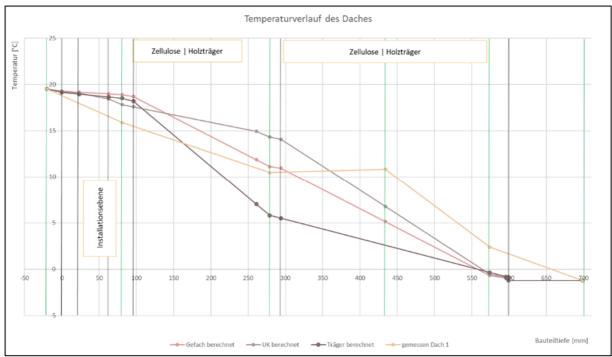


Abbildung 3-17: Temperaturverlauf des Daches 1 am 17.01.2016

#### 3.5.3 Lage der Fühler in Dach 1 und Dach 2

Die Fühler des Daches 2 dienten zur redundanten Ergänzung der Messstellen, falls es zu Ausfällen in Dach 1 kommt.

Da jedoch seitens GEDES einige Fühler im Dach 2 mit "Lage unbekannt" benannt waren, wurde versucht, die Lage anhand der Temperaturmesswerte zu bestimmen, welche für Dach 1 und 2 in vergleichbaren Ebenen nahezu gleich verlaufen müssten. Auch zeigt die Auffälligkeit in Abbildung 3-17 für den Fühler "Dach1 Mitte", dass der Messwert nicht den Erwartungen entspricht. Nachfolgend werden daher - von "warm" nach "kalt" - Erklärungsversuche anhand des Temperaturverlaufes am 17.01.2017 (siehe in Abbildung 3-18) unternommen:

Der Fühler 554C-0 (schwarz gestrichelt), dessen Lage als unbekannt gilt, deckt sich temperaturmäßig mit dem Raumluftfühler des Raumes 2.01 (schwarz), für den jedoch keine Redundanz vorgesehen war. Er scheint unbeabsichtigt unmittelbar an der Gipskartonbeplankung anzuliegen.

Der Fühler 5564-0 (rot gestrichelt), dessen Lage bis dato als unbekannt galt, wurde der Ebene "Dach 2 innen Decke" zugeordnet, da sein Temperaturverlauf sich mit dem Fühler "5544-0 Dach 1 innen Decke" (rot) deckt. Dies sind eigentlich die beiden Fühler, die unmittelbar oberhalb der Gipskartonbeplankung anliegen sollen. Auch deshalb ist der Wert für den vorbeschriebenen Fühler 554C-0 (schwarz gestrichelt) so fragwürdig: bei einer Lage oberhalb der Beplankung hätte der gemessene Temperaturwert etwas niedriger sein müssen.

Auffällig und unplausibel ist weiterhin, dass die beiden Fühler "553C-0 Dach 1 innen" und "555C-0 Dach 1 Mitte" nahezu gleich verlaufen (in Abbildung 3-18 entlang 10 °C), obwohl sie mit ihrer für das Monitoring geplanten Lage unterhalb der mittleren OSB-Lage bzw. mittig in der Zellulose einen räumlichen Abstand von mindestens 14 cm aufweisen sollten. Dass hier etwas nicht stimmt, zeigte sich bereits im Temperaturverlauf des Daches in Abbildung 3-17.

Ein ähnliches Phänomen betrifft die beiden Fühler "5542-0 Dach 2 Mitte" und "5534-0 Dach 2 außen" – beide gestrichelt bei 6 bis 7 °C zu sehen – welche mit ihrer Lage mittig in der Zellulose bzw. unterhalb der oberen OSB-Platte ebenfalls planmäßig einen räumlichen Abstand von ca. 14 cm aufweisen müssten.

Für den im Hinblick auf den Feuchteschutz (Kapitel 5.4) bedeutsamen Fühler "5552-0 Dach 1 außen" – in Abbildung 3-18 braun bei 2,5 °C – ist demnach nicht sicher, ob es sich bei dem braun gestrichelt dargestellten Fühler "5534-0 Dach 2 außen" wirklich um eine vergleichbare Zweitbestückung an ebendieser Stelle handelt, oder ob er nicht doch tiefer in der Zellulose sitzt.

Da die Plausibilitätsprüfung einige Fragen offen lässt, werden die folgenden Auswertungen (auch im Feuchteschutz unter Kapitel 5) ausschließlich für die Fühler im Bereich Dach 1 vorgenommen und auf die Messwerte in Dach 2 möglichst verzichtet.

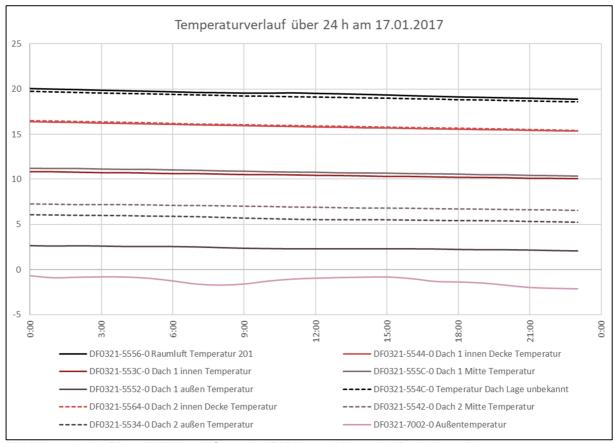


Abbildung 3-18: Plausibilitätsprüfung der Fühlerpositionen in Dach 1 und 2

#### 3.5.4 Temperaturverlauf über ein Jahr

Abbildung 3-19 zeigt den Jahresverlauf der Temperaturen im Dach. Hier ist zu sehen, dass der Sensor "5544-0 Dach 1 innen Decke" (Installationsebene) plausibel nah an der Raumlufttemperatur liegt.

Der Sensor 553C-0 in der unteren OSB-Lage liegt hinsichtlich der Temperatur näher als erwartet am Fühler 555C-0, welcher sich in der Mitte der Zellulosedämmung befinden sollte. Die Messwerte lassen jedoch vermuten, dass die Fühler auch räumlich näher beieinanderliegen als geplant. Der Fühler "5552-0 Dach 1 außen" liegt realistisch nah an der Außentemperatur.

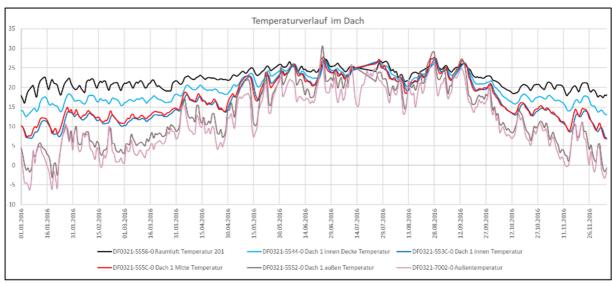


Abbildung 3-19: Temperaturverlauf im Dach 1 im Jahr 2016 (Tagesmittel)

## 3.5.5 Temperaturverlauf im Sommer

Für die Untersuchung des Temperaturverlaufes im Sommer wurde die Woche vom 07.08.2016 bis 14.08.2016 gewählt. Dargestellt ist das 10-Minuten-Mittel (Abbildung 3-20).

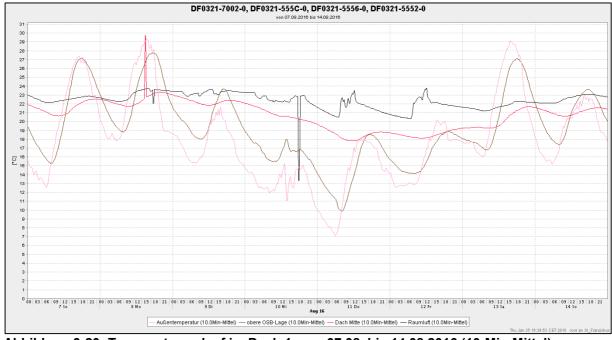


Abbildung 3-20: Temperaturverlauf im Dach 1 vom 07.08. bis 14.08.2016 (10-Min-Mittel)

Deutlich erkennbar sind die großen Schwankungen der Außentemperatur in dieser Sommerwoche, welche bis auf ca. 7 °C abfallen. Die Temperatur der oberen OSB-Lage folgt diesen Spitzen und Senken mit einem Zeitversatz von ca. zwei Stunden.

Sehr positiv ist zu werten, dass die äußeren Temperaturschwankungen sich praktisch nicht in der Raumtemperatur wiederspiegeln, was die Funktion der Wärmedämmung auch im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz bestätigt.

Während die Außentemperaturen ihr Maximum oft gegen 16 Uhr erreichen, schlägt sich diese Spitze meist erst gegen 20 Uhr auf die Ebene der Zellulosedämmung nieder, wenngleich mit deutlich abgeflachtem Verlauf.

#### 3.5.6 Temperaturverlauf im Winter

Dargestellt ist der Temperaturverlauf im Winter in der Woche vom 14.01.2016 bis 21.01.2016 im 10-Minuten-Mittel.

Die Außentemperatur (rosa) zeigt größere Schwankungen, die sich auch hier leicht zeitversetzt in der oberen OSB-Lage (braun) abzeichnen. Der Temperaturverlauf in der Zelluloseebene ist kaum Schwankungen ausgesetzt, was den sehr guten Dämmstandard bestätigt.

Bei der Raumlufttemperatur ist die Aufheizphase am Morgen deutlich erkennbar. Sie erreicht ihre Spitze gegen Unterrichtsschluss. Über das Wochenende fällt die Temperatur moderat auf 18,5 °C ab. Dies spiegelt sich nicht im Dachquerschnitt wider.

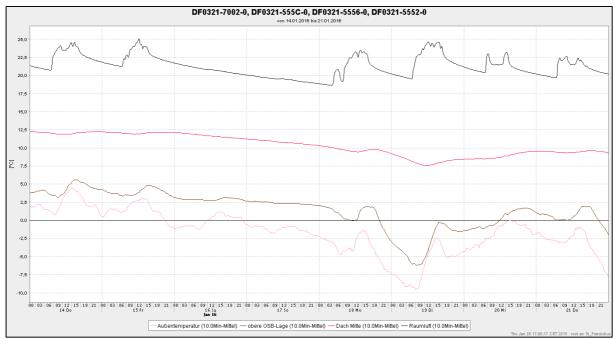


Abbildung 3-21: Temperaturverlauf im Dach 1 vom 14.01.2016 bis 21.01.2016 (10-Min-Mittel)

#### 3.6 Probleme und Verbesserungsansätze

Die Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten für das Bausystem Naumann & Stahr gestaltete sich äußerst komplex aufgrund der vielschichtigen Bauteilaufbauten mit mehreren Schichtenfolgen und Teilbereichen.

Wie im Beispiel anhand der Außenwand in Kapitel 3.4 dargestellt, liegt das Ergebnis einer vereinfachten Berechnung mit drei Teilbereichen jedoch sehr nah am Ergebnis der detaillierten Berechnung nach DIN EN ISO 6946 mit in diesem Fall 12 Teilbereichen. Für eine erste Annäherung an den U-Wert hat sich gezeigt, dass eine Berechnung mit den drei wesentlichen Teilbereichen, wie sie im PHPP vorgesehen ist, zunächst ein hinreichend genaues Ergebnis liefert. Dennoch wurde mit den detailliert berechneten U-Werten weitergearbeitet.

Problematisch war die zuvor beschriebene Zuordnung der Fühler mit unbekannter Lage beim Dach 2, welche dazu führte, dass die redundante Bestückung praktisch nicht genutzt werden konnte. Hier sei für Folgeprojekte unbedingt empfohlen, die Lage von Messfühlern gewissenhaft und eindeutig durch den Messtechnikinstallateur dokumentieren zu lassen.

## 3.7 Verallgemeinerung und Fazit

Das Monitoring des Temperaturverlaufs in den Bauteilen zeigte keine Probleme und bestätigt die guten U-Werte. Es ist von korrekter und korrekt wirkender Dämmung und Dichtung auszugehen.

Die gewählte Holzrahmenkonstruktion kann hinsichtlich ihrer wärmeschutztechnischen Eigenschaften wieder so errichtet werden und eignet sich hervorragend, um die Anforderungen an die Passivhausbauweise zu erfüllen.

Für die Nutzung als Schule sei gesagt, dass aufgrund der sehr hohen inneren Wärmequellen/Wärmelasten während der Belegungszeit in Kombination mit den solaren Gewinnen auch während der Heizperiode in den südorientierten Klassenräumen eher ein Wärmeüberangebot vorherrschte. In diesem Bereich wäre sogar aus winterlicher Sicht ein geringerer Wärmedämmstandard denkbar gewesen.

Mit den Ergebnissen der Untersuchungen zu den Raumlufttemperaturen befasst sich der Abschlussbericht 5 ausführlich.

## 4 Wärmebrücken

Für das Holzbausystem Naumann & Stahr, in welchem die Schule errichtet wurde, lag während der Planungsphase ein Zertifikat des Passivhausinstitutes Darmstadt als "Passivhaus geeignete Komponente – wärmebrückenfreier Anschluss" vor. Durch die Insolvenz des Fachplaners Naumann & Stahr aus Leipzig sind während der Bauphase sämtliche Wärmebrückenberechnungen für das Projekt verloren gegangen sowie das Zertifikat des Passivhausinstitutes erloschen. Es war zwar bekannt, dass die Konstruktionsdetails aus energetischer Sicht hochwertig sind, jedoch mangelte es an einer konkreten Verifizierung des Wärmebrückenzuschlages  $\Delta U_{WB}$ .

Für den korrekten Ansatz des Wärmebrückenzuschlags in der Energiebilanzierung des Gebäudes wurden diese Daten im Rahmen der Masterarbeit von Uwe Gebhardt [1] wiederhergestellt.

Im Folgenden wird das Wärmebrückenkonzept vorgestellt. Einzelne Detailpunkte werden näher beleuchtet, die Simulationsergebnisse insgesamt in einer Übersicht dargestellt sowie Schwachstellen kommentiert.



Abbildung 4-1: Markieren der geschlossenen Dämmschicht [1]

Nach eingehender Betrachtung der Werkplanung und Auflistung aller offensichtlichen Wärmebrücken (siehe Kapitel 4.1) wurden alle relevanten Konstruktionsdetails neu in CAD konstruiert. Dies wurde notwendig, da ein direkter Import der vorliegenden DWG-Daten in die Software zur Wärmebrückenberechnung zu fehleranfälligen und ungenauen Modellierungsergebnissen und somit zu unplausiblen Ergebnissen führte.

Die Details wurden dann als DXF-Dateien in die Wärmebrückensoftware ZUB Argos Pro [17] geladen und konnten als Zeichengrundlage für die Konstruktionselemente der Wärmebrücken genutzt werden. Nach Festlegung der bauphysikalischen Materialeigenschaften und Definition der Bauteilgrenzen wurde der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient  $\Psi$  ermittelt sowie die Einhaltung der feuchteschutztechnischen Anforderungen über die minimale Oberflächentemperatur  $\vartheta_{si}$  bzw. den Temperaturfaktor f<sub>Rsi</sub> überprüft.

## 4.1 Überblick vorhandener Details

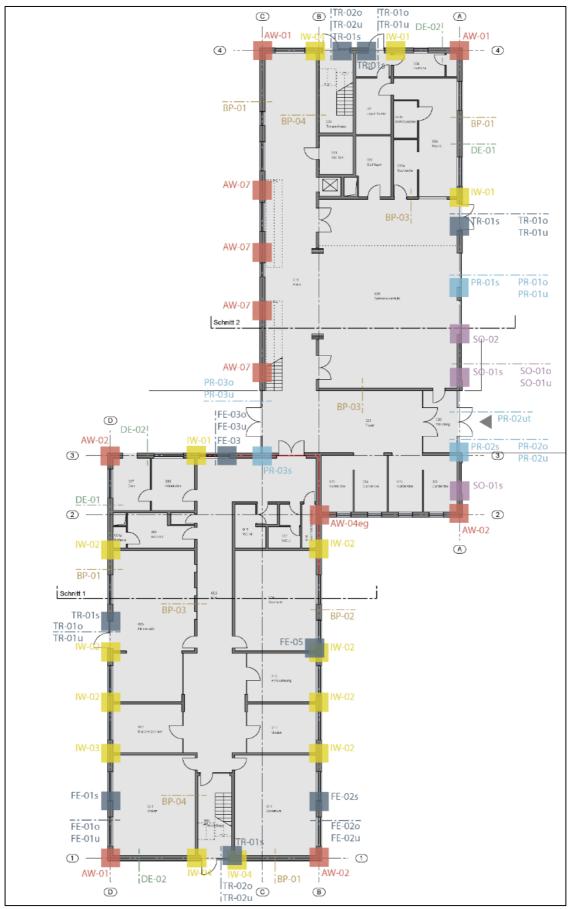


Abbildung 4-2: Grundriss Erdgeschoss – Wärmebrücken [1]

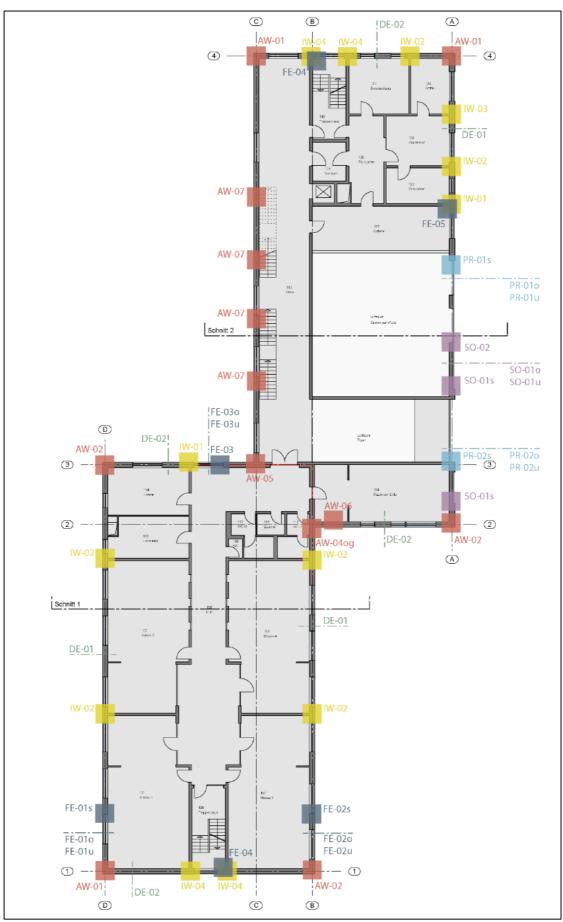


Abbildung 4-3: Grundriss 1. Obergeschoss – Wärmebrücken [1]



Abbildung 4-4: Grundriss 2. Obergeschoss – Wärmebrücken [1]



Abbildung 4-5: Schnitt 1-1 – Wärmebrücken [1]

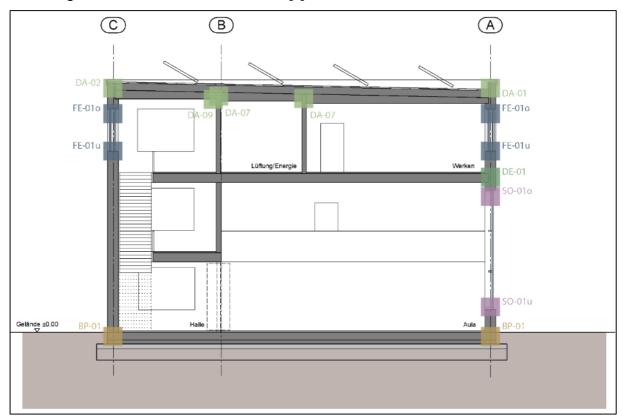


Abbildung 4-6: Schnitt 2-2 – Wärmebrücken [1]

## 4.2 Simulationsergebnisse

Tabelle 4-1 stellt den Vergleich der Ergebnisse aus den Berechnungen der Planungsphase und den neuen Berechnungen dar. Vereinzelt haben sich starke Abweichungen ergeben, in Summe bestätigt sich jedoch das sehr gute Ergebnis. Die Berechnungen und Ergebnisse sind in Anhang C aufgeführt.

Tabelle 4-1: Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen der Planungsphase [1]

Index	Wärmebrücke	Ψ <sub>Planung</sub> [W/(mK)]	Ψ <sub>Fertigstellung</sub> [W/(mK)]	Ψ <sub>Abweichung</sub> [W/(mK)]
AW-01	Außenecke Außenwand-Außenwand	-0,068	-0,049	+0,019
AW-02	Außenecke Außenwand-Brandwand	-0,056	-0,050	+0,006
IW-01	Anschluss Außenwand-Innenwand	-0,006	0,002	+0,008
FE-05	Anschluss Außenwand-Innenwand (Fensterbereich)	-0,473	-0,052	+0,421
DE-01	Anschluss Decke-Außenwand (Traufe)	0,005	0,017	+0,012
DE-02	Anschluss Decke-Außenwand (Giebel)	-0,003	0,012	+0,015
BP-01	Anschluss Bodenplatte-Außenwand	-0,097	0,040	+0,137
BP-03	Anschluss Bodenplatte-Innenwand	-0,095	0,025	+0,120
PR-02ut	Anschluss Eingangstür-Bodenplatte	-0,558	-0,354	+0,204
DA-01	Anschluss Dach-Außenwand (First, hohe Attika)	-0,057	-0,057	0,000
DA-02	Anschluss Dach-Außenwand (Traufe, niedrige Attika)	-0,067	-0,056	+0,011
DA-07	Anschluss Dach-Innenwand (längs)	-0,006	-0,001	+0,005
FE-01s	Anschluss Kastenfenster-Außenwand seitlich	-0,471	-0,053	+0,418

Bei der Betrachtung der während der Planungsphase berechneten Ψ-Werte fällt auf, dass nahezu alle Wärmebrücken negativ ermittelt wurden. Leider fehlen dazu die vollständigen Berechnungsprotokolle, wodurch eine konkrete Aussage zum Berechnungsvorgang schwierig ist.

Die Ergebnisse an den Außenecken des Gebäudes, wie Außenwandecken, Decken- und Dachanschlüsse sind abgesehen von einigen Toleranzen als ähnlich zu bewerten. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Abweichungen einerseits durch geringfügige Planungsänderungen der Baukonstruktion sowie durch eine bei den Berechnungen abweichende Modellbildung verursacht sind. So bestehen teilweise deutliche Unterschiede bei der Lage der Schnittebenen.

Deutlicher fallen die Abweichungen bei der Berechnung der erdberührenden Bauteile auf. Dies resultiert einerseits aus abweichenden U-Werten der Bodenplatte, andererseits könnte zudem ein unterschiedlicher Maßbezug zu Grunde liegen. Da zudem bei erdberührenden Bauteilen unterschiedliche Berechnungsmethoden mit wiederum unterschiedlichen Randbedingungen (speziell bei der Temperaturkorrektur) zugelassen sind, ist ein Vergleich hier schwer möglich.

Deutliche Abweichungen beider Berechnungen lassen sich auch bezüglich der Kastenfenster feststellen. Dabei liegt vermutlich entweder eine unterschiedliche Betrachtung durch die Fenstervereinfachung (Paneelmodell) des Beiblattes 2 der DIN 4108 oder eine deutlich abweichende Baukonstruktion während der Planungsphase zugrunde. Da die Ψ-Werte des Fensteranschlusses jedoch außergewöhnlich niedrig angesetzt wurden, und eine Berechnungsprotokollierung nicht vorliegt, ist auch eine Fehlbewertung hierbei nicht auszuschließen.

Die **Zusammenstellung der Ergebnisse** für alle 60 betrachteten Wärmebrücken ergab einen spezifischen Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$  von -0,001 W/(m²K), was einem hervorragenden Wert entspricht. Mit der detaillierten Nachweisführung im Jahr 2015 kann nun sicher davon ausgegangen werden, dass die Passivhausschule als gesamtes Projekt wärmebrückenfrei geplant ist und keine zusätzlichen Wärmeverluste durch die Details der Konstruktion zu erwarten sind.

Die folgende Tabelle 4-2 listet alle berechneten Wärmebrücken mit deren  $\Psi$ -Werten, Wirklängen und spezifischen Wärmeverlusten auf.

Tabelle 4-2: Ergebnisse –Wertberechnung [1]

Index	Bezeichnung Wärmebrücke	Ψ [W/(mK)]	Länge [m]	H <sub>WB</sub> [W/K]
AW-01	Außenecke Außenwand - Außenwand	-0,049	31,80	-1,558
AW-02	Außenecke Außenwand - Verlängerung Brandwand	-0,050	31,80	-1,605
AW-03	Innenecke Außenwand-Außenwand	0,038	3,60	0,137
AW-04eg	Innenecke Brandwand-Brandwand EG	0,037	3,45	0,127
AW-04og	Innenecke Brandwand-Brandwand 1./2. OG	0,037	7,15	0,264
AW-05	Innenecke Brandwand-Außenwand	0,042	7,15	0,299
AW-06	Anschluss Brandwand-Verlängerung Brandwand	0,008	7,15	0,058
AW-07	Aussteifung Nordfassade Halle	0,036	42,40	1,518
IW-01	Anschluss Außenwand-Innenwand (T II)	0,002	28,33	0,054
IW-02	Anschluss Außenwand-Innenwand (NT I)	0,002	72,59	0,145
IW-03	Anschluss Außenwand-Innenwand (NT I, Bereich Stütze)	0,011	10,60	0,120
IW-04	Anschluss Außenwand-Innenwand Treppenhaus (Stahlbeton)	0,017	26,40	0,448
DE-01	Anschluss Decke-Außenwand (Traufe)	0,017	216,39	3,743
DE-02	Anschluss Decke-Außenwand (Giebel)	0,012	103,60	1,200
DE-03	Anschluss Decke-Außenwand (Balkon Hausmeisterwohnung)	-0,037	8,55	-0,316
DE-04	Anschluss Decke-Außenwand (Balkon Hausmeisterwohnung, Innenecke)	0,030	8,55	0,261
BP-01	Anschluss Bodenplatte-Außenwand	0,040	120,22	4,801
BP-02	Anschluss Bodenplatte-Brandwand/Verlängerung Brandwand	0,033	53,40	1,750
BP-03	Anschluss Bodenplatte-Innenwand (Holzkonstruktion)	0,015	66,49	0,974
BP-04	Anschluss Bodenplatte-Treppenhauswand (Stahlbetonkonstruktion)	0,021	33,38	0,707
DA-01	Anschluss Dach-Außenwand (First, hohe Attika)	-0,057	90,13	-5,139
DA-02	Anschluss Dach-Außenwand (Traufe, flache Attika)	-0,056	97,63	-5,489
DA-03	Anschluss Dach-Außenwand (Balkon Hausmeisterwohnung)	-0,056	8,55	-0,477
DA-05	Anschluss Dach-Stahlbetonwand	0,028	33,38	0,941
DA-06	Anschluss Dach-Innenwand (quer)	0,008	20,65	0,169
DA-07	Anschluss Dach-Innenwand (längs)	-0,001	83,24	-0,050
DA-08	Unterzug (Kunstraum)	0,048	10,68	0,518
DA-09	Unterzug (Halle)	0,037	3,15	0,115
FE-01s	Anschluss Kastenfenster-Außenwand seitlich	-0,053	221,10	-11,718
FE-010	Anschluss Kastenfenster-Außenwand oben	-0,049	118,79	-5,792
FE-01u	Anschluss Kastenfenster-Außenwand unten	-0,056	5,95	-0,332
FE-02s FE-02o	Anschluss Kastenfenster-Verlängerung Brandwand seitlich	-0,056 -0,060	115,32 67,30	-6,490 -4,008
	Anschluss Kastenfenster-Verlängerung Brandwand oben Anschluss Kastenfenster-Verlängerung Brandwand unten	-0,060	,	
FE-02u FE-03s	Anschluss Kastenfenster-Verlangerung brahdwarid unter	-0,039	67,30 11,16	-3,973 -1,090
FE-030	Anschluss Kastenfenster-Brandwand oben	-0,098	7,38	-0,688
FE-03u	Anschluss Kastenfenster-Brandwand unten	-0,093	7,38	-0,088
FE-04	Anschluss Kastenfenster-Brandward unter	-0,045	16,00	-0,745
FE-05	Anschluss Kastenfenster-Außenwand (Prepenhads) schlich	-0,052	5,58	-0,720
TR-01s	Anschluss Außentür (Aula, Hortcafé, Anlieferung, Treppenhaus) seitlich	0,274	23,79	6,520
TR-010	Anschluss Außentür (Aula, Hortcafé, Anlieferung) oben	0,295	5,95	1,754
TR-01u	Anschluss Außentür (Aula, Hortcafé, Anlieferung) unten	0,351	5,95	2,091
TR-020	Anschluss Außentür (Treppenhaus) oben	0,296	4,60	1,360
TR-02u	Anschluss Außentür (Treppenhaus) unten	0,517	4,60	2,377
TR-03	Anschluss Balkonfenstertür-Außenwand (Hausmeisterwohnung) unten	-0,088	2,46	-0,218
PR-01s	Anschluss PR-Fassade - Außenwand (Aula) seitlich	0,154	23,70	3,642
PR-010	Anschluss PR-Fassade - Außenwand (Aula) oben	0,151	5,77	0,874
PR-01u	Anschluss PR-Fassade - Außenwand (Aula) unten	0,148	5,77	0,852
PR-02s	Anschluss PR-Fassade - Außenwand (Eingang) seitlich	0,166	12,30	2,039
PR-020	Anschluss PR-Fassade - Außenwand (Eingang) oben	0,189	5,25	0,995
PR-02u	Anschluss PR-Fassade - Bodenplatte (Eingang) unten	0,162	2,84	0,461
PR-02ut	Anschluss PR-Fassade - Bodenplatte (Eingang) unten, Türbereich	0,228	2,41	0,550
PR-03s	Anschluss PR-Fassade - Brandwand (Hofeingang) seitlich	0,196	2,70	0,529
PR-03o	Anschluss PR-Fassade - Außenwand (Hofeingang) oben	0,151	5,25	0,795
PR-03u	Anschluss PR-Fassade - Bodenplatte (Hofeingang) unten	0,184	2,84	0,522
PR-03ut	Anschluss PR-Fassade - Bodenplatte (Hofeingang) unten, Türbereich	0,258	2,41	0,622
SO-01s	Anschluss Solarfassade - Außenwand seitlich	0,028	15,75	0,443
SO-01o	Anschluss Solarfassade - Außenwand oben	0,016	8,01	0,131
SO-01u	Anschluss Solarfassade - Außenwand unten	0,016	8,01	0,128
SO-02	Anschluss Solarfassade - PR-Fassade	0,177	15,75	2,784
			umme H <sub>WB</sub>	-2,886
	wärmeübertragende U			4581,19
	spezifischer Wärmebrückenz			
			/-	

Im nächsten Abschnitt werden ausgewählte Details vorgestellt sowie insbesondere die Berechnungsergebnisse des unteren Gebäudeabschlusses kommentiert.

# 4.3 Ausgewählte Details

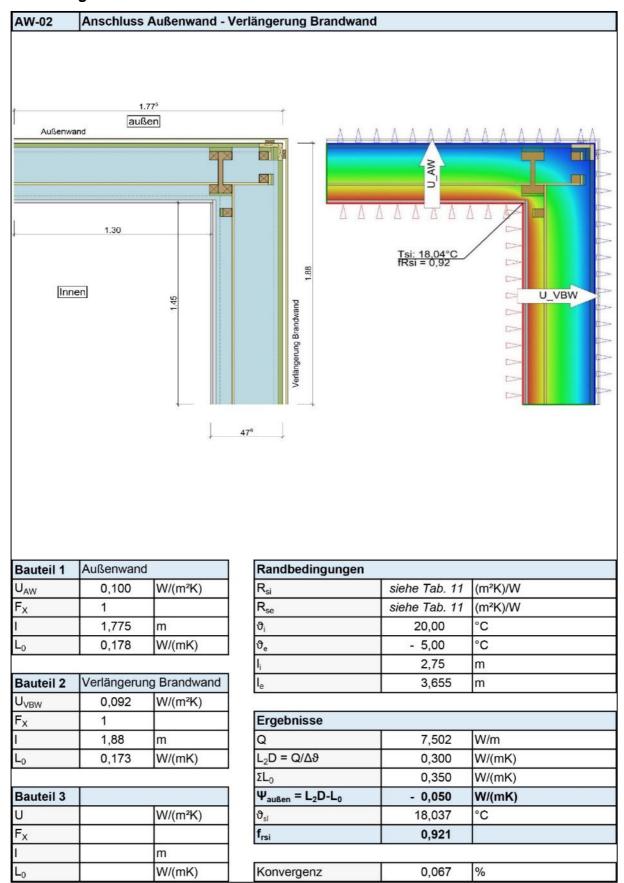


Abbildung 4-7: Wärmebrückenberechnung Anschluss Außenwand – Verlängerung Brandwand

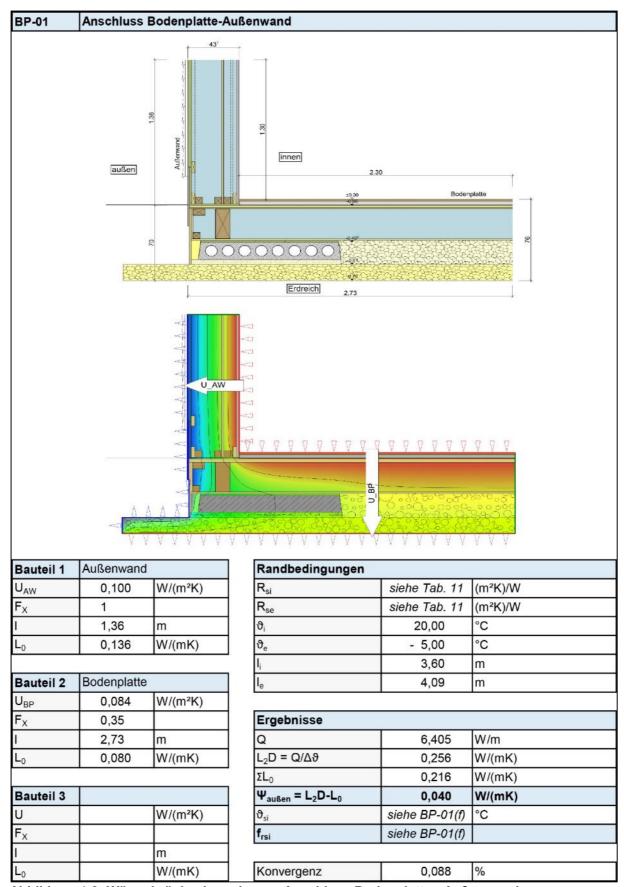


Abbildung 4-8: Wärmebrückenberechnung Anschluss Bodenplatte - Außenwand

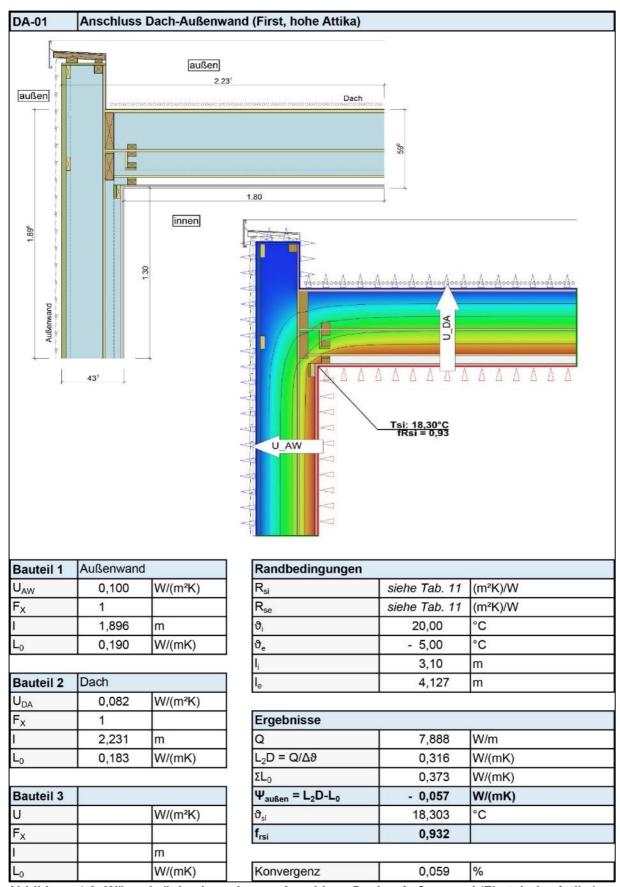


Abbildung 4-9: Wärmebrückenberechnung Anschluss Dach – Außenwand (First, hohe Attika)

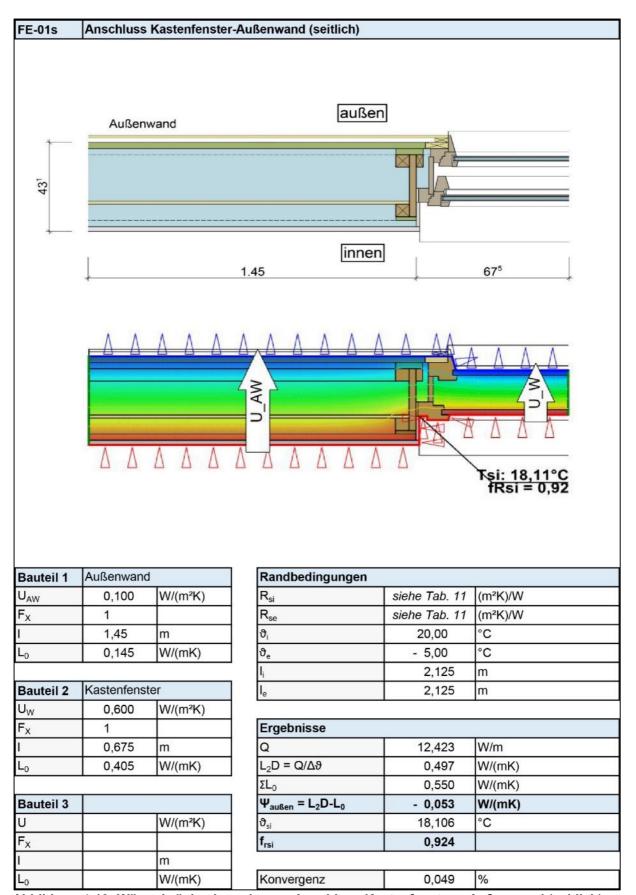


Abbildung 4-10: Wärmebrückenberechnung Anschluss Kastenfenster – Außenwand (seitlich)

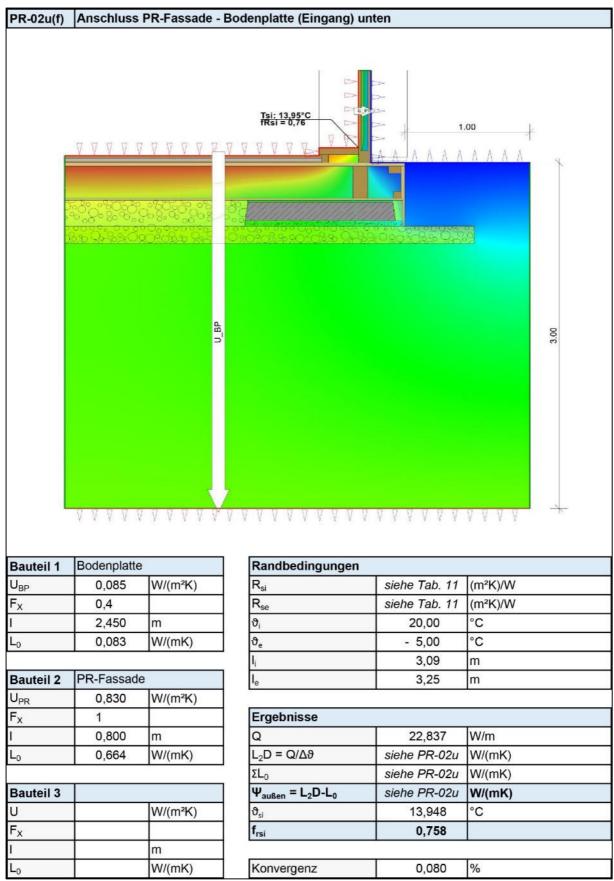


Abbildung 4-11: Wärmebrückenberechnung Anschluss Pfosten-Riegel-Fassade – Bodenplatte (Eingang) unten

#### Erdberührende Bauteile

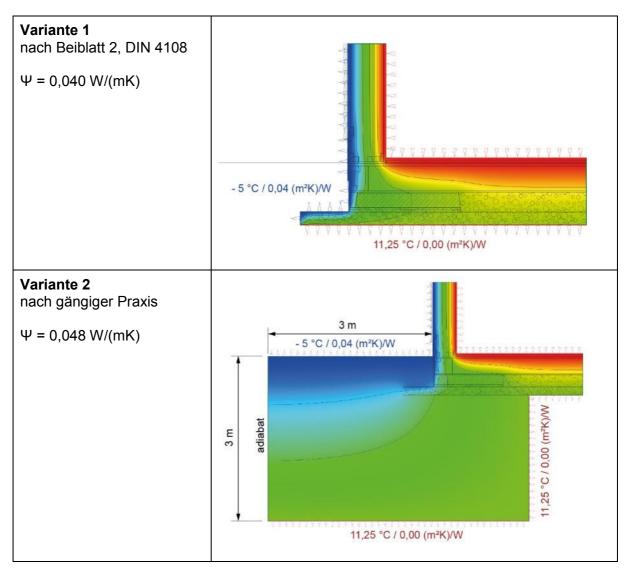
Es wurden drei verschiedene Methoden für erdberührende Bauteile einer näheren Untersuchung unterzogen. Die Temperaturrandbedingungen wurden dabei mit  $\vartheta_{innen}$  = 20 °C /  $\vartheta_{außen}$  = -5 °C bei allen Varianten gleich angesetzt.

In Variante 1 wurden die zusätzlichen Wärmeverluste über das Beiblatt 2 der DIN 4108 ermittelt. Das Erdreich wurde vereinfachend nicht modelliert und direkt unter der Bodenplatte über die Temperaturkorrektur gemäß DIN V 18599-2 eine Erdreichtemperatur von 10 °C angenommen [18].

Die Berechnungsvariante 3 basiert auf den Anforderungen der DIN EN ISO 10211. Es wurde ein großzügiges Erdreichmodell modelliert, welches an den vertikalen Rändern sowie an der unteren horizontalen Schnittebene adiabatisch abschließt.

Variante 2 berücksichtigte das Erdreich ebenfalls bei der Modellbildung durch einen Erdreichblock. Jedoch war dieser in den Abmessungen (3 x 3 m) kleiner und wurde vereinfachend nur um die dreifache Bauteildicke der Außenwand unter die Bodenplatte gezogen. Unterhalb der Bodenplatte, an der rechten, vertikalen Schnittebene sowie am unteren horizontalen Rand des Erdreichs wurden 10 °C angenommen [19].

Im Ergebnis zeigt sich, dass im untersuchten Fall mit der Variante nach DIN EN ISO 10211 der geringste Wärmebrückenzuschlag erzielt wurde.



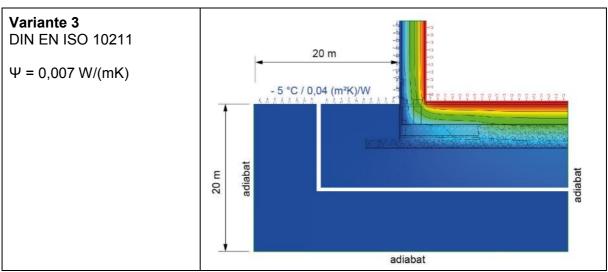


Abbildung 4-12: Modellbildung Erdreich - Auswirkungen auf den Ψ-Wert

# 4.4 Probleme und Verbesserungsansätze

Da das Gesamtgebäude als wärmebrückenfrei angesehen werden kann, sind Verbesserungsvorschläge kaum relevant.

Schaut man sich jedoch die Wärmebrücken mit den schlechtesten Simulationsergebnissen an, so ergäben sich Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Pfosten-Riegel-Fassade im Eingangsbereich. Hier treten an den Fußpunkten die geringsten Oberflächentemperaturen von 13,9 °C auf. Da es sich hierbei um Räume handelt, die als Verkehrsflächen periodisch gut gelüftet werden und mit einer Auffeuchtung bei funktionaler Benutzung dieser Räume nicht zu rechnen ist, können auch diese Bereiche als unbedenklich bewertet werden.

Grundsätzlich wäre es empfehlenswert gewesen, die Einbauebene der Eingangsfassade analog zur Fassade der Aula möglichst weit nach außen zu setzen.

Des Weiteren hätte im Aulabereich eine Doppelfassade analog den Kastenfensterkonstruktionen günstigere Ergebnisse geliefert.

Tabelle 4-3 zeigt die Ergebnisse gruppiert nach Anschlussart. Hieraus ist ersichtlich, dass die Fensteranschlüsse in Bezug auf die Anschlusslänge am häufigsten auftreten, der Wärmebrückeneinfluss jedoch deutlich im negativen Bereich liegt. Hieraus lässt sich schließen, dass sich der Aufmaß- und Nachweisaufwand eindeutig ausgezahlt haben. Den schlechtesten Einfluss auf das Gesamtergebnis hat hingegen die Pfosten-Riegel-Fassade mit ihrer zwar geringen Anschlusslänge, jedoch relativ hohen Wärmebrückeneffekten.

Tabelle 4-3: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse (Ψ-Wert) [20]

Wärmebrückengruppe	Länge [m]	ΣH <sub>WB</sub> [W/K]	$\Sigma \Delta U_{WB}$ [W/(m <sup>2</sup> K)]
Außenwandwärmebrücken	134,50	-0,76	-0,0002
Wärmebrücken der Innenwandanschlüsse	137,92	0,77	0,0002
Wärmebrücken der Geschossdecken	337,09	4,89	<mark>0,0</mark> 011
Wärmebrücken der Bodenplatten	273,48	8,23	<mark>0,001</mark> 8
Wärmebrücken der Dachanschlüsse	347,40	-9,41	-0,0021
Wärmebrücken in den Fensterbereichen	690,61	-21,97	-0,0048
Wärmebrücken der Pfosten-Riegel-Fassade	71,24	11,88	<mark>0,0026</mark>
Wärmebrücken der Solarfassade	47,51	3,49	<mark>0,</mark> 0008
Summe	2039,75	-2,89	-0,0006

Alle berechneten Wärmebrückendetails erfüllen die Anforderungen gemäß DIN 4108-2 hinsichtlich des hygienischen Feuchteschutzes. An keiner Wärmebrücke wird der Temperaturfaktor f<sub>Rsi</sub> von 0,7 unterschritten, sodass unter normalen Randbedingungen die Schimmelpilzfreiheit angenommen werden kann.

# 4.5 Verallgemeinerung und Fazit

Die Wärmebrückenberechnungen in [1] haben ergeben, dass das zum Einsatz gekommene Holzbausystem insgesamt als wärmebrückenfrei angesehen und aus dieser Hinsicht zur Nachahmung empfohlen werden kann. Einzelne Schwachstellen werden durch die Übererfüllung an anderer Stelle mehr als kompensiert.

Die in den aus Planungs- und Fertigstellungsphase vorliegenden Nachweisen nach Energieeinsparverordnung bzw. Passivhausprojektierungspaket angesetzten Wärmebrückenzuschläge von  $\Delta U_{WB}$  = 0,00 W/(m²K) haben sich durch die Untersuchungen bestätigt bzw. wurden mit  $\Delta U_{WB}$  = -0,001 W/(m²K) sogar minimal unterschritten.

Aus planerischer Sicht sollte es unter normierten Randbedingungen an keinem Punkt zu feuchteschutztechnischen Problemen kommen, sofern die Ausführung detailkonform umgesetzt und die Einblasdämmung lückenlos eingebracht wurde.

Um die Auswirkungen des Berechnungsaufwandes auf die Ergebnisse des EnEV-Nachweises zu untersuchen, wurden die folgenden drei Varianten des Wärmebrückenzuschlages probeweise in den aktuellen Nachweis in der Bilanzierungssoftware IBP 18599 HIGHEND eingegeben. Hierbei hat sich der Endenergiebedarf des Gebäudes gemäß Tabelle 4-4 entwickelt.

Tabelle 4-4: Auswirkungen unterschiedlicher Wärmebrückenzuschläge auf den Endenergiebedarf nach EnEV

	mit ΔU <sub>WB</sub> = -0,001 W/(m²K)	mit ΔU <sub>WB</sub> = 0,05 W/(m²K)	mit ΔU <sub>WB</sub> = 0,10 W/(m²K)
spez. Transmissionswärmeverlust [W/m²K] (+ prozentuale Verschlechterung)	0,337	0,38 (+13 %)	0,42 (+ 25 %)
Endenergiebedarf [kWh/(m²a)] (+ prozentuale Verschlechterung)	38,2	41,1 (+7,6 %)	44,4 (+16,2 %)

Obwohl der Aufwand für den Nachweis der zahlreichen Anschlusspunkte und Sonderfälle beträchtlich war, kann dieser somit als lohnenswert angesehen werden. Ein pauschaler Wärmebrückenzuschlag von  $\Delta U_{WB}$  = 0,05 W/(m²K) oder gar 0,10 W/(m²K) auf die gesamte Hüllfläche, bei Verzicht auf den detaillierten Nachweis, hätte bei dem vorliegenden Passivhausniveau erhebliche Verschlechterungen für die Bilanzierung ergeben und die hochgesteckten Ziele teils zunichte gemacht.

Der Berechnungsaufwand für einen detaillierten Nachweis aller Wärmebrücken eines Gebäudes kann nicht direkt am Gebäudetyp festgemacht werden. Vielmehr ist die Form des Baukörpers entscheidend und es sollte in der Komplexität der Baukonstruktion unterschieden werden. Maßgeblich für die Anzahl der Wärmebrücken ist die Anzahl der geometrischen, stofflichen und konstruktiven Anschlüsse. Neben der reinen Anzahl an Wärmebrücken ist für die Abschätzung des Arbeitsaufwandes die Diversität der Baukonstruktion des Gebäudes entscheidend. Während bei Konstruktionen in Massivbauweise meist nur wenige Elemente modelliert werden müssen, ist die Eingabe von Bauteilen einer Holzrahmenkonstruktion deutlich aufwändiger. Insbesondere dann hängt der Zeitaufwand von der Qualität der Planungszeichnungen ab. Den überschlägigen Zeitaufwand hierfür zeigt Tabelle 4-5.

Tabelle 4-5: Zeitaufwand der Berechnung einer Wärmebrücke

	Zeitaufwand je Detail [h]			
	Schwierigkeitsgrad	Schwierigkeitsgrad		
Erstellung von importfähigen CAD-Daten	entfällt	1,0		
Modellierung und Berechnung	1,5	2,0		
Aufbereitung der Ergebnisse	0,5	0,5		
Summe Zeitaufwand	2,0	3,5		

# 5 Feuchteschutz

Neben der in Kapitel 3 vorgenommenen Auswertung der Bauteiltemperaturen erfolgte auch eine eingehende Betrachtung der Bauteilfeuchten für die folgenden Regelbauteile: Bodenplatte, Außenwand (Standard) und Dach. Dies ist von Bedeutung, da ein erhöhter Feuchtegehalt die Wärmedämmfähigkeit des Bauteils verringern kann sowie Materialien durch Feuchtigkeit nachhaltig geschädigt werden können.

Im vorliegenden Kapitel werden für die genannten Bauteile jeweils zunächst die stationären Berechnungen (Glaser-Verfahren) vorgestellt, welche dann unmittelbar durch die instationären Berechnungen (WUFI) spezifiziert werden. Dies erfolgt in allen Fällen sowohl für den Gefachals auch für den Rahmenanteil. Anschließend wird jeweils die Auswertung der Messdaten vorgenommen, Probleme und kritische Aspekte werden diskutiert. Die Berechnungen befinden sich in Anhang D.

Zunächst erfolgte die Berechnung des möglichen Tauwasserausfalls für die stationäre Situation unter Zuhilfenahme des Glaserverfahrens mit der Software DÄMMWERK [21]. Mit der Berechnung der bauphysikalischen Vorgänge für ein Blockwinterklima und ein Blocksommerklima mit konstanten Bedingungen [22] lässt sich eine vorhersehbare Feuchtebelastung durch Diffusionsvorgänge eingrenzen. Das Verfahren dient zur besseren Einschätzung und nicht für eine genaue Vorhersage. Es eignet sich für den Vergleich unterschiedlicher Konstruktionen und die Bewertung der Auswirkungen bei deren Modifikation. Es liefert keine genauen Vorhersagen an Feuchtesituationen innerhalb der Baukonstruktion unter Nutzungsbedingungen und ist nicht für die Berechnungen des Austrocknungsverhaltens der Rohbaufeuchte geeignet [5].

Zusätzlich zu den stationären Berechnungen wurden instationäre Berechnungen mit der Software WUFI durchgeführt [6]. Ein Großteil der Untersuchungen wurde im Rahmen der Bachelorarbeit mit dem Titel "Vergleich stationärer und instationärer Temperatur- und Feuchteberechnungen für die Gebäudehülle einer Passivhausschule" von Maike Strahlendorff vorgenommen.

Bei instationären Temperatur- und Feuchteberechnungen wird mit möglichst realen Bedingungen und folglich mit schwankenden Temperaturen für das Innen- wie Außenklima sowie Aufheiz- und Abkühlvorgängen gerechnet. Die Wärmeleitung im Bauteil wird genauso wie Sonnenstrahlung berücksichtigt. Während bei der stationären Berechnung nur die Wasserdampfdiffusion berücksichtigt wird, werden bei der instationären Berechnung auch die Kapillarleitung und Oberflächendiffusion berücksichtigt [23, p. 7 f.].

"Als Randbedingungen dienen meteorologische Daten (Temperatur, relative Luftfeuchte, Regen/Schlagregen, Strahlung) und Raumklimadaten (Temperatur, relative Luftfeuchte), da diese in der Bauphysik die geeigneten Parameter zur Beschreibung der Verhältnisse an der Oberfläche eines bewitterten Bauteils sind." [23, p. 8] Damit sind die Ergebnisse von instationären Berechnungen wesentlich realistischer und wahrscheinlicher als die Ergebnisse stationärer Berechnungen.

Als Klimastandort wurde alternativ auf Hannover zurückgegriffen, da die Stadt auf ähnlicher geografischer Höhe wie Halle (Saale) liegt und die Klimadaten von Halle (Saale) nicht in WUFI verfügbar waren. Halle (Saale) ist bezüglich der Schlagregenbeanspruchung Gruppe 1 – geringe Beanspruchung zuzuordnen [24, p. 10.37]. Hannover ist der Gruppe 2 – mittlere Beanspruchung zuzuordnen. Wenn die Berechnungen am Standort Hannover kein Tauwasser aufweisen, sollte aufgrund der geringeren Beanspruchungsgruppe, in Halle (Saale) erst recht kein Tauwasser auftreten.

Als Berechnungszeitraum wurde die Zeit vom 1. Januar 2014 bis zum 31. Dezember 2017 gewählt (4 Jahre) bzw. Dach und Bodenplatte bis zum 31. Dezember 2020 (7 Jahre). Im ersten Jahr erfolgt die Austrocknung der Einbaufeuchte der verwendeten Materialien, danach kann das tatsächliche Wasseraufkommen in den einzelnen Schichten betrachtet und ausgewertet werden.

In den folgenden Berechnungen wurden immer der Gefachbereich und der Rahmenbereich getrennt betrachtet:

- Bodenplatte Gefachbereich, Bodenplatte Rahmenbereich
- Außenwand Gefachbereich, Außenwand Rahmenbereich
- Dach Gefachbereich, Dach Rahmenbereich (beide ohne Kiesauflage)

Bei allen erfolgten instationären Berechnungen muss darauf hingewiesen werden, dass die in der Software hinterlegten Materialdaten nicht immer zu 100 % mit der Realität übereinstimmen, da die Materialdatenbank der Software WUFI nur eine eingeschränkte Auswahl von Baustoffen ermöglicht. Fehlende Produktdaten der ausgeführten Fabrikate mussten geschätzt oder abgeleitet und in der Software bestmöglich abgebildet werden.

Bei OSB-Holzwerkstoffplatten sowie den Brettschichtholzträger im Dach wurde von einem massebezogenen Anfangsfeuchtegehalt von 15 M.-% ausgegangen. Die reale Einbaufeuchte ist nicht bekannt.

Des Weiteren wurde der Feuchteeintrag für einen Wohnraum zugrunde gelegt (was für die Hausmeisterwohnung im 2. OG zutreffend ist). Das Nutzungsprofil "Schule" ist in der Software nicht vorgesehen. Die sehr niedrigen, gemessenen relativen Feuchten in den Klassenräumen geben Anlass zu der Annahme, dass der Feuchteeintrag in der Schule geringer als bei einer Wohnnutzung ist. Insgesamt ist die relative Feuchte in diesem Objekt bedingt durch die mechanische Lüftung insbesondere in der kälteren Jahreszeit eher gering, was die Problematik entschärfen dürfte.

Die stationären sowie die instationären Berechnungen zielen darauf ab, die Feuchteeinträge durch Diffusion einschätzen zu können. Hinsichtlich unvorhergesehener Feuchtebelastung durch Konvektion, die insbesondere durch Undichtheiten in der Luftdichtheitsebene zu erheblichen Bauschäden führen kann, sei auf die hervorragenden Ergebnisse der Luftdichtheitsprüfungen im Jahr 2014 und 2017 verwiesen.

Die Auswertung der gemessenen Bauteilfeuchten wurde teilweise in der Masterarbeit "Qualitätssicherung einer Passivhausschule in Holzbauweise mithilfe ingenieurtechnischer Messverfahren" von Philipp Weingart vorgenommen.

### 5.1 Messorte und Messtechnik

Es handelt sich um die gleichen T/F-Fühler wie in Kapitel 3.2 ff. beschrieben.

### 5.2 Bodenplatte

### 5.2.1 Bodenplatte nach Glaser-Verfahren

Für die Bodenplatte lag bereits ein Gutachten zum klimabedingten Feuchteschutz vor. Untersucht wurde darin die Bodenplatte mit drei verschiedenen Bodenbelägen: Linoleum, Fliesen und Fliesen mit Abdichtung. Alle Berechnungen kommen zu dem Ergebnis, dass mit keiner Tauwasserbildung im Bauteil zu rechnen ist. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass "im Sinne der DIN 18195-4 "Abdichtung gegen Bodenfeuchte" eine Abdichtung unter den geplanten Konstruktionen erforderlich" ist und diese wiederum zu Änderungen der Ergebnisse des Feuchteschutznachweises führen würde. [5]

Als Trennlage zwischen den beiden Schichten Schaumglasschotter (Technopor / Geocell) unterhalb der Holzbodenplatte wurde lediglich eine Unterspannbahn Solitex UD vorgesehen.

Für die Untersuchung der Fußbodenkonstruktion im Rahmen des Monitorings wurden die Detailaufbauten der Regeldetails und die bekannten Materialkenndaten herangezogen. Der Bauteilquerschnitt stellt sich wie in Abbildung 5-1 gezeigt dar.

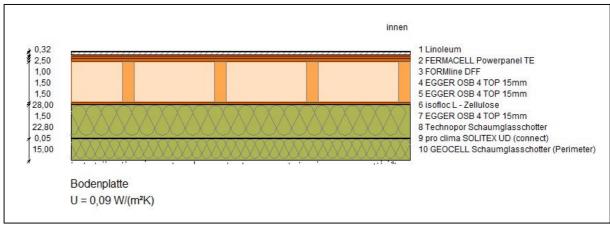


Abbildung 5-1: Bauteilguerschnitt Bodenplatte [21]

Folgende Eingaben wurden in DÄMMWERK vorgenommen:

	Cabiaht						
	Schicht	μmin [-]	μmax [-]	µmin*s [m]	μ <sub>max</sub> *s		sd [m]
1	Linoleum	800	1000	2,56	3,20	->	2,56
2	FERMACELL Powerpanel TE	56	56	1,40	1,40		1,40
3	FORMline DFF	3	3	0,03	0,03		0,03
4	EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
5	EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
6	isofloc L - Zellulose	1	2	0,28	0,56	->	0,28
7	EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
8	Technopor Schaumglasschotter	1	1	0,23	0,23		0,23
9	pro clima SOLITEX UD (connect	-	· -	0,06	0,06		0,06
0	GEOCELL Schaumglasschotter (P	1	1	0,15	0,15		0,15

Abbildung 5-2: Bodenplatte Gefach - Eingaben in DÄMMWERK [21]

	Schicht	μmin [-]	μmax [-]	µmin*s [m]	μ <sub>max</sub> *s [m]		sd [m]
1	Linoleum	800	1000	2,56	3,20	->	2,56
2	FERMACELL Powerpanel TE	56	56	1,40	1,40		1,40
3	FORMline DFF	3	3	0,03	0,03		0,03
4	EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
5	EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
6	Nadelholz	40	40	11,20	11,20		11,20
7	EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
8	Technopor Schaumglasschotter	1	1	0,23	0,23		0,23
9	pro clima SOLITEX UD (connect	_	-	0,06	0,06		0,06
10	GEOCELL Schaumglasschotter (P	1	1	0,15	0,15		0,15

Abbildung 5-3: Bodenplatte Rahmen - Eingaben in DÄMMWERK [21]

Es ist ersichtlich, dass beim Gefach die OSB-Platten mit 3 m bzw. im Rahmen das Nadelholz mit 11,2 m die höchsten s<sub>d</sub>-Werte aufweisen.

Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 zeigen die Glaserdiagramme des Gefachbereiches bzw. des Rahmenanteils der Bodenplatte. Die Partialdruckkurve (hellblau) liegt unterhalb der Sättigungskurve (lila). Für die untersuchten Bauteilquerschnitte ergibt sich der Glaserfall A. Dies bedeutet, dass nach dem Glaser-Verfahren mit keiner Tauwasserbildung zu rechnen ist.

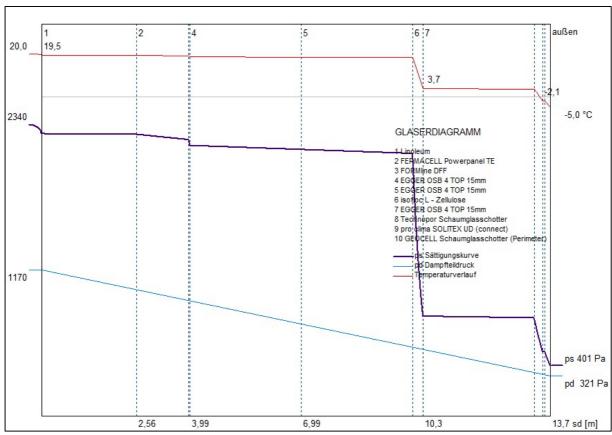


Abbildung 5-4: Glaserdiagramm Bodenplatte - Gefach [21]

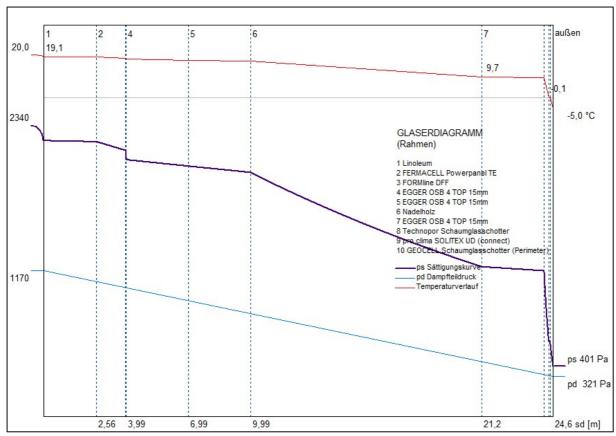


Abbildung 5-5: Glaserdiagramm Bodenplatte – Rahmen [21]

# 5.2.2 Bodenplatte - Gefach - instationär mit WUFI

Bei der Betrachtung des Gesamtwassergehaltes in der instationären Berechnung des Gefaches der Bodenplatte zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme der Feuchtewerte von 10,7 kg/m² auf 9,7 kg/m² bis zum Jahresende 2020 (siehe Abbildung 5-6).

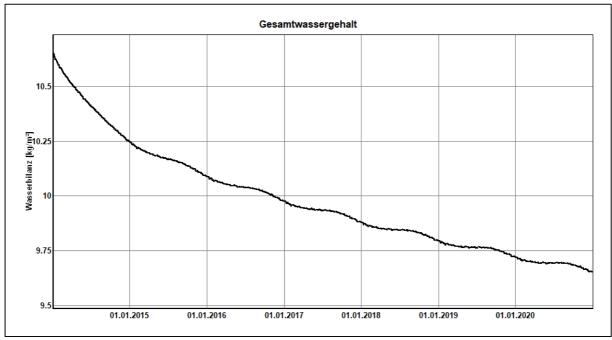


Abbildung 5-6: Gesamtwassergehalt der Holzbodenplatte - Gefach [6]

Die Filmdarstellung der WUFI-Berechnungen bis zum Jahr 2020 zeigt hohe relative Feuchten im Bereich unterhalb der Holzbodenplatte im Schaumglasschotter und im Unterbau aus Recyclingbeton (links im Bild, siehe Abbildung 5-7), was für die dortigen mineralischen Baustoffe unkritisch ist.

Die 80%-Marke der relativen Feuchte wird innerhalb der Holzbodenplatte im Bereich der unteren OSB-Lage und im unteren Drittel der Zellulosedämmung überschritten, weshalb diese im Folgenden näher betrachtet werden.

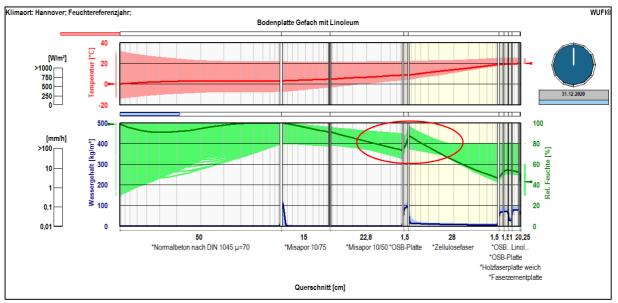


Abbildung 5-7: Temperatur- und Feuchteverlauf der Bodenplatte im Gefach [6]

Die Übersicht der Wassergehalte der einzelnen Bauteilebenen zu Beginn und nach sieben Jahren zeigt für alle Baustoffe abnehmende Feuchtegehalte, mit Ausnahme der OSB-Platte unterhalb der Zellulosedämmung, welche eine leichte Feuchtezunahme aufweist.

Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
*Normalbeton nach DIN 1045 µ=70	0,00	0,00	0,00	0,00
*Misapor 10/75, lastabtr. Wärmedä. unter Gründung	0,49	7,61	0,49	8,02
*Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)	0,00	0.00	0,00	0,01
*Misapor 10/50, lastabtr. Wärmedä., feuchtegeschü	0,34	0,40	0,32	0,60
*OSB-Platte (Dichte: 620 kg/m²)	92,00	92,98	91,28	108,06
*Zellulosefaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK)	12,00	8,88	8,83	12,25
*OSB-Platte (Dichte: 620 kg/m²)	92,00	69,00	67,84	92,00
*OSB-Platte (Dichte: 620 kg/m²)	92,00	71,37	69,52	92,32
*Holzfaserplatte weich	42,50	29,01	27,35	42,83
*Faserzementplatte	95,00	79,44	78,57	95,00
Linoleumboden, unbehandelt	95.00	62,67	59.03	95,00

Abbildung 5-8: Wassergehalte der einzelnen Schichten in der Bodenplatte - Gefach [6]

Ein genauerer Blick auf die beiden genannten Bauteilschichten zeigt für die Zellulosedämmung insgesamt einen Abfall des Wassergehaltes über die Jahre von ca. 17 Masse-% auf ca. 12,8 Masse-%. Demnach erscheint die zeitweilige Überschreitung der relativen Feuchte von 80 % aus der Filmdarstellung (Abbildung 5-7) unkritisch.

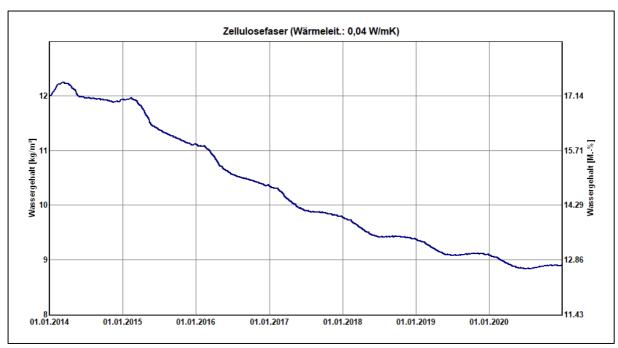


Abbildung 5-9: Wassergehalt der Zellulosedämmung in der Bodenplatte [6]

Die untere OSB-Lage (Abbildung 5-10) erfährt zwar im ersten Jahr eine Auffeuchtung von 15 auf ca. 17 Masse-%, dieser Wert fällt jedoch ab Mitte 2015 bis 2020 kontinuierlich wieder auf ca. 15 Masse-% ab. Es ist davon auszugehen, dass der Abwärtstrend sich in den Folgejahren fortsetzt.

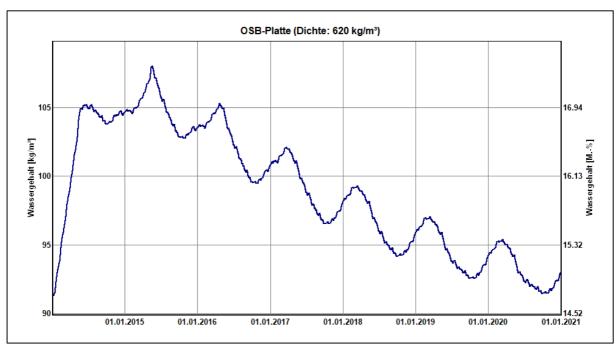


Abbildung 5-10: Wassergehalt der unteren OSB-Lage in der Bodenplatte [6]

Alle Werteverläufe befinden sich demnach im unkritischen Bereich.

# 5.2.3 Bodenplatte - Rahmen - instationär mit WUFI

Auch für den Rahmenanteil ist der Gesamtwassergehalt kontinuierlich von ca. 23 auf 21,4 kg/m² abfallend, wie Abbildung 5-11 verdeutlicht.

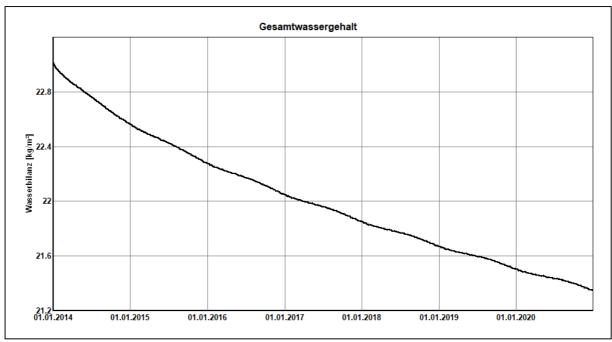


Abbildung 5-11: Gesamtwassergehalt der Holzbodenplatte – Rahmen [6]

Der Feuchteverlauf im Rahmenanteil der Bodenplatte gestaltet sich unterhalb des Holzbauteils ähnlich unkritisch wie beim Gefachanteil. Innerhalb des Holzfertigteils kommt es zu keiner Überschreitung der 80%-Marke der relativen Feuchte (rechts in Abbildung 5-12). Der Unterbau hingegen weist wie beim Gefach höhere Luftfeuchten auf (linker Bereich der Darstellung).

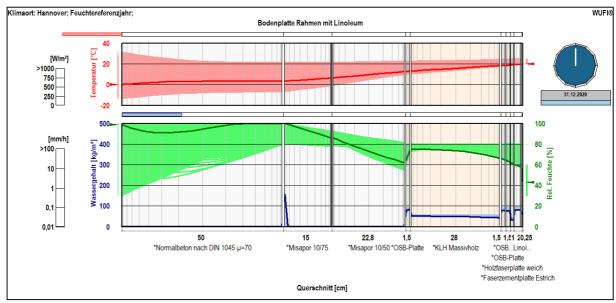


Abbildung 5-12: Temperatur- und Feuchteverlauf der Bodenplatte im Rahmen [6]

Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
Normalbeton nach DIN 1045 µ=70	0,00	0,00	0,00	0,00
Misapor 10/75, lastabtr. Wärmedä. unter Gründung	0,49	9,97	0,49	9,97
Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)	0,00	0,00	0,00	0,01
Misapor 10/50, lastabtr. Wärmedä., feuchtegeschüt	0,34	0,32	0,30	0,48
*OSB-Platte (Dichte: 620 kg/m²)	92,00	81,10	79,11	92,00
*KLH Massivholz	56,10	48,96	48,96	56,10
*OSB-Platte (Dichte: 620 kg/m²)	92,00	78,15	78,15	92,00
*OSB-Platte (Dichte: 620 kg/m²)	92,00	77,08	76,57	92,92
*Holzfaserplatte weich	42,50	32,75	32,39	42,95
*Faserzementplatte Estrich	95,00	81,45	81,35	95,00
Linoleumboden, unbehandelt	95,00	65,18	61,72	95,00

Abbildung 5-13: Wassergehalte der einzelnen Schichten in der Bodenplatte - Rahmen [6]

Die Überprüfungen der einzelnen Bauteilschichten in WUFI weisen auch tabellarisch (Abbildung 5-13) ausschließlich unkritische Wassergehalte auf, die am Ende der Simulation geringer sind als zum Zeitpunkt des Einbaus.

Dennoch sollen im Vergleich zum Gefach auch hier die Wassergehalte der Dämmebene und der beiden begrenzenden OSB-Lagen dargestellt werden. Abbildung 5-14 bestätigt die kontinuierliche Austrocknung der oberen OSB-Lage von 15 Masse-% Einbaufeuchte auf ca. 12,5 Masse-% nach sieben Jahren. Gleiches gilt für den Träger in Abbildung 5-15 (hier mit KLH Massivholz gerechnet), welcher von ca. 13 Masse-% Einbaufeuchte nach sieben Jahren auf ca. 11,5 Masse-% ausgetrocknet ist.

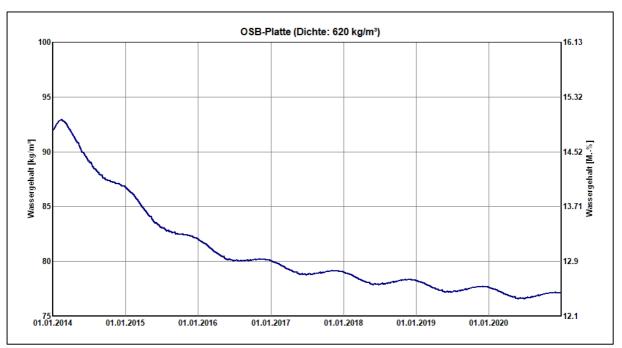


Abbildung 5-14: Wassergehalt der OSB-Lage oberhalb der Träger

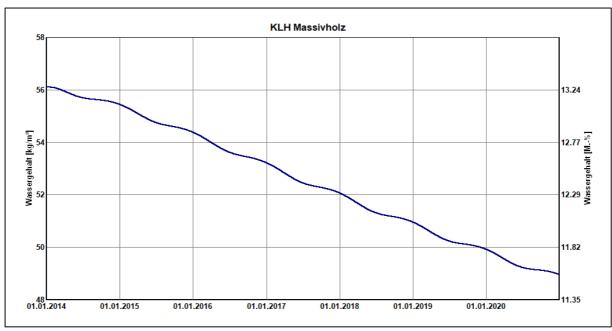


Abbildung 5-15: Wassergehalt der Träger in der Bodenplatte [6]

Stärkere Schwankungen im Feuchtegehalt zeigt die Darstellung der unteren OSB-Lage in Abbildung 5-16, welche jedoch insgesamt erkennen lässt, dass die Feuchtigkeitsspitzen von Jahr zu Jahr kleiner ausfallen.

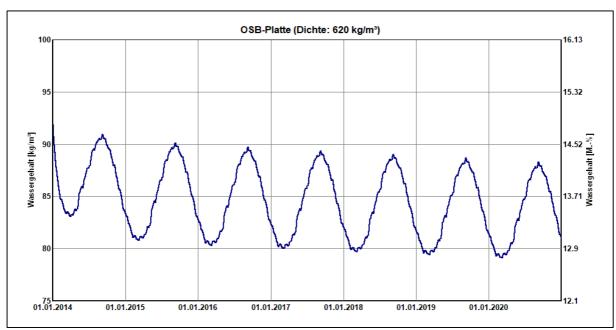


Abbildung 5-16: Wassergehalt der OSB-Lage unterhalb der Träger

Die instationären Berechnungen für die Bodenplatte haben unkritische Wassergehalte im Holzbauteil ergeben.

### 5.2.4 Auswertung der Bodenplatte

Die zuvor beschriebenen stationären und instationären Berechnungen zur Bodenplatte haben ergeben, dass diese tauwassersicher konstruiert ist. Im Vergleich dazu sollen nun die Messwerte herangezogen werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Feuchteverlauf der Bodenplatte für die Jahre 2016 und 2017 auf.

Die Bauteilfeuchten in der Zellulose und der oberen OSB-Lage liegen ganzjährig dicht bei einander, mit Werten zwischen 81,7 und 86 %. Wie erwartet ist die relative Feuchte mit zunehmender Tiefe höher, sie liegt für die untere OSB-Lage kontinuierlich knapp über 90 %.

Auffällig ist ein streng lineares Verhalten der Messwerte im September, was auf Probleme mit der Messtechnik hindeutet. Im Anschluss daran gleichen sich die Messwerte der drei Bauteilebenen stark an und befinden sich bis Mitte Dezember im Bereich von 90 %.

Die Ursache des sprunghaften Anstiegs des Messwertes in der oberen OSB-Lage auf 99.9~% ab Mitte Dezember konnte nicht geklärt werden. Der Wert verbleibt auch im Jahr 2017 auf diesem Niveau.

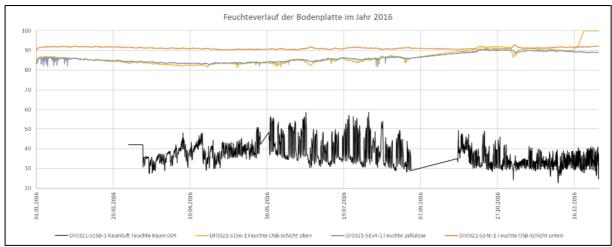


Abbildung 5-17: Feuchteverlauf der Bodenplatte im Jahr 2016

Während sich der Feuchteverlauf der unteren OSB-Lage (orange) im Jahr 2017 bei 90 bis 92 % einpegelt, ist in der Zellulosedämmung (grau) eine leichte Senke in Richtung der Verdunstungsperiode (Sommer) zu erkennen. Die relative Feuchte fällt hier moderat von 89 auf ca. 85 % ab.

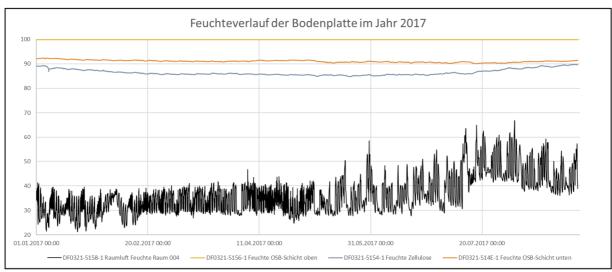


Abbildung 5-18: Feuchteverlauf der Bodenplatte im Januar bis Juli 2017

Die resultierende Holzfeuchte wurde im Rahmen der Masterarbeit von Philipp Weingart mit Hilfe der Tabelle zum Holzfeuchtegleichgewicht nach Keylwert bestimmt (siehe Anhang Kapitel 10.4) und liegt demnach bei hohen 18 bis 21 % (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Auswertung der Holzfeuchte der Bodenplatte [16] [25]

Bauteil	Temperatur Jahresmittel [°C]	rel. Luftfeuchte Jahresmittel [%]	resultierende Holzfeuchte [%]
obere OSB-Schicht	18,08	86,5	18
untere OSB-Schicht	16,57	91,1	21

Die gemessenen relativen Feuchten und die daraus resultierenden Holzfeuchten liegen deutlich über den Ergebnissen aus der Simulation. Ob die Abdichtung gegen aufsteigendes Wasser mit einer Unterspannbahn zu gering ist, ob Niederschlagswasser z. B. seitlich in die Konstruktion eindringt oder ob ein messtechnisches Problem vorliegt, konnte durch das Monitoring nicht geklärt werden. Ebenso kann eine eventuelle Feuchtebelastung während der Bauausführung nicht ausgeschlossen werden.

# 5.2.5 Probleme und Verbesserungsansätze

Die Messergebnisse der Bodenplatte liegen höher als die Simulationswerte. Die Ursache ist nicht bekannt. Da ein Messfühler ab Dezember 2016 einen unplausiblen Verlauf zeigt, liegt u. U. allgemein ein messtechnisches Problem vor.

Die Untersuchungen können nicht abschließend klären, ob der vorliegende Aufbau einer ins Erdreich eingelassenen Bodenplatte als Holzrahmenelement ohne unterseitige Abdichtung nach DIN 18195-4 "Abdichtung gegen Bodenfeuchte" dauerhaft schadensfrei bleibt. Es wird empfohlen, die messtechnische Auswertung auch über die Projektlaufzeit hinaus aufrecht zu erhalten und das Bauteil weiterhin zu beobachten.

#### 5.3 Außenwand

#### 5.3.1 Außenwand Standard nach Glaser-Verfahren

Die Untersuchung der Außenwand wurde auf den Standardaufbau beschränkt, hierbei wurden die Detailaufbauten der Regeldetails und die bekannten Materialkenndaten herangezogen. Der Bauteilquerschnitt stellt sich wie in Abbildung 5-19 gezeigt dar.

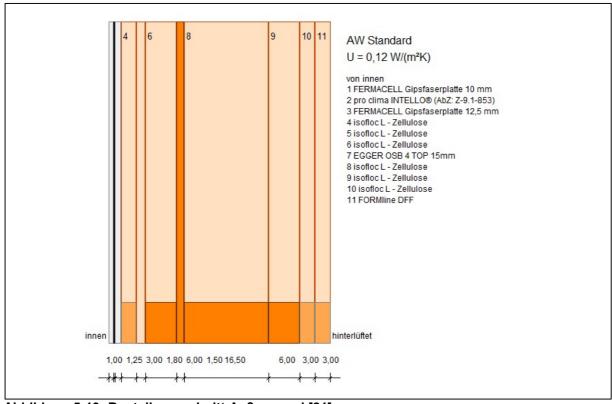


Abbildung 5-19: Bauteilquerschnitt Außenwand [21]

# Folgende Eingaben wurden in DÄMMWERK vorgenommen:

Diff	fusionswiderstände						•••••
	Schicht	μ <sub>min</sub> [-]	μmax [-]	μ <sub>min</sub> *s [m]	μ <sub>max</sub> *s [m]		sd [m]
1	FERMACELL Gipsfaserplatte 10	13	13	0,13	0,13		0,13
2	pro clima INTELLO® (AbZ: Z-9.	-	-	7,50	7,50		7,50
3	FERMACELL Gipsfaserplatte 12,	13	13	0,16	0,16		0,16
4	isofloc L - Zellulose	1	2	0,03	0,06	->	0,03
5	isofloc L - Zellulose	1	2	0,02	0,04	->	0,02
6	isofloc L - Zellulose	1	2	0,06	0,12	->	0,06
7	EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
8	isofloc L - Zellulose	1	2	0,17	0,33	->	0,17
9	isofloc L - Zellulose	1	2	0,06	0,12	<-	0,12
10	isofloc L - Zellulose	1	2	0,03	0,06	<-	0,06
11	FORMline DFF	3	3	0,09	0,09		0,09
					$\Sigma \mu^*s$	=	11,34

Abbildung 5-20: Außenwand Gefach - Eingaben in DÄMMWERK [21]

Schicht	μmin [-]	μmax [-]	μ <sub>min</sub> *s [m]	μ <sub>max</sub> *s [m]	sd [m]
l FERMACELL Gipsfaserplatte 10	13	13	0,13	0,13	0,13
2 pro clima INTELLO® (AbZ: Z-9.	-	-	7,50	7,50	7,50
3 FERMACELL Gipsfaserplatte 12,	13	13	0,16	0,16	0,16
4 Nadelholz	40	40	1,20	1,20	1,20
5 FORMline DFF	3	3	0,05	0,05	0,05
6 EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	12,00	12,00	12,00
7 EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00	3,00
8 EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	33,00	33,00	33,00
9 EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	12,00	12,00	12,00
0 Nadelholz	40	40	1,20	1,20	1,20
l Nadelholz	40	40	1,20	1,20	1,20

Abbildung 5-21: Außenwand Gefach - Eingaben in DÄMMWERK [21]

Es zeigt sich, dass im Gefachanteil die pro clima Intello bestimmungsgemäß mit 7,5 m den höchsten  $s_d$ -Wert aufweist. Für den Rahmenanteil hat der Steg aus OSB 4 den höchsten Diffusionswiderstand.

Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23 zeigen die Glaserdiagramme des Gefaches der Außenwand bzw. des Rahmenanteils an der ungünstigsten Stelle, also mit dem geringsten Wärmedurchlasswiderstand aus der detaillierten U-Wert-Berechnung (in Kapitel 3.1 als Teilbereich 8 bezeichnet). Die Partialdruckkurven bleiben unter den Sättigungskurven. Die markanten Sprünge in der Sättigungskurve liegen in der Dämmebene mit niedrigem s<sub>d</sub>-Wert und hohem Temperaturabfall.

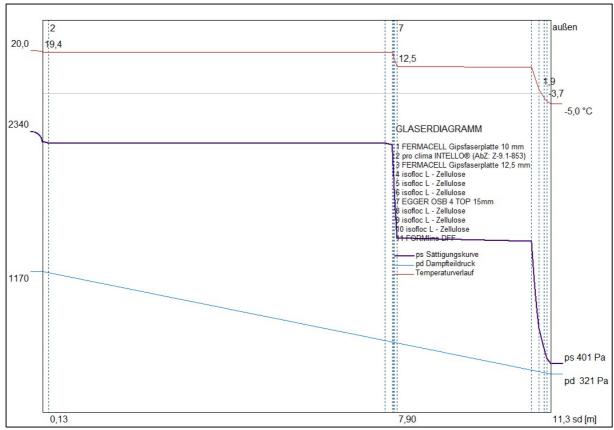


Abbildung 5-22: Glaserdiagramm Außenwand Standard – Gefach [21]

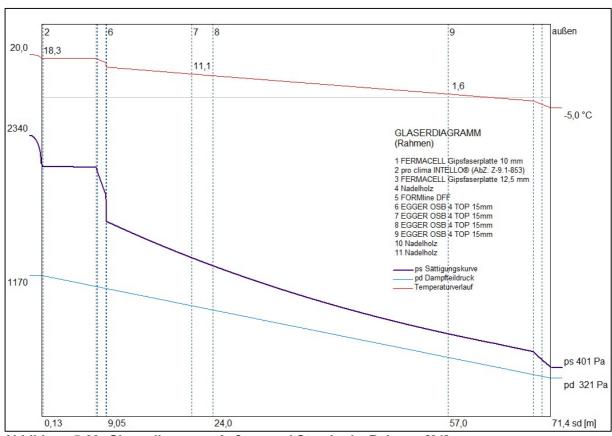


Abbildung 5-23: Glaserdiagramm Außenwand Standard - Rahmen [21]

Die Konstruktion ist nach außen hin sehr diffusionsoffen und zudem hinterlüftet. Aus beiden stationären Berechnungen ergibt sich, dass die untersuchten Teilbereiche tauwassersicher sind.

#### 5.3.2 Außenwand Standard – Gefach – instationär mit WUFI

Zunächst wurde der Gesamtwassergehalt im Gefachbereich der Außenwand untersucht. Als Materialkennwert für das Thermoholz wurde alternativ der Datensatz für "Fichte longitudinal" als äußere Fassadenbekleidung verwendet.

Die Simulation ergibt, dass die Einbaufeuchte der verwendeten Materialien bis in den Herbst 2014 hinein austrocknet. In den Folgejahren bleibt der Wassergehalt abgesehen von jahreszeitlich bedingten Schwankungen von einem Jahr auf das nächste konstant, die Konstruktion befindet sich im eingeschwungenen Zustand (siehe Abbildung 5-24, vgl. dazu Rahmenanteil Abbildung 5-29).

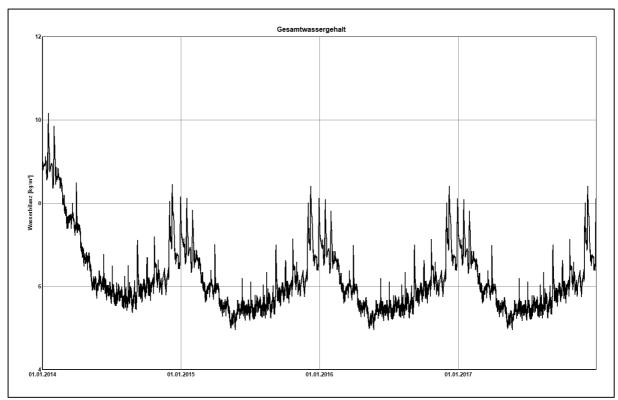


Abbildung 5-24: Gesamtwassergehalt der Außenwand mit Holzbekleidung – Gefach [6]

Abbildung 5-25 zeigt die Mittelwertkurven der Temperatur- und Feuchteverläufe in der Außenwand mit Holzbekleidung im Feldbereich.

Im oberen Teil (rot) sind die Temperaturschwankungen über den gesamten Berechnungsverlauf zu sehen. Der untere Teil zeigt den Verlauf des Wassergehalts (blau) beziehungsweise der relativen Feuchte (grün) in der Außenwand. Aus der Darstellung geht hervor, dass in allen Bauteilschichten im Verlauf der Berechnungen 80 % relative Feuchte erreicht und teilweise überschritten werden. Dies betrifft die raumseitige OSB-Aussteifung hinter und die Zellulosedämmung in der Installationsebene, welche bis zu 90 % relative Feuchte erreichen.

Auch die Holzfaserplatte, ein Teilbereich der Zellulosedämmung sowie die äußere Fassadenbekleidung erreichen ähnliche Werte.

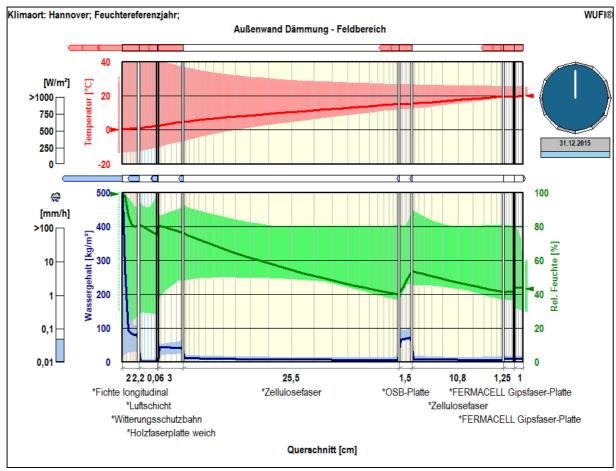


Abbildung 5-25: Temperatur- und Feuchteverlauf der Außenwand mit Holzbekleidung im Gefach [6]

Eine nähere Betrachtung des Wassergehalts je Schicht zeigt jeweils eine erste Abnahme und dann ein Einschwingen der Wassergehalte. Auffeuchtungen finden nicht statt. Abbildung 5-26 und Abbildung 5-27 demonstrieren dies am Beispiel der Holzfaserplatte bzw. der OSB-Wandaussteifung hinter der Installationsebene.

Der Wassergehalt der Holzfaserschicht beträgt nach der Austrocknungsphase im Winter maximal ca. 44 kg/m³ (entsprechend ca. 16 Masse-%), im Sommer minimal ca. 25 kg/m³ (entsprechend ca. 9 Masse-%). Der Wassergehalt der OSB-Wandaussteifung schwankt nach der Austrocknungsphase zwischen 10 und 11,5 Masse-%.

Für die Entwicklung holzzerstörender Pilze ist gemäß [26] eine Holzfeuchte von mehr als 20 % erforderlich. Ausgehend von diesem Grenzwert liegen die betrachteten Bauteilebenen im unkritischen Bereich [26].

Den Ergebnissen kommt weiterhin zugute, dass sich die Niederschlagsdaten auf den Standort Hannover (Schlagregenbeanspruchung Gruppe 2 – mittlere Beanspruchung) und nicht Halle (Saale) (Schlagregenbeanspruchung Gruppe 1 – geringe Beanspruchung) beziehen. Der tatsächliche Wassergehalt im Bauteilquerschnitt sollte im Verlauf der Berechnungen in Halle (Saale) niedriger liegen.

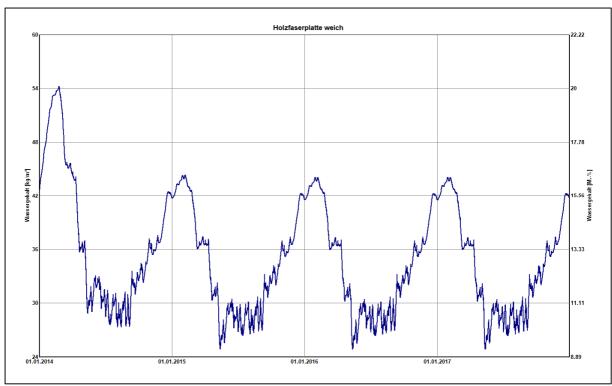


Abbildung 5-26: Wassergehalt der Holzfaserplatte in der Außenwand [6]

Eine tabellarische Übersicht über die Wassergehalte je Schicht findet sich in Abbildung 5-28. Auch hier ist zu erkennen, dass die Feuchte in den Materialien vom Anfangs- zum Endwassergehalt zurückgegangen ist. Lediglich die Wetterschale ist naturgemäß äußeren Einflüssen ausgesetzt und wird durch die hohe Feuchteaufnahme einem stärkeren Alterungsprozess unterliegen.

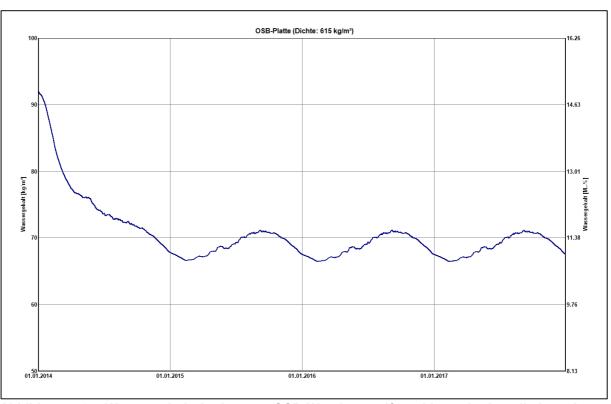


Abbildung 5-27: Wassergehalt der inneren OSB-Wandaussteifung hinter der Installationsebene in der Außenwand [6]

Wassergehalt [kg/m²]				
Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
*Außenbekleidung Holz	80,00	158,91	30,40	176,89
*Luftschicht	1,88	1,69	0,20	4,72
*Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)	0,00	0,00	0,00	0,01
*Holzfaserplatte weich	42,50	41,61	24,86	54,26
*Zellulosefaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK)	12,00	7,05	6,11	12,00
*OSB-Platte (Dichte: 615 kg/m²)	92,00	67,53	66,44	92,00
*Zellulosefaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK)	12,00	5,91	5,48	12,00
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	8,49	7,61	15,80
*INTELLO	6,70	3,56	2,90	6,70
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	9,01	6,51	15,80

Abbildung 5-28: Wassergehalte der einzelnen Schichten in der Außenwand - Gefach [6]

Alle Ergebnisse sind als unkritisch anzusehen.

### 5.3.3 Außenwand Standard – Rahmen – instationär mit WUFI

Wie schon im Feldbereich der Außenwand trocknet auch im Balkenbereich die Einbaufeuchte der verwendeten Materialien konstant aus (siehe Abbildung 5-29). Dies ist insbesondere auf die Austrocknung der OSB-Platten und der Holzweichfaser zurückzuführen. Mit Ausnahme der Wetterschale aus Thermoholz liegen alle Bauteilschichten dauerhaft deutlich unter dem Grenzwert von 20 Masse-% für die Bildung von holzzerstörenden Pilzen.

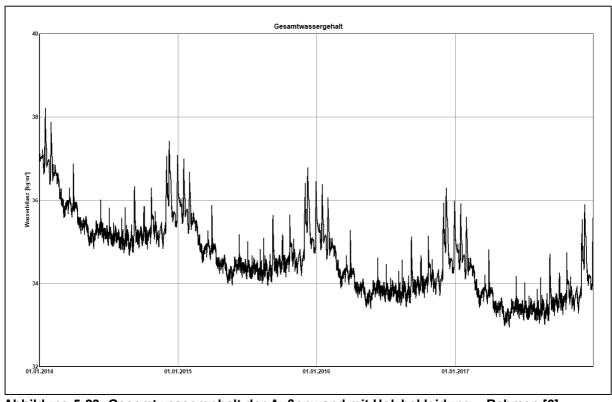


Abbildung 5-29: Gesamtwassergehalt der Außenwand mit Holzbekleidung – Rahmen [6]

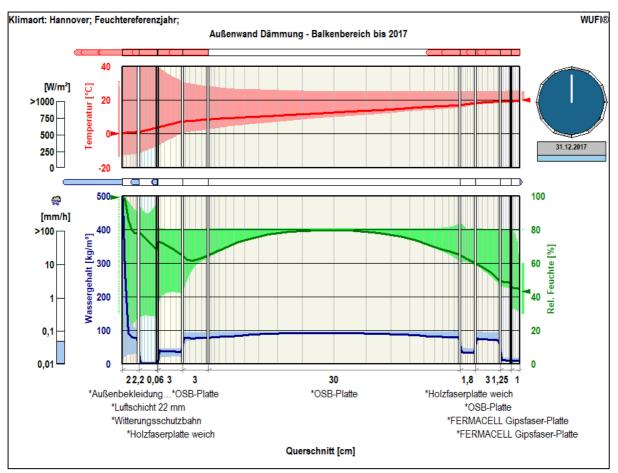


Abbildung 5-30: Temperatur- und Feuchteverlauf der Außenwand mit Holzbekleidung im Rahmen [6]

Beim Vergleich der Abbildung 5-25 und Abbildung 5-30 ist ablesbar, dass die relative Feuchte im Rahmenbereich deutlich weniger schwankt als im Gefachbereich. Sie ist in der Mitte des OSB-Steges nahezu konstant. Im Bauteilquerschnitt werden bis zu 80 % relative Feuchte erreicht, im Bereich der Hinterlüftung und der Wetterschale deutlich mehr.

Gemäß der Übersicht in Abbildung 5-31 wird auch hier deutlich, dass die Wassergehalte mit Ausnahme der Wetterschale zurückgehen.

/assergehalt [kg/m³]				
Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
*Außenbekleidung Holz	80,00	155,85	30,27	173,56
*Luftschicht 22 mm	1,88	1,32	0,20	3,91
*Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)	0,00	0,00	0,00	0,00
*Holzfaserplatte weich	42,50	36,57	24,06	42,50
*OSB-Platte (Dichte: 615 kg/m²)	92,00	76,55	74,17	92,00
*OSB-Platte (Dichte: 615 kg/m³) (Kopie)	92,00	86,81	86,81	92,16
*Holzfaserplatte weich	42,50	33,08	32,72	42,72
*OSB-Platte (Dichte: 615 kg/ms) (Kopie)	92,00	72,09	71,51	92,00
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	10,01	9,50	15,80
*INTELLO	6,70	3,92	3,35	6,70
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	9,28	6,75	15,80

Abbildung 5-31: Wassergehalte der einzelnen Schichten in der Außenwand - Rahmen [6]

#### 5.3.4 Auswertung Außenwand

Die stationären und instationären Berechnungen zur Außenwand haben ergeben, dass diese tauwassersicher konstruiert ist. Im Vergleich dazu sollen nun die Messwerte herangezogen werden.

Im folgenden Diagramm (Abbildung 5-32) zeigt sich zunächst anhand von Tagesmittelwerten, dass die Temperaturwerte für Wand 1 (durchgezogene Linien) und die redundanten Fühler in Wand 2 (gestrichelt) bis auf wenige Abweichungen nahezu deckungsgleich sind. Auch die Feuchtewerte liegen nah beieinander und erscheinen plausibel. Mitte Juli ist ein Datenausfall zu beobachten.

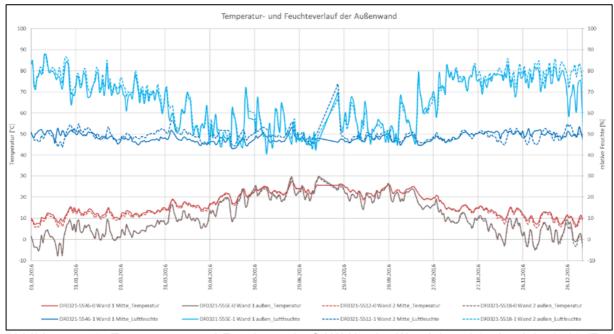


Abbildung 5-32: Temperatur- und Feuchteverlauf AW Nord – Wand 1 und 2 - im Jahr 2016 (Tagesmittel)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 5-33) wurden der Übersichtlichkeit halber die redundanten Werte für Wand 2 ausgeblendet. Es ist zu erkennen, dass die Außenluftfeuchte (lila) im Tagesmittel in der wärmeren Jahreszeit niedriger ist als in der kalten Jahreszeit, während die Raumluftfeuchte (grün) im Sommer deutlich höher ist. Dies ist physikalisch bedingt durch die Temperaturabhängigkeit der Wasserdampfaufnahme. Die schwarze Kurve der Raumlufttemperatur vollzieht über das Jahr keine großen Schwankungen, die Tagesmitteltemperatur der Außenluft (rosa) steigt hingegen zum Sommer naturgemäß an und kann damit eine höhere absolute Feuchtigkeit aufnehmen.

Diese äußeren Veränderungen haben kaum Auswirkungen auf die Luftfeuchte in der Wandmitte (dunkelblau), welche über den Jahresverlauf zwischen mit 45 bis 55 % kaum schwankt. Im äußeren Wandbereich hingegen (hellblau) ist der Einfluss der äußeren Witterungsverhältnisse deutlich zu erkennen. Hier erfolgt der Kurvenverlauf gegenüber der Außenluftfeuchte meist um ca. 10 % nach unten verschoben. Bei steigender Bauteiltemperatur im Sommer sinkt die relative Bauteilfeuchte kontinuierlich ab. Gleiches gilt für die Wintermonate. Sinkt die Temperatur der Bauteile, so ist ein stetiger und kontinuierlicher Anstieg der Bauteilfeuchte zu beobachten.

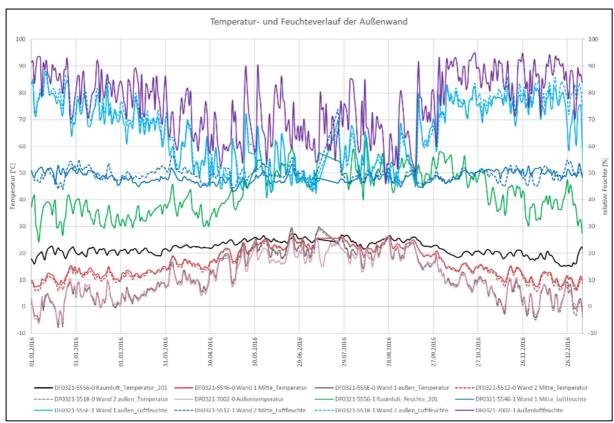


Abbildung 5-33: gemessener Temperatur- und Feuchteverlauf Außenwand Nord

Für die Jahresmittelwerte im Jahr 2016 ergibt sich dabei folgende Auswertung (Tabelle 5-2):

Tabelle 5-2: Jahresmittelwerte und resultierende Holzfeuchte der Außenwand Nord [27] [16]

Ebene	Temperatur Jahresmittelwert [°C]	rel. Luftfeuchte Jahresmittelwert [%]	resultierende Holzfeuchte [%]
Raumluft	21,99	43,11	-
Wand 1 Mitte	16,96	48,31	9,2
Wand 1 außen	11,87	64,73	12,0
Wand 2 Mitte	16,41	49,96	9,2
Wand 2 außen	11,48	65,94	12,0
Außenluft	10.97	75.89	-

Die Holzfeuchte der Außenwand liegt im Normbereich (12 % - 24 %) und darunter und ist als unkritisch zu betrachten. Dies betrifft vor allem die Bauteilmessungen in der Mitte. Größere Abweichungen ergeben sich dabei nur für die Werte im äußeren Bereich. Die guten Ergebnisse aus der Simulation haben sich hier bestätigt.

#### 5.3.5 Probleme und Verbesserungsansätze

Beim Schichtenaufbau der Außenwand Standard ist kritisch anzumerken, dass die Dampfbremse pro clima Intello zwischen den beiden Gipsfaserplatten raumseitig der Installationsebene liegt. Dadurch ist eine Beschädigung der Dampfbremse durch den Einsatz von Öffnungen, wie zum Beispiel Steckdosen, unvermeidbar. Dies widerspricht dem Sinn und Zweck einer Luftdichtheitsebene und ist grundsätzlich zu vermeiden, um das Einströmen feuchter Raumluft in den Bauteilquerschnitt zu unterbinden.

Mit dem Glaserverfahren wurde deshalb überprüft, ob ein Verzicht auf die Dampfbremse für das untersuchte Bauteil nachteilig gewesen wäre. Im Ergebnis zeigt sich, dass das Bauteil auch ohne den Einbau der Dampfbremse tauwassersicher funktioniert hätte.

# Folgende Eingaben wurden in DÄMMWERK vorgenommen:

Schicht	μmin [-]	μmax [-]	μ <sub>min</sub> *s [m]	µmax*s [m]		s(
1 FERMACELL Gipsfaserplatte 10	13	13	0,13	0,13		0,1
2 FERMACELL Gipsfaserplatte 12,	13	13	0,16	0,16		0,1
3 isofloc L - Zellulose	1	2	0,03	0,06	->	0,0
4 isofloc L - Zellulose	1	2	0,02	0,04	->	0,0
5 isofloc L - Zellulose	1	2	0,06	0,12	->	0,0
6 EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,0
7 isofloc L - Zellulose	1	2	0,17	0,33	->	0,1
8 isofloc L - Zellulose	1	2	0,06	0,12	<-	0,1
9 isofloc L - Zellulose	1	2	0,03	0,06	<-	0,0
FORMline DFF	3	3	0,09	0,09		0,0

Abbildung 5-34: Außenwand Gefach ohne Dampfbremse - Eingaben in DÄMMWERK [21]

Schicht	µmin [-]	μ <sub>max</sub> [-]	μ <sub>min</sub> *s [m]	μ <sub>max</sub> *s [m]	s <sub>d</sub>
FERMACELL Gipsfaserplatte 10	13	13	0,13	0,13	0,13
FERMACELL Gipsfaserplatte 12,	13	13	0,16	0,16	0,16
Nadelholz	40	40	1,20	1,20	1,20
FORMline DFF	3	3	0,05	0,05	0,0
EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	12,00	12,00	12,00
EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00	3,00
EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	33,00	33,00	33,00
EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	12,00	12,00	12,00
Nadelholz	40	40	1,20	1,20	1,2
Nadelholz	40	40	1,20	1,20	1,2

Abbildung 5-35: Außenwand Rahmen ohne Dampfbremse - Eingaben in DÄMMWERK [21]

Die Glaserdiagramme zeigen, dass auch für den Aufbau ohne Dampfbremse raumseitig der Dämmung die Partialdruckkurven unterhalb der Sättigungskurven liegen. Es gibt keinen Tauwasserausfall. Man ist hier mit dem Einbau der Dampfbremse auf "Nummer sicher" gegangen, was aus Kostengründen in künftigen Bauprojekten vermieden werden sollte.

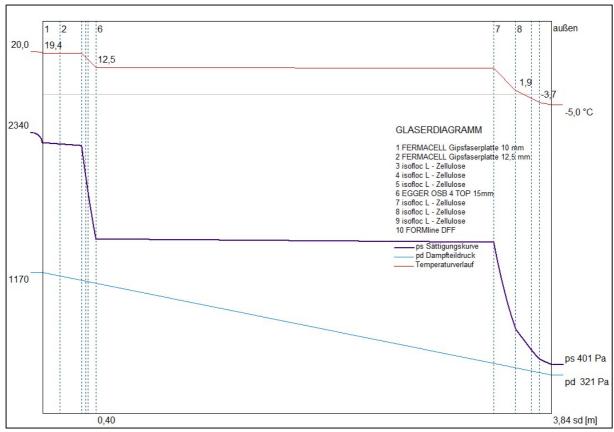


Abbildung 5-36: Glaserdiagramm Außenwand Standard ohne Dampfbremse – Gefach [21]

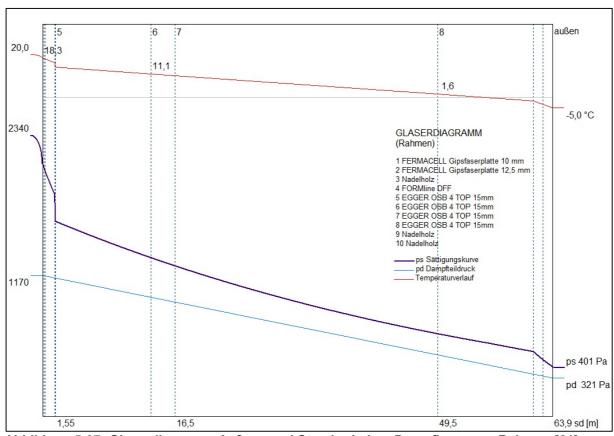


Abbildung 5-37: Glaserdiagramm Außenwand Standard ohne Dampfbremse – Rahmen [21]

#### 5.4 Dach

#### 5.4.1 Dach nach Glaser-Verfahren

# 5.4.1.1 Ursprüngliche Planung

Der Flachdachaufbau war ursprünglich ohne den Einbau einer Dampfbremse geplant. Nach Ansicht des ursprünglichen Fachplaners N&S, welcher dann durch Insolvenz ausschied, wäre die OSB-Lage diffusionsdicht genug gewesen. Ein rechnerischer Nachweis lag jedoch nicht vor.

#### 5.4.1.2 Bauphysikalisches Gutachten

Der Aufbau wurde in einem bauphysikalischen Gutachten mit dem Glaser-Verfahren überprüft [2] und daraus geschlossen, dass die anfallende Tauwassermenge in den Sommermonaten zwar vollständig verdunstet, die maximal zulässige Feuchtezunahme des Holzwerkstoffes nach DIN 4108-3 jedoch überschritten worden wäre. Im Gutachten heißt es dazu:

"Die Tauzone des untersuchten Flachdachaufbaus liegt im Bereich einer OSB-Platte. Rechnerisch ist hier eine Feuchtezunahme von  $u_m = 7.3 \%$  zu rechnen und überschreitet somit die Anforderung der zulässigen Feuchtezunahme nach DIN 4108-3 für Holzwerkstoffe mit einem maximalen Wert von  $u_m = 3 \%$ .

Rechnerisch ist nach DIN 4108-3 mit einer maximalen Tauwassermasse von  $m_{W,T}$  = 1.249,9 g/m² und nach EN ISO 13788 mit einer maximalen Tauwassermenge von g<sub>c</sub> = 1.233 g/m² zu rechnen. Die zulässige maximale flächenbezogene Tauwassermenge wird nach beiden Berechnungsverfahren überschritten." [2]

Daraufhin kam die Dampfbremse pro clima Intello im Dach zum Einsatz, was auch die Entscheidung für deren Einbau in der Außenwand zur Folge hatte.

#### 5.4.1.3 Berechnungen im Rahmen des Monitorings – gemäß Ausführung

Die stationären Berechnungen für den zur Ausführung gekommenen Flachdachaufbau erfolgten sowohl für das Gefach als auch für den ungünstigsten Rahmenanteil und ergaben einen zulässigen Flachdachaufbau mit einer Tauzone im Bereich der obersten OSB-Platte. Dieses Berechnungsverfahren kann nur Dampfbremsen mit konstantem sd-Wert bewerten. Bei der pro clima Intello handelt es sich jedoch um eine feuchtevariable Dichtungsbahn.

Der Bauteilquerschnitt stellt sich wie in Abbildung 5-38 gezeigt dar.

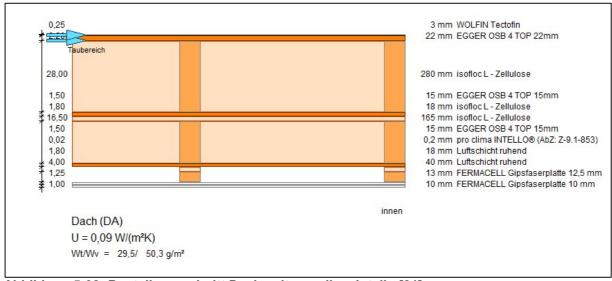


Abbildung 5-38: Bauteilquerschnitt Dach, mit pro clima Intello [21]

# Folgende Eingaben wurden in DÄMMWERK vorgenommen:

Schicht	μmin [-]	μmax [-]	μ <sub>min</sub> *s [m]	μ <sub>max</sub> *s [m]		sd [m]
1 FERMACELL Gipsfaserplatte 10	13	13	0,13	0,13		0,13
2 FERMACELL Gipsfaserplatte 12,	13	13	0,16	0,16		0,16
3 Luftschicht ruhend	1	1	0,04	0,04		0,04
4 Luftschicht ruhend	1	1	0,02	0,02		0,02
5 pro clima INTELLO® (AbZ: Z-9.	-	-	7,50	7,50		7,50
6 EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
7 isofloc L - Zellulose	1	2	0,17	0,33	->	0,17
8 isofloc L - Zellulose	1	2	0,02	0,04	->	0,02
9 EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
10 isofloc L - Zellulose	1	2	0,28	0,56	->	0,28
ll EGGER OSB 4 TOP 22mm	200	200	4,40	4,40		4,40
12 WOLFIN Tectofin	15000	25000	37,50	62,50	<-	62,50

Abbildung 5-39: Dach Gefach - Eingaben in DÄMMWERK [21]

Diff	fusionswiderstände (Rahmen)						
	Schicht	μ <sub>min</sub> [-]	μ <sub>max</sub> [-]	μ <sub>min</sub> *s [m]	µmax*s [m]		sd [m]
1	FERMACELL Gipsfaserplatte 10	13	13	0,13	0,13		0,13
2	FERMACELL Gipsfaserplatte 12,	13	13	0,16	0,16		0,16
3	Nadelholz	40	40	1,60	1,60		1,60
4	FORMline DFF	3	3	0,05	0,05		0,05
5	pro clima INTELLO® (AbZ: Z-9.	-	-	7,50	7,50		7,50
6	EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
7	Nadelholz	40	40	6,60	6,60		6,60
8	FORMline DFF	3	3	0,05	0,05		0,05
9	EGGER OSB 4 TOP 15mm	200	200	3,00	3,00		3,00
10	Nadelholz	40	40	11,20	11,20		11,20
11	EGGER OSB 4 TOP 22mm	200	200	4,40	4,40		4,40
12	WOLFIN Tectofin	15000	25000	37,50	62,50	<-	62,50
					Σ μ*s	3 =	100,20

Abbildung 5-40: Dach Rahmen - Eingaben in DÄMMWERK [21]

Für den Gefachanteil ist ersichtlich, dass die pro clima Intello mit 7,5 m einen deutlich kleineren  $s_d$ -Wert aufweist als die Dachbahn mit 62,5 m. Die Ausführung wird der Anforderung gemäß [7] gerecht, wonach der Einbau von Dampfsperren ( $s_d \ge 100$  m) in außenseitig sehr dampfdichten Konstruktionen wie dieser nicht mehr den Regeln der Technik entspricht. Der hier gewählte Aufbau mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse mit  $s_d = 7,5$  m erschwert einerseits die Diffusion während der Tauperiode (Winter), ermöglicht jedoch andererseits die sommerliche Umkehrdiffusion zur Trocknung des winterlichen Feuchteeintrages.

Diese Feuchtevariabilität der Dichtungsbahn lässt sich im Glaser-Verfahren nicht abbilden, der s<sub>d</sub>-Wert der pro clima Intello ist in der Verdunstungsperiode deutlich kleiner als 7,5 m. Dennoch wurden zunächst die Bauteilaufbauten mit dem Glaser-Verfahren untersucht.

Abbildung 5-41 zeigt das Glaserdiagramm für den Gefachbereich. Der Tauwasserbereich in der oberen OSB-Platte ist hier deutlich erkennbar, es ergibt sich Glaser-Fall D. Nach dem Glaser-Verfahren nach DIN 4108-3 kann die anfallende Tauwassermenge von  $m_{W,T} = 80 \text{ g/m}^2$  während der Verdunstungsperiode ( $m_{W,V} = 95 \text{ g/m}^2$ ) vollständig verdunsten. (Abbildung 5-42)

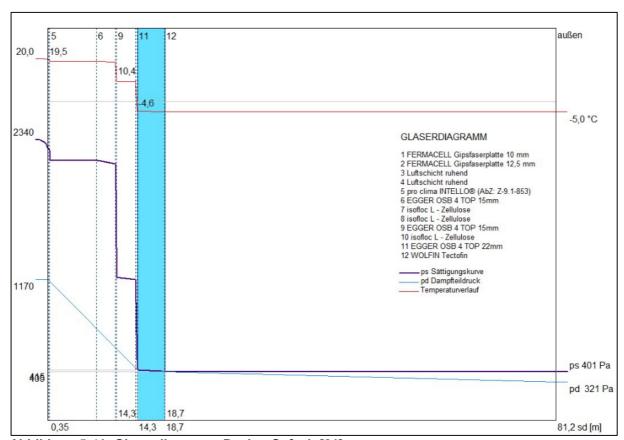


Abbildung 5-41: Glaserdiagramm Dach – Gefach [21]

<u> </u>	405 32: 2.000 1.200 18,71 81,2: Mey ter
Verdunstungsperiode [Pa] 1.200 2.000 2.000	2.000 1.200 18,71 81,2 Mev ter
	18,71 81,2: Mev ter
sd-Wert [m] 0 14,31 18,71	M <sub>ev</sub> te
	E-17.10
Tauebene / Taubereich Mc Mev	cr/m <sup>c</sup> Tacr
g/m <sup>c</sup> g/m <sup>c</sup>	g/m lag
vor EGGER OSB 4 TOP 22mm 80 95	95 7

Abbildung 5-42: Darstellung der Tauwasserbildung im Gefach [21]

Abbildung 5-43 stellt das Glaserdiagramm für den Rahmenanteil dar. Auch hier ist der Tauwasserbereich in der oberen OSB-Lage erkennbar. Nach dem Glaser-Verfahren nach DIN 4108-3 kann auch hier die anfallende Tauwassermenge von  $m_{W,T}$  = 32 g/m² während der Verdunstungsperiode ( $m_{W,V}$  = 54 g/m²) vollständig verdunsten.

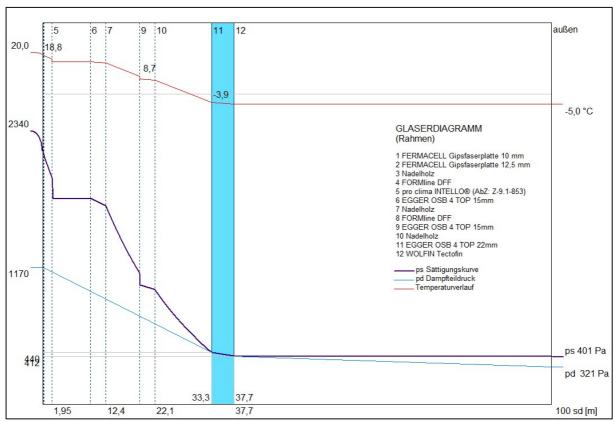


Abbildung 5-43: Glaserdiagramm Dach – Rahmen [21]

Tauwasserbildung im Inneren von Ba	auteilen (A.2)			
Dampfdrücke	Pi	Pcl	Pc2	Pe
Tauperiode [Pa]	1170	440	412	321
Verdunstungsperiode [Pa]	1.200	2.000	2.000	1.200
sd-Wert [m]	0	33,30	37,70	100,20
Tauebene / Taubereich		Mc	Mev	tev
		g/m²	g/mº	Tage
vor EGGER OSB 4 TOP 22mm		32	54	53
Schicht 11 "EGGER OSB 4 TOP 22m Erfüllt die Anforderungen nach DIN 4		. Die Feuchtezuna	ahme beträgt 0,	2 Masse %.
Enant die Fundi del dingen flach Bir 4	100 0, 0.2.1.			
Die Tauwasserbildung im Bauteil ist	im Sinne von DIN	4108-3 unschädl	ich (Abs.5.2.1)	
Tauwassermassen M <sub>c</sub> ≤ 500 g/m², V	erdunstungsmas	sen M <sub>ev</sub> ≥ M <sub>c</sub>		

Abbildung 5-44: Darstellung der Tauwasserbildung im Rahmen [21]

Nach DÄMMWERK beträgt die Feuchtezunahme 0,6 Masse-% im Gefachanteil bzw. 0,2 Masse-% im Rahmenanteil und unterschreitet somit die Anforderung der Feuchtezunahme nach DIN 4108-3 für Holzwerkstoffe mit einem maximal zulässigen Wert von 3 Masse-%. Demnach wäre der Tauwasserausfall im Dach mit dem vorbeschriebenen Berechnungsverfahren als unschädlich zu bewerten.

#### 5.4.2 Dach - Gefach - instationär mit WUFI

Die instationäre Simulation des Daches erfolgte in WUFI mit der Einstellung "Keine Absorption/Emission", um der fehlenden Sonneneinstrahlung auf die Dachbahn (durch Bekiesung und Photovoltaik) möglichst gerecht zu werden.

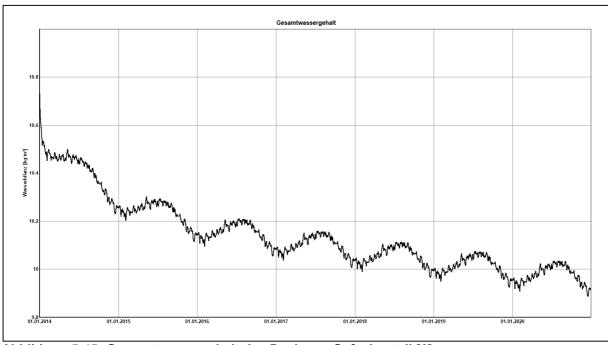


Abbildung 5-45: Gesamtwassergehalt des Daches - Gefachanteil [6]

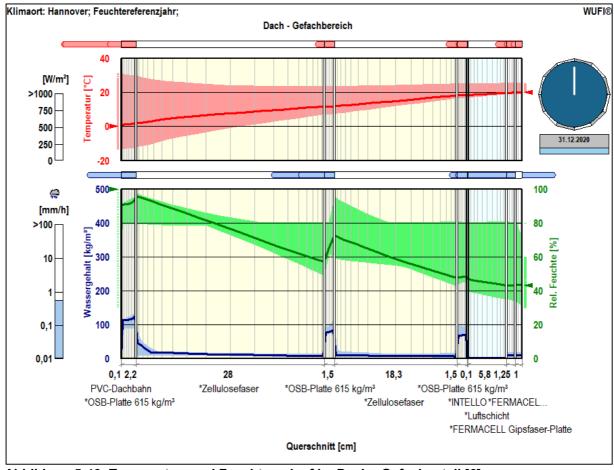


Abbildung 5-46: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach - Gefachanteil [6]

Die Untersuchung des Gesamtwassergehaltes des Dachaufbaus bis zum 31.12.2020 ergibt zunächst, dass der Dachaufbau insgesamt stetig an Feuchtigkeit verliert, beginnend mit 10,75 kg/m² bis hin zu ca. 9,9 kg/m² nach 7 Jahren.

In der Filmdarstellung (Abbildung 5-46) zeigt sich, dass die näher zu betrachtenden Bauteilebenen mit relativen Feuchten von zeitweilig über 80 % im Bereich der oberen OSB-Platte unmittelbar unter der Dachabdichtung und in der 28 cm starken Zellulosedämmung liegen. Hier bestätigen sich die Ergebnisse aus der stationären Berechnung.

Die tabellarische Aufstellung der Wassergehalte der einzelnen Schichten bescheinigt, dass in der oberen OSB-Platte und der darunterliegenden Zellulosedämmung ein Anstieg des Wassergehaltes über den Zeitraum bis zum Jahr 2020 zu verzeichnen ist (Abbildung 5-47). Ein Austrocknen der Einbaufeuchte erfolgt lediglich in den Bauteilebenen raumseitig der maßgeblichen Dämmschicht, in der sich ebenfalls Feuchte anreichert.

Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
PVC-Dachbahn	0,00	0,00	0,00	0,04
*OSB-Platte 615 kg/m²	92,00	115,89	92,00	120,45
*Zellulosefaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK)	12,00	12,80	11,99	13,52
*OSB-Platte 615 kg/m <sup>s</sup>	92,00	78,32	<mark>76,</mark> 07	92,00
*Zellulosefaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK)	12,00	7,46	6,89	12,06
*OSB-Platte 615 kg/m <sup>8</sup>	92,00	67,98	66,63	92,00
*INTELLO	6,70	3,96	3,60	6,70
*Luftschicht	1,88	0,39	0,29	1,88
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	8,87	7,22	15,80
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	8.95	6.82	15,80

Abbildung 5-47: Wassergehalte der einzelnen Schichten des Daches - Gefach [6]

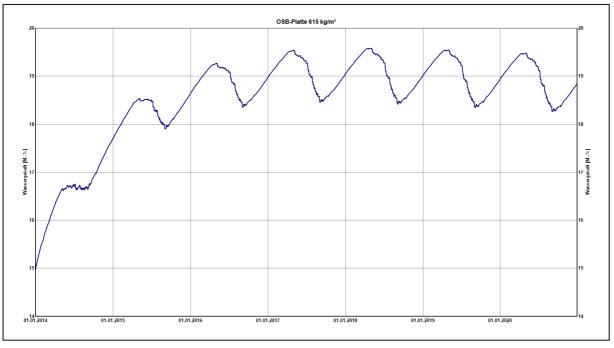


Abbildung 5-48: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach [6]

Es wurde von einer Einbaufeuchte der OSB-Platte von 15 Masse-% ausgegangen, wie sie die Software vorschlägt. Die reale Einbaufeuchte ist nicht bekannt. Bei näherer Betrachtung der beiden kritischen Schichten zeigt sich zunächst eine Auffeuchtung der oberen OSB-Lage im Dach auf bis zu ca. 19,5 Masse-% in der Tauperiode bis zum Frühjahr, welche in der Verdunstungsperiode auf ca. 18,5 Masse-% zurückfällt. Diese Feuchtegehalte sind als grenzwertig hoch einzuschätzen.

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 5-49 eine Langzeitberechnung über 20 Jahre. Demnach stellt sich keine dauerhafte Auffeuchtung der oberen OSB-Lage ein, sondern der Wassergehalt sinkt um ca. 0,05 Masse-% pro Jahr.

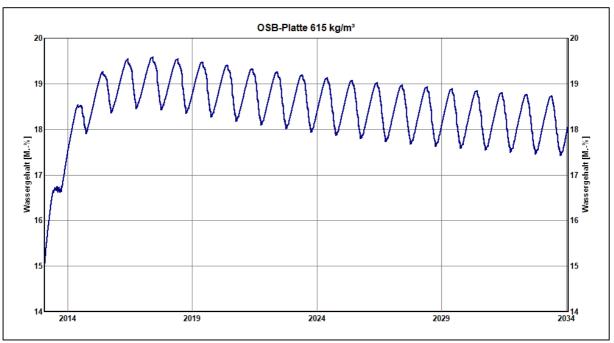


Abbildung 5-49: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach bis 2034 [6]

Die den Berechnungen zugrunde gelegte Feuchtebelastung sollte nicht überschritten werden, da sonst mit aller Wahrscheinlichkeit der Grenzwert von 20 Masse-% überschritten würde. Es ist davon auszugehen, dass die anfallende Feuchtigkeit an der Plattenuntergrenze der oberen OSB-Lage kondensiert und dann anteilig von der OSB-Platte und maßgeblich von der Zellulose aufgesaugt und im Material verteilt wird. Diese Annahme spiegelt sich auch in der Filmdarstellung wider, hier stellt sich das obere Drittel der Zelluloseschicht feuchter dar.

Die Materialdatenbank in WUFI geht von einer Einbaufeuchte der Zellulose von 17 Masse-% aus, was relativ hoch erscheint. Die realen Werte sind jedoch nicht bekannt, weshalb mit dieser Annahme gerechnet wurde. Die Gesamtbetrachtung der 28 cm starken Zellulosedämmung ergibt nach einer anfänglichen Auffeuchtung auf ca. 19,3 Masse-% einen kontinuierlichen Abfall des Wassergehaltes.

Durch den erfolgten Einbau der feuchteadaptiven Dampfbremse pro clima Intello ist grundsätzlich in der Verdunstungsperiode eine Austrocknung nach innen möglich. Der gewählte Aufbau enthält jedoch keinen Spielraum für unvorhergesehene Feuchteeinträge.

Die hervorragenden Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen bestätigen die hohe Qualität der luftdichten Ausführung (siehe Kapitel 6). Lokale Fehlstellen, die durch Konvektion zu Feuchteschäden führen können, sind demzufolge nach jetzigem Stand unwahrscheinlich, können dennoch nicht zu 100 % ausgeschlossen werden.

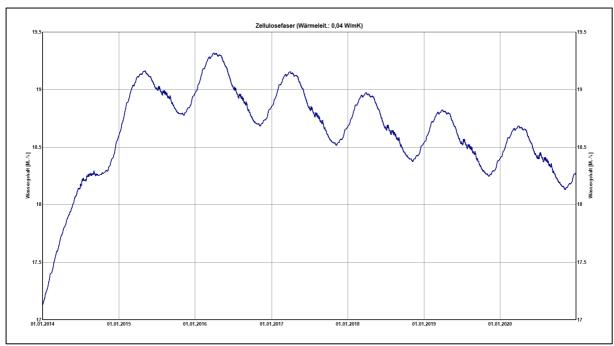


Abbildung 5-50: Wassergehalt der oberen Zellulosedämmung im Dach [6]

#### 5.4.2.1 Untersuchungen ohne Dampfbremse

Abschließend soll kurz betrachtet werden, wie der Feuchtegehalt sich ohne Ausführung der Dampfbremse gemäß der instationären Berechnungen dargestellt hätte. Der Verlauf ist ähnlich der ausgeführten Variante, jedoch sogar mit einer Tendenz zu einem geringeren Feuchtegehalt.

Die Untersuchung des Gesamtwassergehaltes des Dachaufbaus bis zum 31.12.2020 ergibt eine deutlich schnellere Austrocknung als in der Ausführungsvariante (Vergleich Abbildung 5-45) mit einem Abfall von 10,75 kg/m² auf ca. 9,9 kg/m² bereits nach einem Jahr. Danach befindet sich die Konstruktion im eingeschwungenen Zustand zwischen ca. 9,8 und 10,0 kg/m².

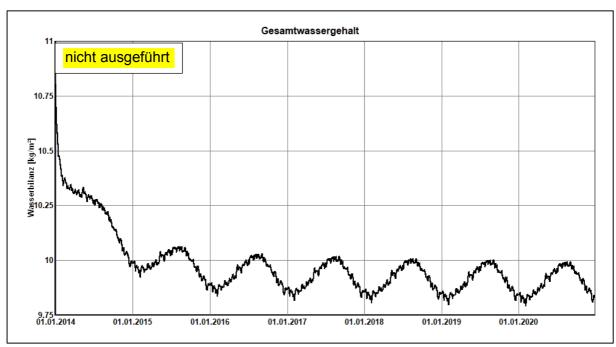


Abbildung 5-51: Gesamtwassergehalt des Daches – Gefachanteil ohne Dampfbremse [6]

Die Werte der tabellarischen Darstellung in Abbildung 5-52 der einzelnen Schichten stellt sich ähnlich dar wie in der Ausführungsvariante (Vergleich Abbildung 5-47), der Endwert des Wassergehaltes der oberen OSB-Lage liegt nach 7 Jahren bei 114,77 kg/m² (gemäß Ausführung: 115,89 kg/m²).

Wassergehalt [kg/m³]				
Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
*PVC-Dachbahn	0,00	0,00	0,00	0,04
*OSB-Platte 615 kg/m³	92,00	114,77	92,00	118,58
*Zellulosefaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK)	12,00	12,65	11,99	13,06
*OSB-Platte 615 kg/m <sup>s</sup>	92,00	78,37	75,89	92,00
*Zellulosefaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK)	12,00	7,46	6,90	12,04
*OSB-Platte 615 kg/m <sup>s</sup>	92,00	67,32	65,85	92,00
*Luftschicht	1,88	0,39	0,31	1,88
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	8,84	7,33	15,80
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	8,94	6,84	15,80

Abbildung 5-52: Wassergehalte der einzelnen Schichten des Daches ohne Dampfbremse - Gefach [6]

Auch für die kritische obere OSB-Lage stellt sich das Ergebnis ohne Dampfbremse leicht positiver dar. Im eingeschwungenen Zustand variiert der Feuchtegehalt zwischen 18 und 19,2 Masse-% (Abbildung 5-56), während sie in der Ausführungsvariante zwischen 18,5 und 19,5 Masse-% schwankt (Vergleich Abbildung 5-48). Hieraus lässt sich schließen, dass der Einbau der Dampfbremse nicht zwingend erforderlich war.

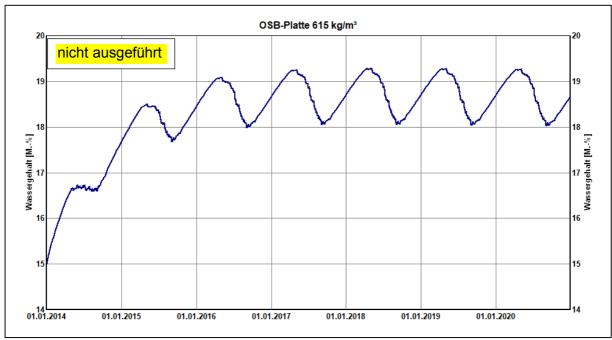


Abbildung 5-53: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach ohne Dampfbremse [6]

### 5.4.3 Dach - Rahmen/Lattung - instationär mit WUFI

Auch die Untersuchung des Gesamtwassergehaltes im Rahmenanteil bis zum 31.12.2020 ergibt, dass der Dachaufbau insgesamt an Feuchtigkeit verliert (Abbildung 5-54) – von ca. 23,5 kg/m² auf eingeschwungene ca. 22,6 bis 22,7 kg/m².

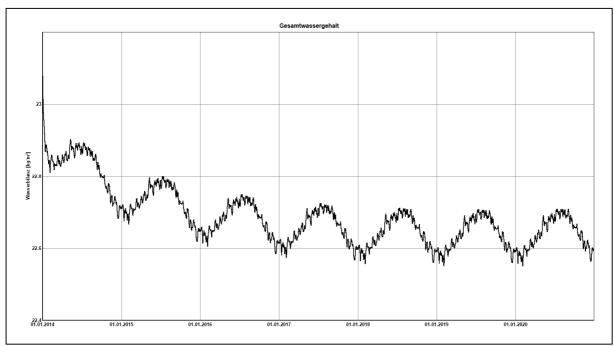


Abbildung 5-54: Gesamtwassergehalt des Daches - Rahmenanteil [6]

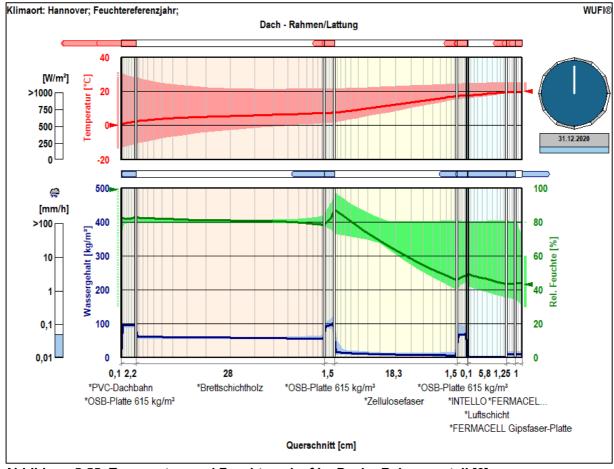


Abbildung 5-55: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach - Rahmenanteil [6]

Die Filmdarstellung (Abbildung 5-55) verdeutlicht, dass die Schwankungen der relativen Feuchte insgesamt geringer ausfallen und der näher zu betrachtende Abschnitt ebenfalls im Bereich der oberen OSB-Platte liegt.

Bei der Kontrolle der einzelnen Schichten in der tabellarischen Aufstellung der Wassergehalte (Abbildung 5-56) fällt auf, dass in der oberen OSB-Platte, der darunterliegenden Zellulose-dämmung sowie in der mittleren OSB-Platte ein leichter Anstieg des Wassergehaltes über den Zeitraum bis zum Jahr 2020 zu verzeichnen ist.

Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
*PVC-Dachbahn	0,00	0,00	0,00	0,04
*OSB-Platte 615 kg/m³	92,00	95,70	91,85	95,78
*Brettschichtholz	56,10	57,95	56,10	58,07
*OSB-Platte 615 kg/m³	92,00	94,97	88,15	107,71
*Zellulosefaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK)	12,00	8,74	8,56	12,31
*OSB-Platte 615 kg/m³	92,00	67,62	65,89	92,00
*INTELLO	6,70	4,07	3,68	6,70
*Luftschicht	1,88	0,42	0,31	1,88
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	8,93	7,30	15,80
*FERMACELL Gipsfaser-Platte	15,80	9,01	6,88	15,80

Abbildung 5-56: Wassergehalte der einzelnen Schichten des Daches - Rahmen [6]

In Abbildung 5-57 zeigt sich eine langsame Auffeuchtung der oberen OSB-Lage im Dach um ca. 0,1 Masse-% pro Jahr von 15 auf - unkritische - fast 15,6 Masse-% bis Ende 2020.

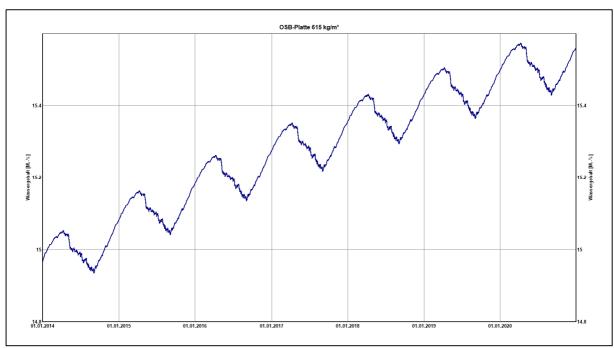


Abbildung 5-57: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach - Rahmenanteil [6]

Zum Vergleich stellt sich eine Betrachtung über einen Zeitraum von 20 Jahren wie in Abbildung 5-64 dar. Die Auffeuchtung setzt sich kontinuierlich fort und erreicht nach 20 Jahren bis zu 16,2 Masse-%, was weiterhin im unkritischen Bereich liegt.

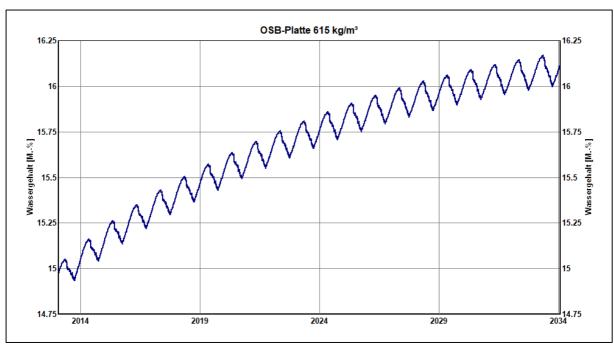


Abbildung 5-58: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach – Rahmenanteil bis 2034 [6]

Abbildung 5-59 zeigt einen kontinuierlichen Anstieg des Wassergehaltes im Rahmenanteil im Bereich des Trägers in den ersten beiden Jahren um max. 0,2 Masse-% pro Jahr, danach erfolgt der Anstieg deutlich langsamer.

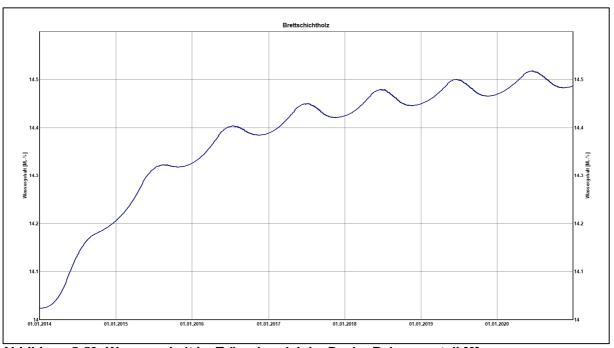


Abbildung 5-59: Wassergehalt im Trägerbereich im Dach - Rahmenanteil [6]

Fazit: Im Rahmenbereich erfolgt ein leichter Anstieg des Feuchtegehaltes in der oberen OSB-Lage und im Brettschichtholz. Der kritische Grenzwert von 20 Masse-% wird nicht erreicht. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass sich auch Feuchtigkeit horizontal im Bauteil verteilt, also von der angrenzenden Zellulose im Gefach aufgenommen wird.

#### 5.4.3.1 Untersuchungen ohne Dampfbremse

Abschließend soll auch hier kurz betrachtet werden, wie der Feuchtegehalt sich ohne Ausführung der Dampfbremse gemäß der instationären Berechnungen dargestellt hätte. Auch im Rahmenanteil verläuft die Austrocknung zunächst schneller als in der ausgeführten Variante – von 23,5 auf fast 22,4 kg/m², gefolgt von einem insgesamt geringeren Feuchtegehalt, der zwischen ca. 22,4 und 22,6 kg/m² schwingt (Vergleich Abbildung 5-54: 22,6 bis 22,7 kg/m²).

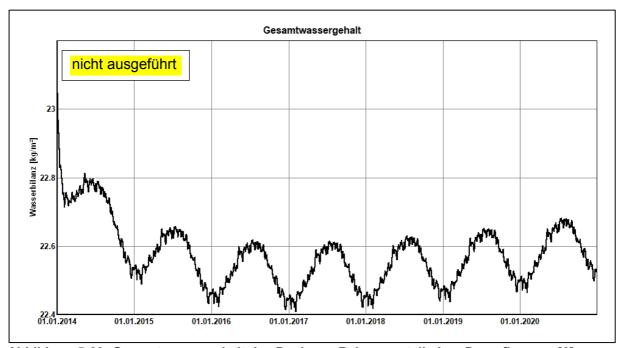


Abbildung 5-60: Gesamtwassergehalt des Daches - Rahmenanteil ohne Dampfbremse [6]

Der Wassergehalt der oberen OSB-Platte in Abbildung 5-60 verläuft nahezu identisch wie in der Ausführungsvariante (Vergleich Abbildung 5-57).

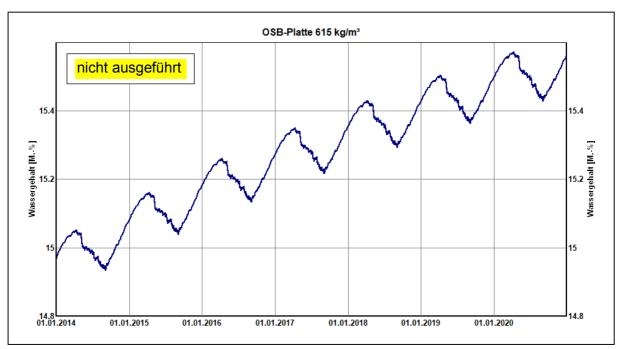


Abbildung 5-61: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach - Rahmenanteil ohne Dampfbremse [6]

#### 5.4.4 Auswertung Dach

Die stationären Berechnungen (Glaser) zum Dach ergaben einen Tauwasserausfall im Bereich der oberen OSB-Schalung sowohl für das Gefach als auch für den Rahmenbereich. Auch die instationären Berechnungen ergaben teilweise relative Feuchten und daraus resultierend Holzfeuchten im kritischen Bereich. Im Vergleich dazu sollen nun die Messwerte herangezogen werden.

Der Temperatur- und Feuchteverlauf für das Jahr 2016 ist der Abbildung 5-62 zu entnehmen. Die Außenluftfeuchte (lila) schwankt zwischen 46 und 95 % und beträgt im Jahresmittel 75,9 % im Jahr 2016. Die Raumluftfeuchte im Raum 201 (grün) beträgt zwischen 23 und 63 %, das Jahresmittel liegt bei 43 %.

Im Bereich der oberen OSB-Lage, welche durch die Berechnungen als feuchteanfällig identifiziert wurde, ist der Sensor "5552-1 Dach 1 außen" interessant (dunkelrot). Seine gelieferten Messwerte bewegen sich im Jahr 2016 zwischen 61 und 78,7 %. Sie betragen im Mittel 70,3 % im Jahr 2016. In der Langzeitbetrachtung von 2015 bis 2018 in Abbildung 5-63 zeigen sich ebenfalls typische jahreszeitliche Schwankungen mit Anstiegen in der Tauperiode und einem Austrocknungsverhalten in der Verdunstungsperiode (bspw. auf ca. 62 % im August 2016). Die Schwankungen sind nicht stark ausgeprägt, die Werte erreichen allerdings in der Tauperiode fast 80 %. Im August 2015 und ab Mai 2017 kam es zum Ausfall der Messtechnik.

Der Fühler "555C-1 Dach 1 Mitte" (dunkelblau) liegt ca. mittig in der Zelluloseebene und ist leider der einzige Fühler, der überwiegend stabil Messdaten liefert. Sein Jahresmittelwert 2016 betrug 59,8 % relative Feuchte. Die Werte schwankten im Jahresverlauf zwischen 44,6 und 81,8 %, wobei der Maximalwert am 24.06.2016 auftrat. Hier zeigt die Langzeitdarstellung in Abbildung 5-63 einen gegenläufigen jahreszeitlichen Verlauf mit Feuchteanstiegen in der Verdunstungsperiode, was auf die Wirksamkeit der Umkehrdiffusion hindeutet.

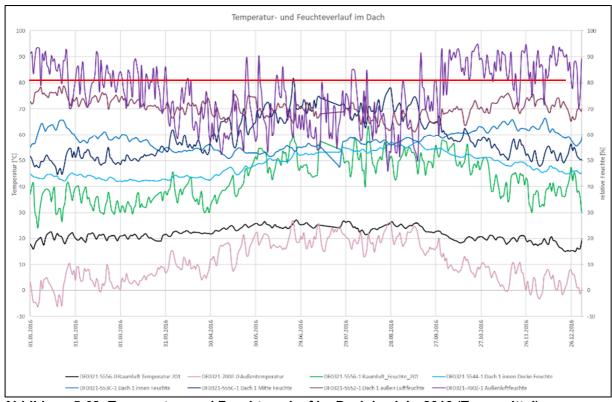


Abbildung 5-62: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach im Jahr 2016 (Tagesmittel)

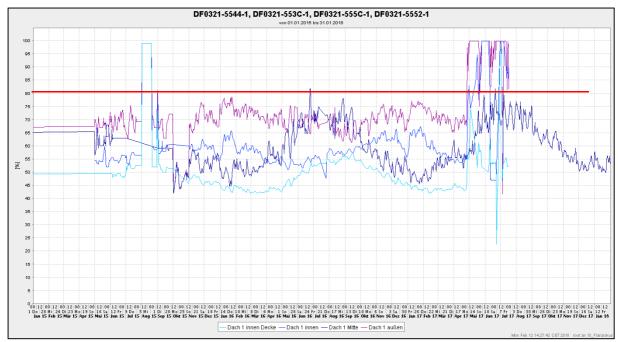


Abbildung 5-63: Feuchteverlauf im Dach 1 vom 01.01.2015 bis 31.01.2018 (Tagesmittel)

Die Verläufe der Fühler "Dach 1 innen" und "Dach 1 innen Decke" sind nicht vordergründig maßgeblich für die Beurteilung des Feuchteschutzes, vervollständigen jedoch die Messreihe hinsichtlich der Vorgänge im Bauteilquerschnitt.

Während der Fühler "Dach 1 innen Decke" (hellblau) sich in seinem Verlauf stark an die Raumluftfeuchte des Raumes 201 anlehnt, bewegt sich der Fühler "Dach 1 innen" hinsichtlich der relativen Feuchte meist im Mittelfeld zwischen den Fühlern "Dach 1 innen Decke" und "Dach 1 Mitte".

Obwohl aus den in Kapitel 3.5 genannten Gründen die Messwerte aus der redundanten Bestückung (Dach 2) nicht weitergenutzt werden sollten, erfolgt hier aufgrund der lückenhaften Datenlage in Dach 1 ein Blick auf Dach 2, um relative Feuchten im Bereich über 80 % möglichst ausschließen zu können.

Wie bereits in Kapitel 3.5 ausgeführt, konnte während der Plausibilitätsprüfung nicht abschließend sichergestellt werden, dass der entscheidende, mit "Dach 2 außen" benannte Fühler sich tatsächlich unmittelbar an der oberen OSB-Lage befindet oder evtl. doch tiefer liegt. Davon ausgehend, dass die Lagebezeichnung durch GEDES korrekt vorgenommen wurde, kann der Fühler aus Sicht des Feuchtegehaltes als unkritisch eingestuft werden.

Ausschlaggebend für den Feuchteschutz ist, dass es im Bereich der verwertbaren Messungen keine wesentlichen Ausschläge über 80 % gibt. Insgesamt zeigt sich, dass die Messwerte, die nicht offensichtlich von Störungen beeinträchtigt sind, unter 80 % relativer Feuchte bleiben.

Leider lassen sich auch bei den redundanten Fühlern in Dach 2 massive Störungen der Messtechnik verzeichnen, die zeitlich mit den Störungen in Dach 1 zusammenfallen.

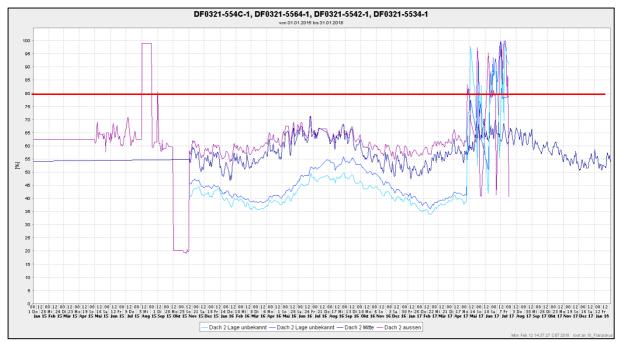


Abbildung 5-64: Feuchteverlauf im Dach 2 vom 01.01.2015 bis 31.01.2018 (Tagesmittel)

Während die Simulationsergebnisse aus WUFI grenzwertig hohe Feuchtewerte nahe an der 20 Masse-%-Marke ergaben, sind die gemessenen relativen Feuchten und die daraus resultierenden Holzfeuchten von 9 bis 13,2 % (Tabelle 5-3) unbedenklich. Sofern die Messtechnik nicht dauerhaft ausgefallen ist, sollte das Bauteil in den Folgejahren weiter messtechnisch begleitet werden.

Tabelle 5-3: Jahresmittelwerte und resultierende Holzfeuchte des Daches [27] [16]

Ebene	Temperatur Jahresmittelwert [°C]	rel. Luftfeuchte Jahresmittelwert [%]	resultierende Holzfeuchte [%]
Raumluft	21,96	43,09	-
Dach 1 innen Decke	19,45	48,4	9,0
Dach 1 innen	16,61	57,83	10,9
Dach 1 Mitte	16,97	59,77	10,9
Dach 1 außen	12,89	70,34	13,2
Außenluft	10,92	75,89	-

## 5.4.5 Probleme und Verbesserungsansätze

Der mit dem Glaser-Verfahren errechnete Tauwasserbereich im Dach hat sich durch die Simulationen mit WUFI bestätigt. Der simulierte Wassergehalt im Bereich der oberen OSB-Lage des Daches ist mit zeitweise 19,5 Masse-% als grenzwertig hoch einzustufen. Insgesamt bleiben die Werte unter den kritischen 20 Masse-%. Es kann jedoch seitens des Monitorings keine Aussage über die reale Einbaufeuchte der kritischen OSB-Lage des Daches getroffen werden.

Lag diese zum Zeitpunkt der Bauausführung schon im erhöhten Bereich über 15 Masse-% oder war sie feuchter Witterung ausgesetzt, so kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Feuchtigkeit nicht ausreichend austrocknen kann und dies zu Holzschädigungen führt.

Die gemessenen Feuchtewerte bestätigen die Befürchtungen zunächst nicht. Positiv ist in jedem Fall, dass die hervorragenden Ergebnisse der Luftdichtheitsprüfung einen Feuchteeintrag durch Konvektion sehr unwahrscheinlich machen. Die berechneten Feuchtegehalte des Flachdaches zeigen jedoch, wie wenig Spielraum bei Flachdachaufbauten dieser Art bleibt. Möglicherweise ist der bei der Gebäudedichtheitsmessung betrachtete Anschlusspunkt an der Brandschutzwand im 2. OG mittelfristig genauer zu beobachten, siehe Kapitel 6.4, Abbildung 6-17.

#### 5.5 Verallgemeinerung und Fazit

Es hat sich bestätigt, dass die instationären Berechnungen eine sehr sinnvolle Ergänzung zu den stationären Berechnungen nach Glaser sind (Außenwand) bzw. das einzig sinnvolle Berechnungsverfahren darstellen (Bodenplatte und Dach). Die Simulationen in WUFI haben die Ergebnisse aus dem Glaser-Verfahren bestätigt und konkretisiert.

Das Monitoring des Feuchteverlaufs in der **Außenwand** bestätigt einen sicheren Bauteilaufbau, welcher hinsichtlich der feuchteschutztechnischen Eigenschaften wieder so errichtet werden kann.

Sowohl die stationären als auch die instationären Berechnungen für die **Holzbodenplatte** mit geländegleichem Einbau haben unkritische Verläufe hinsichtlich Diffusion ergeben. Im Hinblick auf die hohe Luftdichtheit des Gebäudes kann auch Tauwasser durch Konvektion nach jetzigem Stand ausgeschlossen werden. Ob die hohen relativen Feuchten innerhalb der Bodenplatte darauf zurückzuführen sind, dass auf eine Abdichtung nach DIN 18195-4 verzichtet und lediglich eine Unterspannbahn gegen aufsteigende Feuchte eingebracht wurde, kann nicht abschließend geklärt werden. Ein weiteres kritisches Detail ist der geländegleiche Einbau mit einer Oberkante des Rohfußbodens, welche der Geländeoberkante entspricht, bei dem die Stirnseiten des Holzbauteils gegen seitlich eindringendes Niederschlagswasser abgedichtet sein müssen (Abbildung 2-34). Es wird empfohlen, die bauphysikalischen Gegebenheiten innerhalb der Bodenplatte auch in den Folgejahren nach Ablauf des Monitoringprojektes zu beobachten.

Der **Dachaufbau** sollte nach Projektablauf unbedingt messtechnisch weiterverfolgt werden. Die Messwerte in der oberen OSB-Lage sind unkritisch, entscheidend ist jedoch die bauschadensfreie Entwicklung über die kommenden Jahre. Ggf. sollte an geeigneter Stelle durch eine Bauteilöffnung die Bauteilfeuchte an den kritischen Ebenen (obere OSB-Lage) nachgemessen werden. Es empfiehlt sich beispielsweise eine Decke in der Hausmeisterwohnung (Abstellraum), da in dem Bereich die Luftfeuchte besonders hoch ist.

Im Hinblick auf die Empfehlungen für unbelüftete Flachdächer in Holzbauweise [7] erfüllt das Dach die Anforderung, dass der  $s_d$ -Wert raumseitig der Dämmung dank der feuchteadaptiven Dampfbremse (deutlich) kleiner als 100 m ausfällt und die sommerliche Umkehrdiffusion zur Austrocknung nach innen möglich ist. Darüber hinaus hat es keine bekannten, unkontrollierbaren Hohlräume und eine geprüfte Luftdichtheit. Deckschichten wie die vorhandene Bekiesung oder andere Verschattungen (Solarmodule) werden jedoch nicht empfohlen, die Strahlungsabsorption der Dachhaut sollte a  $\geq$  80 % betragen, was hier nicht gegeben ist. Dass die Dachhaut tatsächlich keine Sonneneinstrahlung absorbiert, zeigt sich daran, dass die Temperaturen in der oberen OSB-Lage ganzjährig in etwa den Außentemperaturen entsprechen oder max. 4 K darüber liegen. Die Bekiesung verhindert messbar eine Erwärmung der Dachhaut durch Sonneneinstrahlung.

Ob die Holzfeuchten von Tragwerk und Schalung dokumentiert wurden, ist nicht bekannt. Dies sei bei Folgeprojekten dringend empfohlen.

# 6 Gebäudedichtheit

Dieser Abschnitt beschreibt zunächst das Luftdichtheitskonzept der Planer anhand ausgewählter Details. Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse der beiden Luftdichtheitsmessungen zur Baufertigstellung bzw. drei Jahre danach vorgestellt.

## 6.1 Ausgewählte Details

Die Luftdichtheitsebene wird im Wand-, Boden und Deckenbereich durch OSB-Platten raumseitig der Dämmung gebildet. Um die luftdichte Ebene nicht durch haustechnische Durchdringungen (Rohre, Kabel, Steckdosen etc.) zu beschädigen, wurde eine raumseitige Installationsebene vorgesehen, welche ebenfalls mit Zellulose gedämmt und mit Gipsfaserplatten bekleidet wurde. Die Fugen an den Plattenstößen, Decken- und Dachanschlüssen sowie an Fenster- und Türanschlüssen wurden mit einem 6 cm breiten Dichtband luftdicht verklebt. Die Anbindung der OSB-Platten an die Träger der Außenwand erfolgte durch eine vernagelte Pressfuge, in die eine Butylkautschukdichtung eingelegt ist.

#### 6.1.1 Bodenplatte

Die luftdichte Ebene wird durch die OSB-Platten raumseitig der Dämmung gebildet. Die Plattenstöße werden durch SIGA-Dichtungsbänder luftdicht miteinander verbunden.

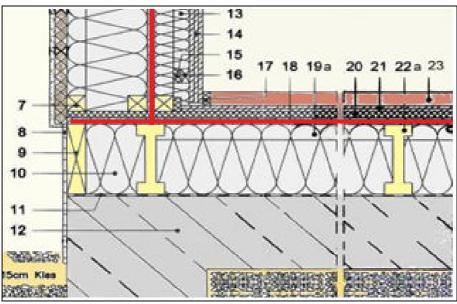


Abbildung 6-1: Detail luftdichte Ebene Bodenplatte und Außenwandanschluss [16]

#### 6.1.2 Außenwände

Die Dichtheit der Fenster in der Außenwand wird durch luftdichte Abklebungen auf der Innenseite und diffusionsoffene Dichtbänder auf der Außenseite gewährleistet.

Die OSB-Platten raumseitig der Dämmung bilden wie auch bei der Bodenplatte die luftdichte Ebene aus. Sowohl die Außen- und Innenecken, als auch die Plattenstöße werden jeweils mit einer luftdichten Abklebung versehen. An den Doppel-T-Trägern sind Butyl-Kautschuk-Klebebänder angeordnet, um dort die Luftdichtheit zu gewährleisten. (Abbildung 6-2)

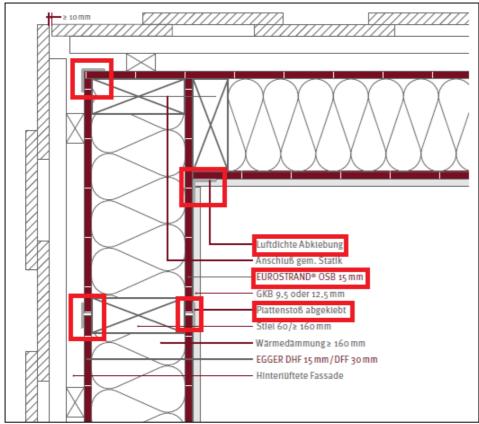


Abbildung 6-2: Anschluss Außenecke / Innenecke [16]

Der luftdichte Anschluss der Bodenplatte an die Außenwand wird durch eine überlappende Abdichtung in Form einer Schweißbahn gewährleistet, siehe Abbildung 6-3.

Um die sichtbaren Balken luftdicht einbinden zu können, wurde die Luftdichtung umlaufend und überlappend angeordnet. Die Egger-OSB-Platten sind auch in diesem Bereich innen angeordnet und bilden die luftdichte Ebene aus.

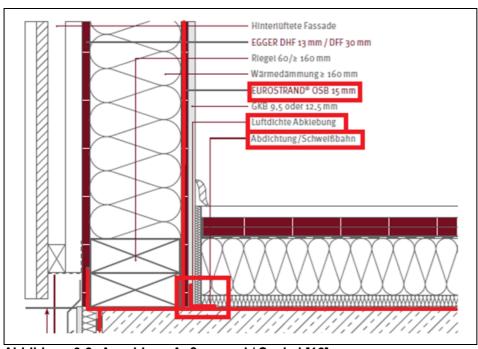


Abbildung 6-3: Anschluss Außenwand / Sockel [16]

#### 6.2 Messorte und Messtechnik

### 6.2.1 Messung vom 28.01.2014

Im Rahmen der Qualitätssicherung während der Bauphase wurden am Messobjekt bereits drei Luftdichtigkeitsmessungen vom Ingenieurbüro Kriegenburg aus Magdeburg durchgeführt:

•	Messung 1 (Gebäudeteil B)	20.11.2012
•	Messung 2 (Gebäudeteil A)	09.04.2013
•	Messung 3 (Gebäudeteil A+B)	28.01.2014

Das Innenvolumen des Gebäudes beträgt 9.920 m³.

Die Messung 3 am 28.01.2014 entspricht dabei der Messung im Nutzungszustand nach Baufertigstellung. Zum Messzeitpunkt waren alle Gebäudeteile bezugsfertig. Es fehlten nur wenige technische Einstellungen der Lüftungs- und Sanitärtechnik [28].

Die BlowerDoor wurde zur Gebäudedichtheitsmessung im Erdgeschoss des Gebäudeteils A in der Halle 0.19, in einem Fenster eingebaut. Beim Messsystem handelte es sich um ein Gerät vom Typ Minneapolis BlowerDoor Modell 4, APT.

Zur Leckageortung wurde ein Unterdruck von 60 Pa eingestellt, es kamen Thermoanemometer und Thermografiekamera zum Einsatz. Folgende Abdichtungen wurden zum Messzeitpunkt vorgenommen:

- Abdichtung der noch nicht angeschlossenen Lüftungsrohre (bauseits)
- Bälle/Verklebungen im HAR 004, Abdichtung offener Leerrohre (zustandsbedingt)

#### 6.2.2 Messung vom 06.01.2017

In einer Messung am 06.01.2017 wurde im Rahmen der Masterarbeit von Philipp Weingart die Luftdichtheit erneut überprüft, um Rückschlüsse auf die Entwicklung der Luftdichtheit nach drei Jahren Standzeit ziehen zu können [16]. Die detaillierten Messergebnisse sind in Anhang E abgelegt.

Es wurden folgende Messgeräte verwendet:

- Messgebläse BlowerDoor Modell 4, Seriennummer CE 196, kalibriert am 27.01.2016
- Druckmessgerät DG-700, Seriennummer 62703-107-700 E.G, kalibriert am: 27.01.2016
- 2 Thermografiekameras, Firma FLIR
- Laptop Lenovo Yoga 300

Die Gebäudepräparation erfolgte nach DIN EN 13289, Verfahren A [29]. Folgende Präparationen wurden zur Messung durchgeführt:

Tabelle 6-1: Maßnahmen zur Gebäudepräparation [16]

Bauteil/Öffnung/Einbau	Zustand
Außentüren	Türen zu / abgeschlossen
Innentüren	Türen auf / gesichert
Schranktüren/Schlüssellöcher	keine Maßnahmen
Dunstabzugshauben Küche	außer Betrieb, keine Maßnahme
Lüftungsanlagen	außer Betrieb, keine Maßnahme
Fortluftöffnungen Dach	abgedichtet
Zu- und Abluft Ventilatoren der Lüftungsanlagen	außer Betrieb, keine Maßnahme
Bodeneinläufe Küche	abgedichtet
Zuluft Erdwärmeübertrager	abgedichtet
Sonstiges	keine Maßnahme

Die Fortluftöffnung des Gebäudeteils B wurde durch handelsübliche "Müllsäcke" aus Plastik luftdicht verschlossen, welche an den Überlappungen mit Abklebeband fixiert und verschlossen wurden. Die Außenluftöffnung umfasst dabei die Fortluft für alle Klassenzimmer, Lehrerzimmer, Flure, den Hort und die Sanitärräume des Gebäudeteils B. Angeschlossen an die Fortluftöffnung des Gebäudeteils B sind die Lüftungsgeräte Menerga Resolair 640701 und Helios SVS 160 K.

Die Fortluftöffnung des Gebäudeteils A (Abbildung 6-4, links) wurde durch einen Matratzenüberzug luftdicht verschlossen und präpariert. Fixiert wurde dieser wie auch bei der Fortluftöffnung des Gebäudeteils B durch Abklebeband. Die weiteren Fortluftrohre wurden durch handelsübliche Ballblasen luftdicht verschlossen. Die zweite Fortluftöffnung des Gebäudeteils A wurde wie auch die Fortluftöffnung des Gebäudeteils B mit Müllsäcken aus Plastik luftdicht verschlossen.



Abbildung 6-4: Links: Präparation der Fortluftöffnungen des Gebäudeteils A [16]

Aufgrund des großen Durchmessers konnte das Zuluftrohr des Gebäudeteils A nicht mithilfe einer Ballblase luftdicht verschlossen werden. Zur Präparation wurde daher eine 24 m² große Bauplane verwendet. Im Randbereich wurde diese mithilfe von Klebeband fixiert. Da trotz ausgeschalteter Lüftungsanlage ein relativ großer Windsog herrschte, musste das Provisorium zusätzlich mit vorhandenen Hilfsmitteln beschwert werden.



Abbildung 6-5: Präparation Erdwärmeübertrager – Links: Zuluft, Rechts: Kondensatablauf [16]

Das Zuluftrohr des Gebäudeteils B wurde mit einer handelsüblichen Abdeckplane (16 m²) luftdicht verschlossen. Zusätzlich musste der vorhandene Kondensatablauf mithilfe einer Ballblase abgedichtet werden. Das Provisorium wurde wie auch bei der Zuluftöffnung des Gebäudeteils A aufgrund der dort herrschenden Auftriebskräfte durch Hilfsmittel beschwert.

Weitere Abdichtungen wurden in der Küche im Erdgeschoss durchgeführt. Dort wurden insgesamt vier Bodeneinläufe mithilfe von Ballblasen und Folien abgedichtet und luftdicht verschlossen.

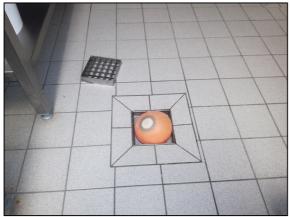




Abbildung 6-6: Präparation der Bodeneinläufe in der Küche

Das BlowerDoor-Messgerät wurde in ein nordorientiertes Kastenfenster im Raum 0.19 (Flur) eingesetzt (Abbildung 6-7).

Zum Messzeitpunkt wurde das Druckgerät auf konstante 50 Pascal eingestellt. Jeder Raum wurde im Einzelnen auf Undichtheiten mit zwei Thermografiekameras untersucht. Präparationen wurden dabei überprüft und ggf. nachgebessert. Die Hausmeisterwohnung konnte bei der Leckageortung leider nicht mit einbezogen werden.

Im Anschluss an die Leckageortung wurde eine Unter- und Überdruckmessung nach DIN EN 13289 durchgeführt. Da es sich bei dem Messobjekt um ein Passivhaus handelt und sich dort der Gleichgewichtszustand aufgrund der dichten Bauweise sehr langsam einstellt, musste die Messreihe laut [30] verlangsamt aufgenommen werden.



Abbildung 6-7: Aufbau BlowerDoor [16]

- 1: Gebläse mit Ventilator und Reduzierblenden (A-D)
- 2: Plane mit Steckrahmen
- 3: Verbindungsschläuche (rot, grün, blau, durchsichtig)
- 4: Druckmessgerät (DG-700)

#### 6.3 Messergebnis

#### 6.3.1 Messung vom 28.01.2014

Die Gebäudehülle wies insgesamt wenige Leckagen auf, dies betraf hauptsächlich noch nicht richtig eingestellte Eingangstüren. Das Ergebnis der Messung betrug  $n_{50} = 0,24$  1/h. Somit wurde der Grenzwert für Passivhäuser von 0,6 1/h deutlich unterschritten. Die Messung des  $q_{50}$ -Wertes, welcher für große Gebäude relevant ist, ergab  $q_{50} = 0,51$  m³/(m²h).

#### 6.3.2 Messung vom 06.01.2017

Die Abhängigkeit des Volumenstroms von einem künstlich erzeugten Gebäudedruck wird durch eine Leckagekurve dargestellt. Die Software *Tectite Express 4.1* [31] zeichnet alle während der Messung angefahrenen Druckstufen mit den jeweils dazu herrschenden Volumenströmen auf und erstellt daraus ein Diagramm. Dabei sollten alle gemessenen Punkte in etwa auf einer Linie liegen. Sind einzelne Messpunkte weit außerhalb dieser Linie, sind kleine Störungen zum Messzeitpunkt zu vermuten.

Die Leckagekurve zur Luftdichtigkeitsmessung am 06.01.2017 weist nur geringfügige Streuungen der Messpunkte auf. Weder Unter- noch Überdruckmessung sind dabei kritisch zu betrachten. Zwischen dem Volumenstrom und dem Gebäudedruck herrscht ein linearer Zusammenhang. Je größer der aufgebaute Gebäudedruck ist, desto höher ist auch der dazugehörige Volumenstrom. Sinkt der Gebäudedruck, so sinkt auch der Volumenstrom.

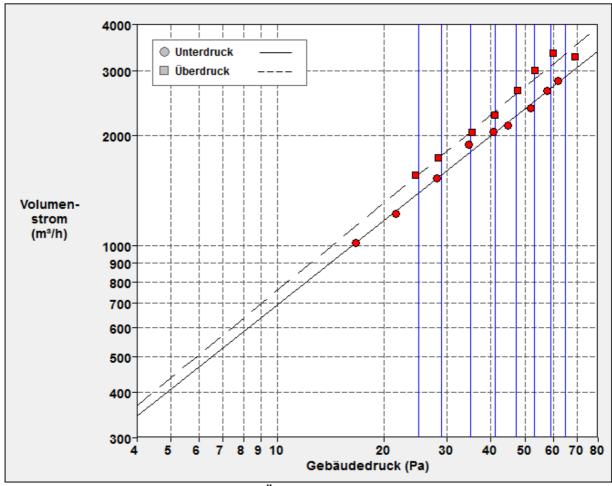


Abbildung 6-8: Leckagekurve Unter- und Überdruck 06.01.2017 [16]

Das Ergebnis der Messung betrug  $n_{50} = 0,26$  1/h. Die Messung des hüllflächenbezogenen Wertes ergab  $q_{50} = 0,55$  m³/(m²h).

Ergebnis, Keni	ngrößen		V =	9920 m <sup>s</sup>	A <sub>F</sub> =	1105 m²	A <sub>E</sub> =	4610 m²
	V <sub>50</sub>	Unsicher- heit	n <sub>50</sub>	Unsicher- heit	W <sub>50</sub>	Unsicher- heit	<b>q</b> <sub>50</sub>	Unsicher- heit
	m³/h	%	1/h	%	m³/(m²h)	%	m³/(m²h)	%
Unterdruck	2364	+/- 6 %	0,24	+/- 8 %	2,1	+/- 8 %	0,51	+/- 8 %
Überdruck	2722	+/- 6 %	0,27	+/- 8 %	2,5	+/- 8 %	0,59	+/- 8 %
Mittelwert	2543	+/- 5 %	0,26	+/- 6 %	2,3	+/- 6 %	0,55	+/- 6 %
Anforderung:	Zulässiger	Höchstwert:	0,3	1/h	3,9	m³/(m²h)	3,0	m³/(m²h)

Abbildung 6-9: Ergebnisse Differenzdruckmessreihe [31]

## 6.3.3 Vergleich der Messungen vom 28.01.2014 und 06.01.2017

Sowohl die Messung vom 28.01.2014, als auch die Messung vom 06.01.2017 wurde im Nutzungszustand nach Verfahren A durchgeführt. Es wurde jeweils das gesamte Gebäude (Gebäudeteil A & B) gleichzeitig gemessen. Bei der Messung am 28.01.2014 fehlten laut [28] zum Messzeitpunkt noch ausstehende Einstellungen der Lüftungs- und Sanitärtechnik. Des Weiteren waren Lüftungsrohre noch nicht fertig angeschlossen und einige Leerrohre waren noch offen. Um gleiche Voraussetzungen bei der Zweitmessung am 06.01.2017 zu schaffen, wurden die Werte für das Innenvolumen, die Hüllfläche und die Nettogrundfläche aus der Erstmessung übernommen.

In der nachfolgenden Tabelle werden die für das Endergebnis ausschlaggebenden Parameter der beiden Messungen gegenübergestellt (Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Vergleich wichtiger Parameter der BlowerDoor Erst- und Zweitmessung [28] [16]

Parameter	Einheit	Erstmessung 28.01.2014	Zweitmessung 06.01.2017
Windstärke nach Beaufort	-	1	1
Innentemperatur	-	19	20
Außentemperatur	-	-1	-5
Referenzdruckmessstellen	-	1	1
natürliche Druckdifferenz (Unterdruck)	Pa	-1,7	-4,9
natürliche Druckdifferenz (Überdruck)	Pa	-2,1	-2,1
Messpunkte Unterdruck	-	8	9
Messpunkte Überdruck	-	1	8
Volumenstrom bei 50 Pa Unterdruck	m³/h	1.909	2.364
Volumenstrom bei 50 Pa Überdruck	m³/h	2.776	2.722
n <sub>50</sub> Unterdruck	1/h	0,19	0,26
n₅₀ Überdruck	1/h	0,28	0,27
n <sub>50</sub> Gesamt	1/h	0,24	0,26
<b>q</b> <sub>50</sub>	$m^3/(m^2h)$	2,1	2,3

Zum Zeitpunkt der Zweitmessung am 06.01.2017 gestaltete sich das Abdichten der jeweiligen Anlagenteile schwieriger. Aufgrund der hohen Komplexität der Lüftungsanlagen erwies sich das Abdichten der Fortluftöffnungen auf dem Dach als am sinnvollsten. Die Zuluft wurde wie bereits im Kapitel 6.2 beschrieben in den zwei Schächten des Erdwärmeübertragers in den Räumen 0.04 und 0.30 im Erdgeschoss abgedichtet. Zusätzlich wurden mehrere Bodeneinläufe in der Küche luftdicht verschlossen. Bei beiden Messungen waren alle Innentüren geöffnet und alle Außentüren und Außenfenster verschlossen. Lediglich die Hausmeisterwohnung blieb während der Zweitmessung verschlossen, da diese zum Messzeitpunkt bewohnt war.

Bei der anschließenden Leckageortung wurde das Messgerät auf 50 Pascal eingestellt. Am 28.01.2014 wurde diese allerdings laut [28] auf 60 Pascal Unterdruck durchgeführt. Die Gründe dafür sind leider nicht bekannt. Nach [32] reichen 50 Pascal aus, um eventuelle Leckagen zu lokalisieren.

## 6.4 Probleme und Verbesserungsansätze

Die Gebäudehülle der St. Franziskus-Grundschule weist für die vorhandene Hüllfläche von 4.610 m² während des konstanten Unterdruckes von 50 Pa wenige Leckagen auf. Bestandteil der Leckageortung war das gesamte Gebäude mit allen Geschossen und beiden Gebäudeteilen. Untersucht wurden alle Außenöffnungen, die Außenwand, sämtliche Steckdosen, Jalousieanschlüsse, Kabeldurchdringungen und die Fußboden-, sowie die Decken- und Dachanschlüsse.

Im Erdgeschoss der St. Franziskus-Grundschule konnten Leckagen an allen Außentüren festgestellt werden, welche teilweise durch Handmessung spürbar waren. Aufgrund der unter Einsatz der Thermografie auffallenden umlaufenden niedrigen Temperaturen in den Anschlussbereichen wäre ein nachträgliches Einstellen der Türdichtungen zu raten.



Abbildung 6-10: Eingangstür Treppenhaus, 06.01.2017 [16]

Die Außentür Nord (Hof) weist ebenso größere Leckagen und Undichtheiten im Anschlussbereich auf, siehe Abbildung 6-11. Die niedrigste gemessene Temperatur betrug dort am 06.01.2017 4,2 °C. Eine Verbesserung des Anschlussbereiches kann nur erfolgen, wenn auch dort die Türdichtungen nachträglich neu justiert werden.

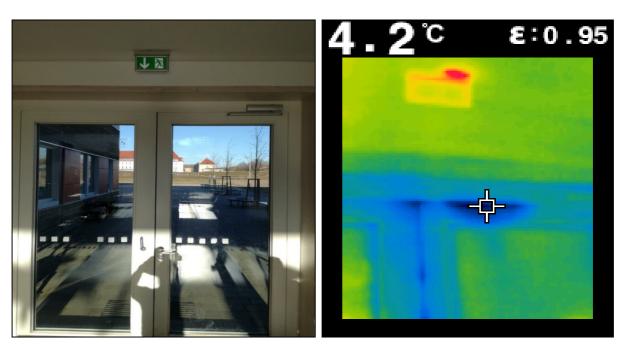


Abbildung 6-11: Eingangstür Hof am 06.01.2017 [16]

Die Eingangstür im Hauptflur weist die größten spürbaren Leckagen aller Außentüren auf. Die niedrigste am 06.01.2017 gemessene Temperatur beträgt dort 3,9 °C – siehe Abbildung 6-12. Bei der Eingangstür im Hauptflur ist wie auch bei allen anderen Außentüren das nachträgliche einstellen der Türdichtungen zu empfehlen, um den Luftwechsel durch deren Leckagen so gering wie möglich zu halten und Zugerscheinungen zu vermeiden.

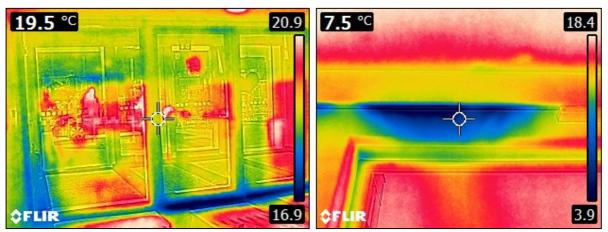


Abbildung 6-12: Haupteingangstür am 06.01.2017 [16]

Die Außentür der Küche zeigte deutliche Auffälligkeiten im Bereich der Anschlüsse und Türdichtungen, siehe Abbildung 6-13. Es ist zu empfehlen auch hier die Tür gegebenenfalls neu zu justieren und die Dichtungen zu überprüfen.

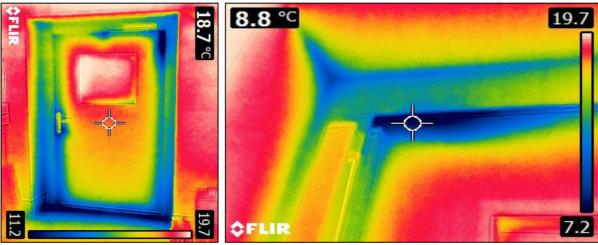


Abbildung 6-13: Eingangstür Mitarbeiter Küche [16]

Bereits bei der Erstmessung wurden an der Eingangstür zur Aula nicht korrekt eingestellte Türdichtungen vom Ingenieurbüro Kriegenburg bemängelt. Bei der Leckageortung und einem Unterdruck von 50 Pascal konnte bereits durch einfache Handmessung ein enormer Luftstrom festgestellt werden.

Die minimale Temperatur im Dichtungsbereich lag am 06.01.2017 bei 5,6 °C. Diese ist 3,4 °C geringer als bei der Messung am 28.01.2014. Begründet werden kann dies durch die geringere Außentemperatur bei der Zweitmessung, aber auch durch ein Setzungsverhalten der Außentur während der vergangenen drei Jahre.

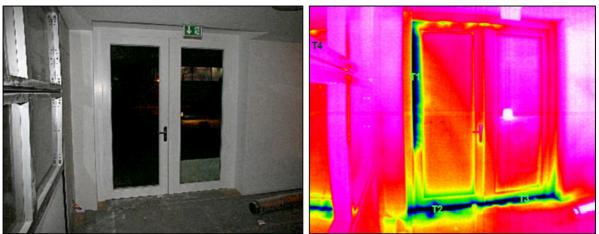


Abbildung 6-14: Eingangstür zur Aula am 28.01.2014 [28]

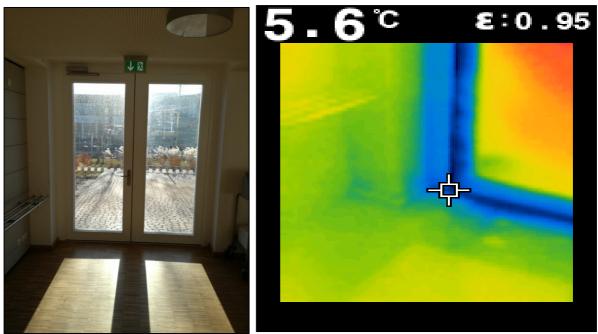


Abbildung 6-15: Eingangstür zur Aula am 06.01.2017 [16]

In den Räumen 1.01 und 2.01 wiesen während der Leckageortung am 28.01.2014 und am 06.01.2017 mehrere Jalousieanschlüsse auffällige Temperaturdifferenzen auf. Auch geringe Windgeschwindigkeiten konnten in diesem Bereich festgestellt werden. Diese Auffälligkeiten waren nur auf der Nordseite zu beobachten.

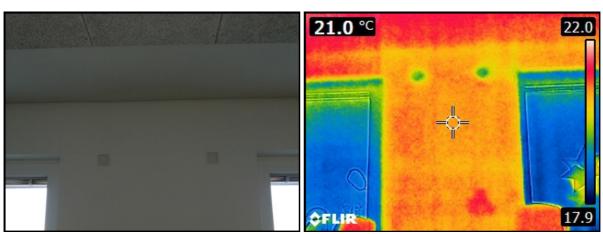


Abbildung 6-16: Jalousieanschlüsse, 06.01.2017 [16]

Sowohl am 28.01.2014 als auch am 06.01.2017 waren Temperaturunterschiede am oberen Anschluss des Übergangs vom Gebäudeteil A zum Gebäudeteil B im 2. Obergeschoss zu erkennen. Die Ursache dafür sind laut [28] Hinterströmungen durch eventuelle Leckagen am luftdichten Anschluss. Im Hinblick auf die Ergebnisse der Feuchteschutzberechnungen in Kapitel 5.4, die keine Toleranz gegenüber dem Eintrag von Wasserdampf in die Dachkonstruktion erlauben, kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass diese Leckage zu Problemen führen könnte.

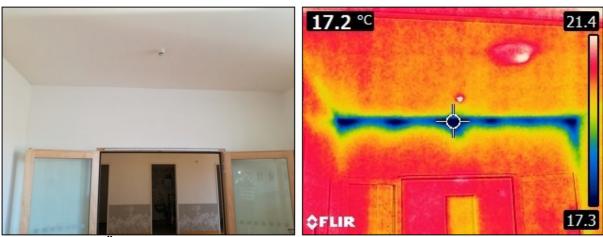


Abbildung 6-17: Übergang 2. OG Gebäudeteil A zu Gebäudeteil B, 06.01.2017 [16]

Im Raum 2.14 (Fachraum Kunst) waren bei der Messung am 06.01.2017 auffällig hohe Temperaturunterschiede von bis zu 5 K zwischen zwei nebeneinander liegenden Fenstern zu erkennen, siehe Abbildung 6-18.

Das linke Fensterglas wurde während der Bauphase aufgrund festgestellter Mängel bzw. eines Risses ausgetauscht. Das ersetzte Fensterglas weist einen erhöhten Wärmedurchgang auf. Begründet werden kann dies durch eine beispielsweise unterschiedliche Edelgasfüllung. Das getauschte Fenster stellt dabei aber keine direkte Leckage dar.

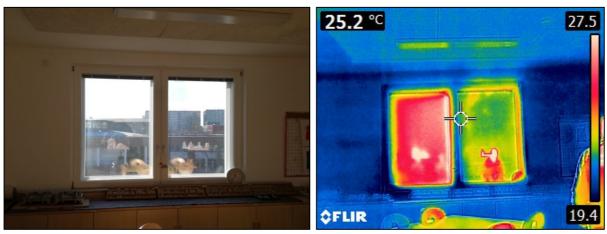


Abbildung 6-18: Südfenster Kunstraum mit getauschter Verglasung im linken Innenflügel

Im Bereich der Ostwand gab es am 06.01.2017 Auffälligkeiten an einer Doppelsteckdose. Die Temperaturdifferenz zum Umgebungsbereich betrug dort 4,1 K. Der Anschluss an die luftdichte Ebene wurde dort vermutlich nicht korrekt ausgeführt. Eine gering investive Möglichkeit zur Beseitigung der Leckage wäre eine dortige nachträgliche Abdichtung des Anschlusses an die luftdichte Ebene.

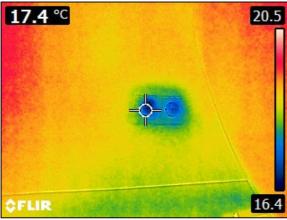


Abbildung 6-19: Undichtigkeit an Steckdose

Am 28.01.2014 war laut [28] im Raum 203 im Gebäudeteil B eine Wärmebrücke an einer Kabeldurchführung vorzufinden. Dort war allerdings keine weitere Leckage messbar. Die minimale Temperatur im Bereich T1 betrug 15,3 °C. Im lilafarbig dargestellten Bereich lag die maximale Temperatur bei 21 °C. Im Zuge der Fertigstellung des Objektes wurde die Kabeldurchdringung nachträglich abgedichtet. Zum Zeitpunkt der Zweitmessung am 06.01.2017 wurden dort keinerlei Auffälligkeiten festgestellt.

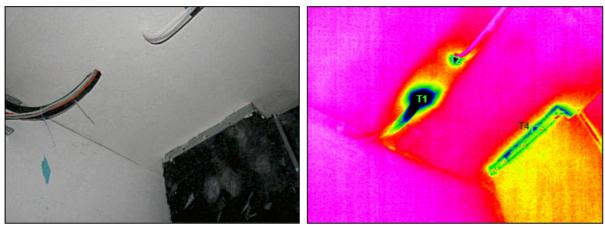


Abbildung 6-20: Kabeldurchdringung Raum 203 am 28.01.2014 [28]

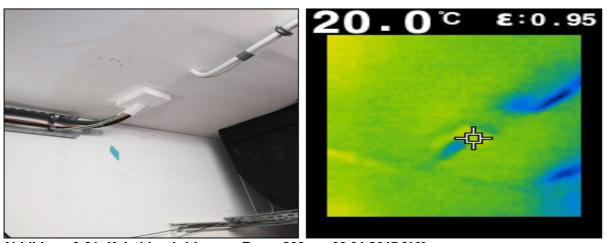


Abbildung 6-21: Kabeldurchdringung Raum 203 am 06.01.2017 [16]

Alle weiteren Teile der Gebäudehülle waren unauffällig.

## 6.5 Verallgemeinerung und Fazit

Um die Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit zu überprüfen, wurde drei Jahre nach Baufertigstellung eine erneute Differenzdruckmessung des Gebäudes durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Messungen liegen sehr dicht beieinander:

Messung am 28.01.2014:  $n_{50} = 0,24 \text{ 1/h}$ Messung am 06.01.2017:  $n_{50} = 0,26 \text{ 1/h}$ 

Die Gebäudehülle der St. Franziskus Grundschule in Halle (Saale) weist für die vorhandene Hüllfläche von 4.610 m² während des konstanten Differenzdruckes von 50 Pascal wenige Leckagen auf. Es gibt keine nennenswerten Veränderungen, beide Ergebnisse liegen weit unter den Anforderungen an Passivhäuser mit  $n_{50} \le 0,60$  1/h und verdeutlichen das gute Luftdichtheitskonzept der Planer. Das Holzbausystem hat sich hinsichtlich der Qualität der Planung und der Ausführung als sehr anspruchsvoll und aus jetziger Sicht dauerhaft erwiesen.

# 7 Schallschutz

Im folgenden Kapitel werden die schallschutztechnischen Untersuchungen in der Schule hinsichtlich der Luftschalldämmung und Trittschalldämmung beschrieben, rechnerisch ausgewertet und interpretiert. Die ebenfalls durchgeführten Nachhallzeitmessungen (Bauakustik) sind Bestandteil des Abschlussberichtes 5.

#### Entwicklungsphase des Holzbausystems

Im Zuge der Entwicklung des zum Einsatz gekommenen Holzbausystems Naumann & Stahr erfolgte im Oktober 2000 die Messung der Luftschalldämmung der Außenwand bei der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e. V. (Prüfbericht Nr. PB V/00-640 MFPA Leipzig e. V.). Im Ergebnis erzielte die Konstruktion ein bewertetes Schalldämmmaß von  $R_w$  = 60 dB und einen Rechenwert von  $R_{w,R}$  = 58 dB [33].

Die Kastenfenster verfügen durch ihre Vierfachverglasung über ein hohes bewertetes Schalldämmmaß nach DIN EN ISO 717-1 [34]. Sie ermöglichen somit einen sehr guten Schutz gegen Außenlärm. Die Prüfung des Fensterelementes vom 17. Mai 2001 ergab einen Wert von  $R_W = 51 \ dB$  [35].

Durch die zum Einsatz kommende Lüftungsanlage besteht zunächst nicht die Notwendigkeit, die Fenster für Lüftungszwecke zu öffnen und somit Außenlärm in den Klassenraum hineinzulassen. Wird der äußere bzw. der innere Fensterflügel entsprechend der Sommer- bzw. Winterfunktion angekippt, verringert sich der Schallschutz entsprechend auf den Wert eines zweifachverglasten Fensterflügels. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies nicht zu akustischen Beeinträchtigungen führt.

#### Messung am 14. Oktober 2016 und Auswertung

Am 14. Oktober 2016 wurde im Rahmen des Monitorings das Luftschalldämmmaß von ausgewählten Wänden und Decken gemessen. Eine Trittschallmessung komplettierte die Untersuchungen. Die ausgeführten schalltechnischen Messungen orientieren sich an den Normen DIN EN ISO 16283 Teil 1 und 2 [36] [37].

Außerdem erfolgte jeweils eine Nachhallzeitmessung im Empfangsraum. Detaillierte Ergebnisse der Nachhallzeitmessungen verschiedener Räume können im Abschlussbericht Teil 5 zum Thema Raumklima und Behaglichkeit, Kapitel 7, nachgelesen werden.

Messungen am Bau können, im Gegensatz zu Labormessungen, keine Aussagen über Schalldämmmaße einzelner Bauteile treffen, sondern sind zusammengesetzt aus abgestrahlten Schallleistungen des trennenden Bauteils, flankierender Bauteile und anderer Elemente wie beispielsweise technischer Gebäudeanlagen [38].

Um eine Verfälschung der Messwerte durch Stör- und Hintergrundgeräusche möglichst auszuschließen erfolgt eine Messung dieser Geräusche und gegebenenfalls eine Anpassung der Signalpegel nach DIN EN ISO 16283 [36, p. 21]. Zur Vergleichbarkeit und Prüfung der Bauteile auf Normkonformität erfolgt eine Beschreibung des Bauteils mithilfe einer Einzahlangabe durch Annäherung einer Bezugskurve an die Messwertkurve [34, p. 5].

Die Auswertung der Messwerte erfolgte im Rahmen der Bachelorarbeit "Schallschutz und Raumakustik in einer Grundschule" von Dimitri Kleer [39].

Folgende Bauteile wurden gemessen:

- die Wand zwischen Raum 2.01 und Raum 2.02
- die Decke zwischen Raum 2.01 und Raum 1.01 (auch Trittschallmessung)
- die Decke zwischen dem Raum der Stille und Raum 2.14

#### 7.1 Ausgewählte Details

#### 7.1.1 Schallentkoppelte Innenwand zwischen Raum 2.01 und Raum 2.02

Die Wand zwischen Raum 2.01 und Raum 2.02 ist 5,72 m lang und 3,16 m hoch. Dies ergibt eine Schallübertragungsfläche von rund 18 m². Die Gesamtstärke der Wand beläuft sich auf 200 mm, bestehend aus doppellagiger Beplankung auf beiden Seiten mit jeweils einer 12,5 mm Gipsfaserplatte und einer 15 mm OSB/4-Platte, zwei Reihen Wandstützen aus 60x80 mm Konstruktionsvollholz C24, welche um 50 mm versetzt stehen, um eine schalltechnische Entkopplung zu erreichen. Innenliegend befindet sich eine 145 mm starke Dämmschicht aus Zellulose. Flankierende Bauteile sind die 450 mm starke Außenwand sowie eine 200 mm starke tragende Innenwand.

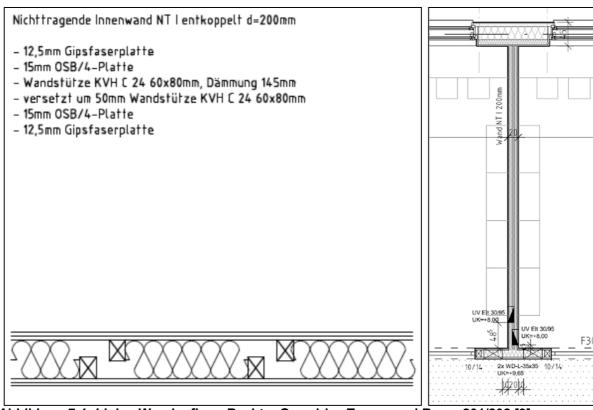


Abbildung 7-1: Links: Wandaufbau; Rechts: Grundriss Trennwand Raum 201/202 [9]



Abbildung 7-2: Schallentkoppelte Trennwand

#### 7.1.2 Schallentkoppelte Holzbalkendecke über Raum 1.01

Die zum Einsatz kommenden, schalltechnisch entkoppelten Holzbalkendecken wurden im Zuge der Entwicklung des Bausystems mit einem Luftschalldämmmaß von 71 dB angegeben. Die Trittschallübertragung soll zudem unter 44 dB liegen [33].

Die Holzbalkendecke über dem Raum 1.01 ist insgesamt 440 mm stark und hat folgenden Aufbau von oben nach unten: 5 mm Linoleumbelag, 25 mm Gipsfaserplatten, 10 mm Trittschallplatte, 2 x 15 mm OSB/4-Platte als obere Beplankung, Randquerträger Gl24h 120/280, Längsbalken Gl24h 120/280 sowie über Balkenschuhe und 30 mm Weichfaserplatten entkoppelte Tragbalken 100/200 für die Unterdecke Traglattung C24 60/40, untere Beplankung aus 12,5 + 10 mm Gipsfaserplatten. In einem Teilbereich von 31 m² bildet ein Deckensegel mit 25 mm starken Heradesign Absorberplatten die Untersicht.

Die Decke weist eine Grund- sowie Schallübertragungsfläche von rund 83 m² auf.

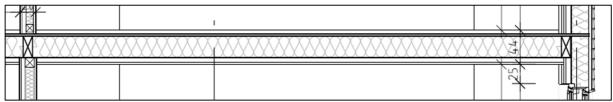


Abbildung 7-3: Schnittansicht Decke über Raum 101 [9]



Abbildung 7-4: Untersicht der schallentkoppelten Decke im Rohbau

## 7.1.3 Decke über dem Raum der Stille



Abbildung 7-5: Deckenbekleidung im Raum der Stille

Die Decke über dem Raum der Stille weist den selben Aufbau wie die Decke über dem Raum 1.01 auf, bis auf die in diesem Gebäude einzigartige Deckenbekleidung im Raum der Stille. Die Schallübertragungsfläche beläuft sich auf rund 53 m².

#### 7.2 Messorte und Messtechnik

## 7.2.1 Messanordnung

Zur Erzeugung des Schallfeldes kamen ein Norm-Hammerwerk sowie ein Lautsprecher zum Einsatz. Der Schallpegel wurde von zwei an Stativen befestigten Mikrofonen gemessen. Die Erfassung der Messdaten erfolgte über einen Zweikanaligen Echtzeitanalysator Norsonic RTA 840.

#### 7.2.2 Messvorgang und Auswertung

Für die Ermittlung des Schalldämmmaßes werden die Schallpegel des Sende- und Empfangsraums gemessen. Insgesamt wurden für jeden nötigen schalltechnischen Kennwert fünf Messungen durchgeführt und dabei die Position von beiden Mikrofonen variiert.

Die so erzeugten schallakustischen Messwerte wurden in einer EXCEL-Tabelle zusammengefasst und in vergleich- und bewertbare Kennwerte umgewandelt sowie die relevanten Diagramme erzeugt. Abschließend erfolgte eine Überprüfung der Kennwerte auf Normkonformität.

Bei der Auswertung der Messdaten ist zunächst der Empfangsraumpegel L<sub>E</sub> auf die Einflüsse aus dem Störpegel L<sub>b</sub> zu überprüfen und ggf. der Korrekturpegel L<sub>korr</sub> zu ermitteln. Bei Überschreitung des Störpegels L<sub>b</sub> um 10 dB gilt der Empfangsraumpegel L<sub>sb</sub> als ungestört. Beträgt die Überschreitung weniger als 10 dB, jedoch mehr als 6 dB, erfolgt eine Korrektur des Empfangspegels nach Formel (1). Fällt die Überschreitung geringer als 6 dB aus wird der Empfangsraumpegel pauschal um 1,3 dB verringert [36].

$$L_{korr} = 10 * \lg(10^{L_{Sb}/_{10}} - 10^{L_{b}/_{10}})$$
(1)

Über die Eingangswerte lässt sich das Bauschalldämmmaß R' für die einzelnen Frequenzen in Terzbändern ermitteln. Hierzu addiert man den zehnfachen dekadischen Logarithmus des Verhältnisses zwischen der Trennbauteilfläche S und der äquivalenten Schallabsorptionsfläche  $A_{abs}$  im Empfangsraum zur Differenz der gemessenen Schallpegel  $L_{s}$  bzw. korrigierten Schallpegel  $L_{korr}$  [36, p. 8]. Die Auswertung erfolgte in EXCEL.

$$R' = L_S - L_{korr} + 10 * lg \frac{S}{A_{ahs}}$$
 (2)

Um das bewertete Bauschalldämmmaß R'<sub>W</sub> als vergleichbaren Kennwert zu ermitteln, wird die nun entstandene, in 16 Terzbändern gestaffelte Messkurve mit einer Bezugskurve verglichen. Die Werte der Bezugskurve sind in der DIN EN ISO 717-1 festgelegt (Abbildung 7-6).

Naturgemäß ist die gemessene Kurve nicht deckungsgleich mit der Bezugskurve. Um nun anstelle von 16 frequenzabhängigen Schalldämmmaßen zu einer Einzahlangabe für das bewertete Schalldämmmaß zu kommen, muss die Bezugskurve solange in 1 dB Schritten in Richtung der Messkurve verschoben werden, bis in den Terzmittenfrequenzen die Summe der Unterschreitungen der Bezugskurve durch die Messkurve einem Wert von 32 dB möglichst nahekommt (bei 16 Terzmittenfrequenzen im Mittel 2 dB) [34, p. 10]. Die Vorgehensweise verdeutlicht z. B. Tabelle 7-2. Die Einzahlangabe kann dann bei einer Frequenz von 500 Hz abgelesen werden.

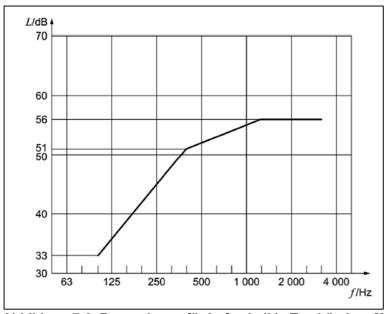


Abbildung 7-6: Bezugskurve für Luftschall in Terzbändern [34, p. 7]

Aus dieser Korrektur heraus ergibt sich dann das Diagramm mit einer verschobenen Bezugskurve, wie beispielsweise in Abbildung 7-7 dargestellt. Die Verschiebung der Bezugskurve (rot) nach oben entspricht dabei einer gegenüber dem Referenzbauteil verbesserten Konstruktion.

### 7.3 Ergebnisse der Wandmessung zwischen Raum 2.01 und 2.02

Die Ergebnisse der Wandmessung einschließlich der ggf. erforderlichen Korrekturen können Tabelle 7-1 entnommen werden.

Bis zu einer Frequenz von 800 Hz lagen die Empfangsraumpegel mehr als 10 dB über dem Störpegel und galten als ungestört (grün). Bei 1000 Hz lag der Empfangsraumpegel 7 dB über dem Störpegel und wurde nach Formel (1) korrigiert (blau). Ab 1250 Hz fiel die Überschreitung des Störpegels geringer als 6 dB aus, somit wurden zur Ermittlung von  $L_{korr}$  pauschal 1,3 dB von  $L_{E}$  abgezogen (rot).

Tabelle 7-1: Messwerte der Wand zwischen Raum 2.01 und 2.02 [39]

Frequenz [Hz]	Störpegel L₅ [dB]	Empfangsraumpegel L <sub>E,Mittel</sub> [dB]	Korrekturpegel L <sub>korr</sub> [dB]	Sendepegel L <sub>S,Mittel</sub> [dB]
100	18,1	52,0	52,0	88,2
125	16,9	54,2	54,2	95,1
160	18,5	54,5	54,5	101,9
200	17,3	56,2	56,2	100,5
250	18,4	50,9	50,9	97,2
315	17,2	43,9	43,9	95,4
400	17,5	40,0	40,0	94,3
500	18,1	36,2	36,2	92,6
630	18,5	32,9	32,9	91,5
800	19,3	30,2	30,2	90,0
1000	20,2	27,2	26,2	90,0
1250	21,9	27,3	26,0	92,1
1600	24,7	27,7	26,4	91,6
2000	29,3	28,4	27,1	88,8
2500	26,6	29,9	28,6	89,5
3150	24,7	27,8	26,5	84,8

Zur Ermittlung des Schalldämmmaßes erfolgt nun die Verschiebung der Bezugskurve entsprechend DIN EN ISO 717-1 [34]. Tabelle 7-2 zeigt die Vorgehensweise zur Ermittlung des bewerteten Bauschalldämmmaßes R'w. Nach Verschieben der Bezugskurve um 2 dB nach oben ist diese der Messkurve so weit wie möglich angenähert mit einer mittleren Unterschreitung von 1,6 < 2 dB.

Tabelle 7-2: Ermittlung der Einzahlangabe für das bewertete Bauschalldämmmaß der Wand zwischen Raum 2.01 und 2.02 [39]

Frequenz [Hz]	Bauschalldämmmaß R' [dB]	Bezugswerte [dB]	Bewertetes Bau- schalldämmmaß R'w [dB]	Abweichung [dB]
100	32,3	33	35	-2,7
125	36,5	36	38	-1,5
160	42,8	39	41	1,8
200	40,2	42	44	-3,8
250	42,5	45	47	-4,5
315	48,0	48	50	-2,0
400	50,5	51	53	-2,5
500	52,3	52	54	-1,7
630	54,0	53	55	-1,0
800	55,0	54	56	-1,0
1000	59,1	55	57	2,1
1250	61,4	56	58	3,4
1600	61,0	56	58	3,0
2000	57,6	56	58	-0,4
2500	56,8	56	58	-1,2
3150	54,2	56	58	-3,8
	_	χ=	-2	-1,6

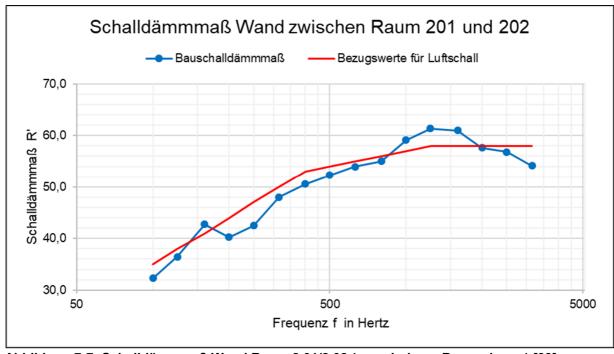


Abbildung 7-7: Schalldämmmaß Wand Raum 2.01/2.02 (verschobene Bezugskurve) [39]

Das bewertete Schalldämmmaß der eingebauten Wand lässt sich bei 500 Hz ablesen und beträgt  $\mathbf{R'_w} = \mathbf{54} \ d\mathbf{B}$ . Damit kann die Wand den geforderten Mindestwert für Wände zwischen Unterrichtsräumen nach DIN 4109 von 47 dB deutlich übererfüllen. Die Wand ist nach DIN 4109 ausreichend schalldämmend ausgeführt.

## 7.4 Ergebnisse der Deckenmessung über Raum 1.01

Die Messergebnisse der Luftschallmessung sind in Tabelle 7-3 aufgeführt. Auch hier sind ungestörte Pegel grün dargestellt, mit Formel (1) korrigierte Pegel in blau und pauschal um 1,3 dB verringerte Pegel in rot. Auffallend sind die Empfangsraumpegel über 500 Hz, die aufgrund von Stör- und Nebengeräuschen angepasst werden müssen.

Tabelle 7-3: Messwerte der Decke über Raum 1.01 [39]

Frequenz [Hz]	Störpegel L₅ [dB]	Empfangsraumpegel L <sub>E,Mittel</sub> [dB]	Korrekturpegel L <sub>korr</sub> [dB]	Sendepegel L <sub>S,Mittel</sub> [dB]
100	18,1	48,2	48,2	87,1
125	16,9	48,2	48,2	94,0
160	18,5	51,5	51,5	99,3
200	17,3	54,3	54,3	100,8
250	18,4	46,7	46,7	97,8
315	17,2	38,5	38,5	96,4
400	17,5	31,9	31,9	92,8
500	18,1	27,7	27,2	93,7
630	18,5	24,1	22,8	91,0
800	19,3	23,4	22,1	90,7
1000	20,2	22,7	21,4	90,2
1250	21,9	24,1	22,8	91,6
1600	24,7	25,8	24,5	91,5
2000	29,3	26,7	25,4	89,4
2500	26,6	26,8	25,5	89,3
3150	24,7	26,0	24,7	85,5

Tabelle 7-4: Ermittlung der Einzahlangabe für das bewertete Bauschalldämmmaß der Decke zwischen Raum 1.01 und 2.01 [39]

Frequenz [Hz]	Bauschalldämmmaß R' [dB]	Bezugswerte [dB]	Bewertetes Bau- schalldämmmaß R'w [dB]	Abweichung [dB]
100	41,6	33	46	-4,4
125	47,9	36	49	-1,1
160	49,8	39	52	-2,2
200	49,0	42	55	-6,0
250	54,0	45	58	-4,0
315	61,0	48	61	0,0
400	63,7	51	64	-0,3
500	69,0	52	65	4,0
630	70,2	53	66	4,2
800	70,4	54	67	3,4
1000	70,7	55	68	2,7
1250	70,8	56	69	1,8
1600	69,4	56	69	0,4
2000	66,5	56	69	-2,5
2500	66,3	56	69	-2,7
3150	63,4	56	69	-5,6
		χ=	-13	-1,80

Nach Verschieben der Bezugskurve um 13 dB ergibt sich ein bewertetes Schalldämmmaß von **R'w=65 dB** (Tabelle 7-4 und Abbildung 7-8). Der Anforderungswert von 55 dB wird damit bei weitem erfüllt, die Decke über Raum 1.01 ist ausreichend schallgedämmt.

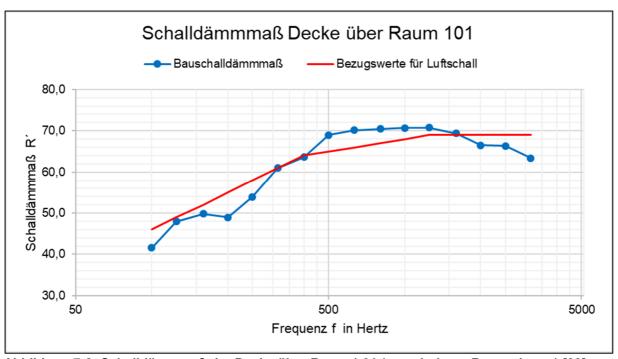


Abbildung 7-8: Schalldämmmaß der Decke über Raum 1.01 (verschobene Bezugskurve) [39]

## Trittschallmessung der Decke über Raum 1.01

Für die Decke über dem Raum 1.01 wurde zusätzlich eine Trittschallmessung durchgeführt. Auch hier wurden zunächst die Störpegel gemessen und die Empfangsraumpegel ggf. entsprechend korrigiert (Tabelle 7-5).

Tabelle 7-5: Messwerte der Decke über Raum 1.01 [39]

Frequenz [Hz]	Störpegel L₀ [dB]	Empfangsraumpegel L <sub>E,Mittel</sub> [dB]	Korrekturpegel L <sub>korr</sub> [dB]
100	18,1	50,5	50,5
125	16,9	48,2	48,2
160	18,5	49,5	49,5
200	17,3	52,9	52,9
250	18,4	51,9	51,9
315	17,2	51,3	51,3
400	17,5	47,8	47,8
500	18,1	45,0	45,0
630	18,5	40,4	40,4
800	19,3	35,7	35,7
1000	20,2	33,8	33,8
1250	21,9	29,1	28,2
1600	24,7	25,8	24,5
2000	29,3	24,1	22,8
2500	26,6	24,0	22,7
3150	24,7	24,3	23,0

Die Berechnung des Norm-Trittschallpegels  $L_n$  nach DIN EN ISO 16283 erfolgt nach folgender Formel [40, p. 11].  $A_0$  ist dabei eine Bezugs-Absorptionsfläche, die in der DIN 4109 auf 10  $m^2$  genormt ist.

$$L'_n = L_{korr} + 10 * \lg\left(\frac{A_{abs}}{A_0}\right)$$
 (3)

Auch für Trittschalldämmung erfolgt eine Anpassung der Messkurve an eine Bezugskurve, hier jedoch nach DIN EIN ISO 717-2. Die Vorgehensweise ist ansonsten die gleiche wie bei der Luftschalldämmung.

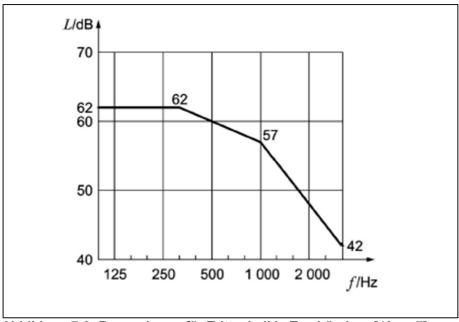


Abbildung 7-9: Bezugskurve für Trittschall in Terzbändern [40, p. 7]

Tabelle 7-6 dokumentiert die Vorgehensweise zur Verschiebung der Bezugskurve um 8 dB nach unten.

Tabelle 7-6: Ermittlung der Einzahlangabe für den bewerteten Norm-Trittschallpegels der Decke über Raum 1.01 [39]

Frequenz [Hz]	Norm-Trittschallpegel [dB]	Bezugswerte [dB]	Bewerteter Norm-Tritt- schallpegel [dB]	Abweichung [dB]
100	57,5	62	54	3,5
125	56,0	62	54	2,0
160	56,9	62	54	2,9
200	60,4	62	54	6,4
250	58,5	62	54	4,5
315	58,1	62	54	4,1
400	55,1	61	53	2,1
500	52,7	60	52	0,7
630	48,2	59	51	-2,8
800	43,8	58	50	-6,2
1000	41,9	57	49	-7,1
1250	36,0	54	46	-10,0
1600	32,4	51	43	-10,6
2000	30,3	48	40	-9,7
2500	30,3	45	37	-6,7
3150	31,0	42	34	-3,0
		χ=	8	1,6

Nach der Verschiebung der Bezugskurve um -8 dB kommt sie bestmöglich zur Deckung mit der Messkurve (Abbildung 7-10). Damit entspricht der bewertete Norm-Trittschallpegel der Decke  $L'_{n,w}$  = 52 dB. Damit ist der vorhandene Trittschallpegel kleiner als der zulässige mit 53 dB. Die Decke ist nach DIN 4109 ausreichend schalldämmend ausgeführt.

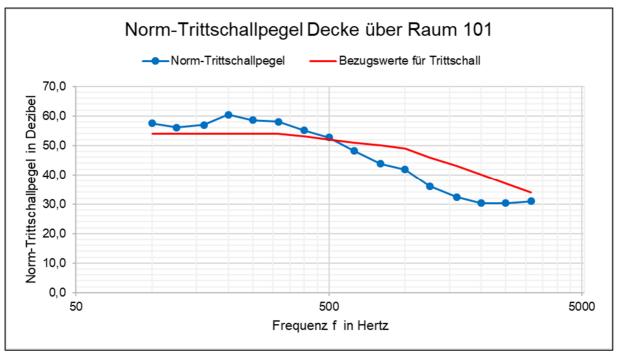


Abbildung 7-10: Trittschalldämmmaß der Decke über Raum 1.01 (verschobene Bezugskurve) [39]

## 7.5 Ergebnisse der Deckenmessung über dem Raum der Stille

Die Messergebnisse der Luftschallmessung sind in Tabelle 7-3 aufgeführt. Ungestörte Pegel sind grün dargestellt, mit Formel (1) korrigierte Pegel in blau und pauschal um 1,3 dB verringerte Pegel in rot. Wie bei der Decke über Raum 1.01 fällt auf, dass die Empfangsraumpegel über 630 Hz durch Nebengeräusche gestört werden und angepasst werden müssen.

Tabelle 7-7: Messwerte der Decke über dem Raum der Stille [39]

Frequenz [Hz]	Störpegel L₅ [dB]	Empfangsraumpegel L <sub>E,Mittel</sub> [dB]	Korrekturpegel L <sub>korr</sub> [dB]	Sendepegel L <sub>S,Mittel</sub> [dB]
100	17,8	54,0	54,0	88,7
125	16,4	54,8	54,8	93,0
160	19,7	57,3	57,3	101,1
200	13,6	53,0	53,0	100,9
250	15,7	45,8	45,8	97,4
315	13,2	39,1	39,1	95,2
400	13,4	33,2	33,2	93,2
500	14,5	26,4	26,4	92,1
630	15,4	21,6	20,4	90,3
800	16,5	18,2	16,9	89,3
1000	17,9	17,6	16,3	89,2
1250	19,0	18,4	17,1	91,6
1600	20,3	18,9	17,6	91,2
2000	21,1	19,6	18,3	87,7
2500	21,7	20,5	19,2	87,4
3150	21,6	21,5	20,2	83,7

Tabelle 7-8: Ermittlung der Einzahlangabe für das bewertete Bauschalldämmmaß der Decke über dem Raum der Stille [39]

Frequenz [Hz]	Bauschalldämmmaß R' [dB]	Bezugswerte [dB]	Bewertetes Bauschall- dämmmaß R'w [dB]	Abweichung [dB]
100	36,7	33	44	-7,3
125	40,2	36	47	-6,8
160	44,8	39	50	-5,2
200	49,6	42	53	-3,4
250	52,8	45	56	-3,2
315	57,5	48	59	-1,5
400	61,5	51	62	-0,5
500	67,4	52	63	4,4
630	71,4	53	64	7,4
800	73,9	54	65	8,9
1000	74,4	55	66	8,4
1250	75,9	56	67	8,9
1600	75,0	56	67	8,0
2000	70,5	56	67	3,5
2500	69,2	56	67	2,2
3150	64,5	56	67	-2,5
		χ=	-11	-1,9

Nach Verschieben der Bezugskurve um 11 dB ergibt sich ein bewertetes Schalldämmmaß von **R'w=63 dB**. Der Anforderungswert von 55 dB wird damit bei weitem erfüllt, die Decke über dem Raum der Stille ist ausreichend schallgedämmt.

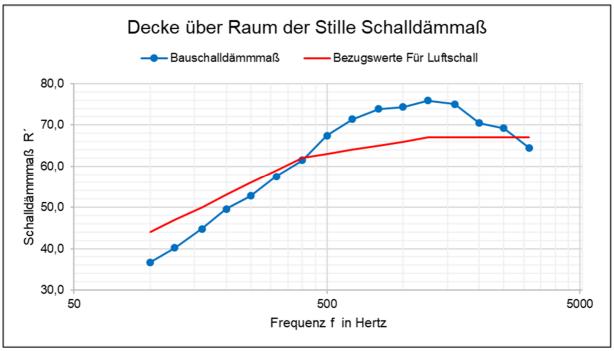


Abbildung 7-11: Schalldämmmaß der Decke über dem Raum der Stille (verschobene Bezugskurve) [39]

## 7.6 Probleme und Verbesserungsansätze

Im Rahmen der Nutzerbefragungen mit der Begleitforschung am 14.04.2015 wurden keine Beschwerden über mangelnden Schallschutz der Baukonstruktion geäußert.

Abgesehen von den hier gemessenen Bauteilen äußerten die Schüler lediglich, dass es störend sei, wenn auf dem Flur gerannt wird. Dies sei auch bei geschlossener Tür deutlich hörbar. Bei normalen Verhaltensweisen höre man vom Flur nichts.

Einziger Kritikpunkt ist in manchen Räumen das Grundgeräusch der Lüftungsanlage. Während sie bei normaler Unterrichtslautstärke kaum zu hören ist, sei sie beim Schreiben von Leistungskontrollen störend. Die Lautstärke ist raumabhängig und nimmt zu, je näher man der Lüftungszentrale ist.

Zu Irritation führen die Geräusche der Lüftungsanlage regelmäßig in den Teamräumen 1.03/1.04/2.04, die auch für Elterngespräche genutzt werden. Die Räume liegen unmittelbar neben bzw. unter der Lüftungszentrale in Raum 2.03.

## 7.7 Verallgemeinerung und Fazit

Bewährte bauliche und planerische Maßnahmen zur Lärmreduzierung sind:

- schalltechnisch entkoppelte Konstruktionen,
- schallabsorbierende Decken- und ggf. Wandoberflächen,
- schallabsorbierende Einrichtungsgegenstände, Filzgleiter,
- Installation einer Lüftungsanlage, um das Eindringen von Außenlärm durch Öffnen der Fenster zu vermeiden.

All diese Maßnahmen wurden in der Grundschule auf hohem Niveau umgesetzt.

## 7.7.1 Wandmessung

Das bewertete Schalldämmmaß der schallentkoppelten Innenwand zwischen Raum 1.01 und 1.02 beträgt R'<sub>w</sub> = **54 dB > 47 dB**. Damit erfüllt die Wand einen hohen Schallschutzstandard.

## 7.7.2 Deckenmessung

Auch die schallentkoppelte Decke zwischen Raum 1.01 und 2.01 erfüllt mit einem bewerteten Schalldämmmaß von  $\mathbf{R'w} = \mathbf{65} \ d\mathbf{B}$  den Anforderungswert von 55 dB bei weitem. Die Decke über dem Raum der Stille bestätigt diese hervorragende Ausführung auf ähnliche Weise – hier lag der gemessene Wert bei  $\mathbf{R'w} = \mathbf{63} \ d\mathbf{B}$ .

Hinsichtlich des Trittschalls wurde ein guter Standard erreicht. Der bewertete Norm-Trittschallpegel der Decke ist mit  $\mathbf{L}'_{n,w}$  = **52 dB** kleiner als der zulässige Pegel von 53 dB.

Alle gemessenen Bauteile sind demnach sehr gutschallgedämmt.

## 8 Kastenfenster

Dieses Kapitel liefert eine Funktionsbeschreibung der Kastenfenster, während Kapitel 2.6 die allgemeinen technischen Daten bereits genannt hat. Es werden die messtechnischen Ergebnisse zur vorgesehenen Funktion und des Wintergarteneffektes jahreszeitenweise vorgestellt. Die gewählte Fensterkonstruktion mit dem integrierten Sonnenschutz wird hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bewertet und Verbesserungsvorschläge für Folgeprojekte gegeben.

Das Nutzerverhalten hinsichtlich der Fensteröffnung und die Auswirkungen auf das Raumklima sind Bestandteil des Abschlussberichtes 5.

## 8.1 Funktionsbeschreibung

Es gibt keine regelungstechnische Kopplung der Fensteröffnung an die Lüftungsanlage. Der Sommerbetrieb sieht eine Öffnung des äußeren Flügels vor, um Stauwärme im Kasten zu vermeiden. Der Winterbetrieb setzt auf eine Öffnung des inneren Flügels, um Wärmeeinträge aus dem Kastenbereich für den Raum nutzen zu können.

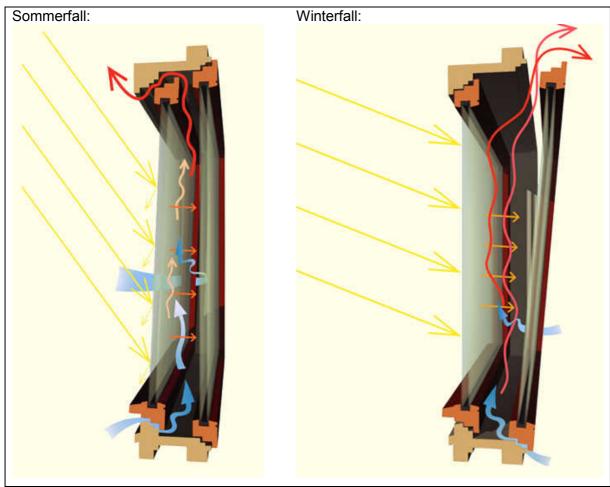


Abbildung 8-1: Links: Sommerfall, Rechts: Winterfall [3]

Jegliche Öffnung der Fenster hat manuell zu erfolgen. Die Festlegung, welche jahreszeitliche Fensterstellung vorgenommen wird, erfolgt global und wird durch den Hausmeister händisch umgesetzt. Etwa im März werden die Außenflügel geöffnet und die Innenflügel geschlossen. Etwa im Oktober erfolgt dies andersherum.

Im Kastenbereich befindet sich am inneren Flügel eine elektrisch angetriebene Jalousette vom Fabrikat Faltenbacher Jalousie F-02. Wird der innere Fensterflügel geöffnet, bewegt sich demnach auch die Verschattung mit (Abbildung 8-2, links). Die Lamellenbreite beträgt 25 mm.

Mit dieser Anordnung wird die Verschattungsanlage vor Witterungseinflüssen geschützt.



Abbildung 8-2: Links: Blick in Fensterkasten mit hochgefahrener Jalousie, Rechts: Durchblick bei heruntergefahrener Jalousie

Die Jalousetten weisen eine Absorberseite (schwarz) und eine Reflektorseite (reflektierend) auf, sodass entsprechend der Kippstellung der Lamellen die Sonneneinstrahlung absorbiert bzw. reflektiert werden kann.

Im Sommer kommt die metallisch reflektierende Oberfläche zum Tragen, welche den Wärmeeintrag in den Innenraum mindert (Abbildung 8-3, rechts). Um die solaren Gewinne im Winterfall zu generieren, wird die schwarze Oberfläche nach außen positioniert um die Wärme zu absorbieren (Abbildung 8-3, links).



Abbildung 8-3: Links: Absorberseite außen, Rechts: Absorberseite innen

#### 8.2 Messorte und Messtechnik

Gemessen werden die Temperaturen in den Kastenfenstern in Räumen unterschiedlicher Himmelsrichtung. Dabei wird auch die Raumtemperatur in dem Raum erfasst:

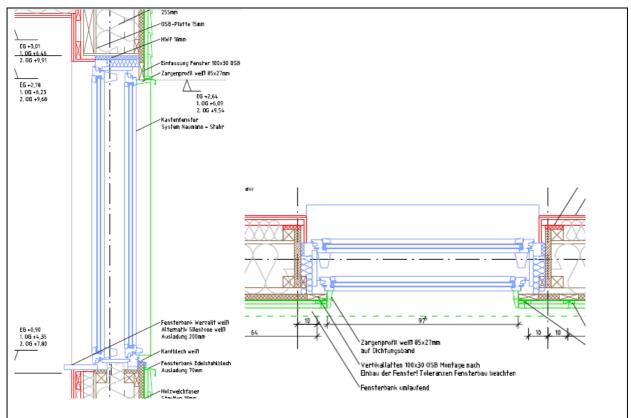
- Klassenraum 1.08 (Süd)
- Klassenraum 2.01 (Nord)
- Lehrerzimmer 1.04 (Nord/Ost).

#### Messkonzept:

- Ziel war die Messung der Zwischenraumtemperatur und der Abgleich mit dem Öffnungszustand der Fenster (Fensterkontakte)
- Untersuchung des "Wintergarteneffektes" des Kastens
- Erfassung von Innen- und Außentemperatur sowie Strahlung

In Räumen unterschiedlicher Himmelsrichtung werden Temperaturen in Kastenfenstern gemessen. Der "Wintergarteneffekt" des Kastens kann nachvollzogen werden. Zusammen mit den Fensterkontaktmessungen wird der energetische Effekt der Kastenfenster beurteilt. Diese Messung wurde wie geplant in Klassenraum 2.01 sowie 1.08 umgesetzt (je 12 Temperaturfühler und 12 Reed-Kontakte).

Im Lehrerzimmer 1.04 wird nur das Ost-Fenster überwacht (4 Temperaturmessungen und 4 Reed-Kontakte), während die Messung im Nord-Fenster komplett ausgefallen ist. Grund ist hierfür die Durchtrennung der Messtechnikkabel während des Innenausbaus.



- Doppelfenster: jeweils 2 x in der linken und 2 x in der rechten Laibung; Höhe ⅓ und ⅔
  des Kastens
- Einzelfenster: jeweils 1 x in der linken und 1 x in der rechten Laibung; Höhe ⅓ und gegnüberliegend ⅔ des Kastens

Abbildung 8-4: Lage der Messpunkte im Kastenfenster

Tabelle 8-1: Messpunkte in den Kastenfenstern

Kürzel	Ein- heit	Gruppe	Unter- gruppe	Beschreibung
Öffnungszustand			,	
CF0588-52D0-0	bits	RAU	FEK	Fensteroeffnung_Klasse_108_links
CF0588-52D0-8		RAU	FEK	Fensteroeffnung Klasse 108 links innen
CF0588-52D0-9		RAU	FEK	Fensteroeffnung Klasse 108 links außen
CF0588-52D2-0	bits	RAU	FEK	Fensteroeffnung Klasse 108 mitte
CF0588-52D2-8		RAU	FEK	Fensteroeffnung Klasse 108 mitte innen
CF0588-52D2-9		RAU	FEK	Fensteroeffnung_Klasse_108_mitte außen
CF0588-52D4-0	bits	RAU	FEK	Fensteroeffnung Klasse 108 rechts
CF0588-52D4-8		RAU	FEK	Fensteroeffnung Klasse 108 rechts innen
CF0588-52D4-9		RAU	FEK	Fensteroeffnung_Klasse_108_rechts außen
CF0588-55D0-0	bits	RAU	FEK	Fensteroeffnung Klasse 201 links
CF0588-55D0-8		RAU	FEK	Fensteroeffnung_Klasse_201_links innen
CF0588-55D0-9		RAU	FEK	Fensteroeffnung_Klasse_201_links außen
CF0588-55D2-0	bits	RAU	FEK	Fensteroeffnung Klasse 201 mitte
CF0588-55D2-8		RAU	FEK	Fensteroeffnung_Klasse_201_mitte innen
CF0588-55D2-9		RAU	FEK	Fensteroeffnung Klasse 201 mitte außen
CF0588-55D4-0	bits	RAU	FEK	Fensteroeffnung_Klasse_201_rechts
CF0588-55D4-8		RAU	FEK	Fensteroeffnung_Klasse_201_rechts innen
CF0588-55D4-9		RAU	FEK	Fensteroeffnung_Klasse_201_rechts außen
CF0588-56D0-0	bits	RAU	FEK	Fensteroeffnung Lehrerzimmer 104 Ost
CF0588-56D0-8		RAU	FEK	Fensteroeffnung Lehrerzimmer 104 Ost innen
CF0588-56D0-9		RAU	FEK	Fensteroeffnung Lehrerzimmer 104 Ost außen
Temperaturen				
DF0220-2592-0	°C	BAU	KFE	Klasse_108_linkes_Fenster_links_oben
DF0220-2594-0	°C	BAU	KFE	Klasse 108 linkes Fenster links unten
DF0220-2596-0	°C	BAU	KFE	Klasse 108 linkes Fenster rechts oben
DF0220-259A-0	°C	BAU	KFE	Klasse 108 linkes Fenster rechts unten
DF0220-259C-0	°C	BAU	KFE	Klasse 108 mittleres Fenster links oben
DF0220-259E-0	°C	BAU	KFE	Klasse 108 mittleres Fenster links unten
DF0220-5292-0	°C	BAU	KFE	Klasse_108_mittleres_Fenster_rechts_oben
DF0220-5294-0	°C	BAU	KFE	Klasse_108_mittleres_Fenster_rechts_unten
DF0220-5296-0	°C	BAU	KFE	Klasse_108_rechtes_Fenster_links_oben
DF0220-529A-0	°C	BAU	KFE	Klasse_108_rechtes_Fenster_links_unten
DF0220-529C-0	°C	BAU	KFE	Klasse_108_rechtes_Fenster_rechts_oben
DF0220-529E-0	°C	BAU	KFE	Klasse_108_rechtes_Fenster_rechts_unten
DF0220-5592-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_mittleres_Fenster_rechts_unten
DF0220-5594-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_rechtes_Fenster_links_unten
DF0220-5596-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_rechtes_Fenster_rechts_unten
DF0220-559A-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_mittleres_Fenster_rechts_oben
DF0220-559C-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_rechtes_Fenster_links_oben
DF0220-559E-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_rechtes_Fenster_rechts_oben
DF0220-5692-0	°C	BAU	KFE	Fenstertemperatur_Lehrerzimmer_104_Ost
DF0220-5694-0	°C	BAU	KFE	Fenstertemperatur_Lehrerzimmer_104_Ost
DF0220-569C-0	°C	BAU	KFE	Fenstertemperatur_Lehrerzimmer_104_Ost
DF0220-569E-0	°C	BAU	KFE	Fenstertemperatur_Lehrerzimmer_104_Ost
DF0321-5550-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_linkes_Fenster_links_unten_Temperatur
DF0321-5570-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_linkes_Fenster_rechts_oben
DF0321-5572-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_linkes_Fenster_links_oben
DF0321-5574-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_linkes_Fenster_rechts_unten
DF0321-5588-0	°C	BAU	KFE	Klasse_201_mittleres_Fenster_links_oben
Feuchten				
DF0321-5588-1	%	BAU	KFE	Klasse_201_mittleres_Fenster_links_oben
DF0321-558C-1	%	BAU	KFE	Klasse_201_mittleres_Fenster_links_unten
Außenklima			_	
DF0321-7002-0	°C	WET	WET	Außentemperatur
DF0321-7002-1	%	WET	WET	Luftfeuchte
DF0384-7001-0	W/m²	WET	WET	Globalstrahlung_der_Wetterstation
DF0382-7001-0	km/h	WET	WET	Windgeschwindigkeit

Die Bezeichnung linkes, mittleres oder rechtes Fenster bezieht sich dabei jeweils auf den Blick auf die Fenster aus der Innenperspektive.

Im Wohnzimmer der Hausmeisterwohnung 2.28 musste auf die geplante Messtechnik komplett verzichtet. Der für die Messtechnik vorgesehene Schaltkasten wurde vom ausführenden Elektrounternehmen fast vollständig für die konventionelle Elektroausstattung benutzt (Sicherungen, Fehlerschutzschalter usw.). Es war praktisch kein Platz mehr für die Messtechnikmodule vorhanden. Der Nutzer stimmte einem zusätzlichen Verteilerkasten auf Putz – zu Recht – nicht zu

Die Messdaten wurden im Rahmen der Masterarbeit mit dem Titel "Untersuchungen zu Behaglichkeitskriterien, zur Raumluftqualität und zum Lüftungsverhalten in einer Passivhausschule" von Lisa Haferung [41] ausgewertet.

Das Öffnungsverhalten wird über Fensterkontakte erfasst. Die Auswertung ist Bestandteil des Abschlussberichtes Teil 5 zum Thema Behaglichkeit.

## 8.3 Ergebnisse Südklassenraum 1.08

In der folgenden Jahresübersicht, welche das linke Kastenfenster stellvertretend für die insgesamt drei Fenster dieses Klassenraumes zeigt, sind die Kastenfenstertemperaturen (rot/blau), die Raumtemperatur (orange), die Außentemperatur (pink) und die Globalstrahlung (gelb) dargestellt (Abbildung 8-5).

Die hellgrünen Verläufe stellen den Öffnungszustand (in bit) dar. Die Bits (Zustände) ergeben sich aus den vorhandenen 4 Einzelkontakten an jedem Kastenfenster wie folgt:

- 0 bit = alle Flügel sind geschlossen
- 2 bit = außen zu, innen offen
- 8 bit = innen zu, außen offen
- 10 bit = mindestens jeweils ein Flügel innen und außen ist offen

Beachtlich ist, dass sogar im Januar und Februar bei geschlossenem Fensterkasten Temperaturen bis zu 70 °C im Kastenbereich erreicht werden. Dies schwächt sich erst ab, als im Februar die inneren Flügel geöffnet werden. Mit Schließen der inneren Flügel im März steigen auch die Temperaturen im Kasten wieder auf erneut 70 °C an.

Im Mai und Juni werden besonders viele Veränderungen vom Nutzer vorgenommen. Die Temperaturen im Kastenbereich erreichen in dieser Zeit maximal 47 °C, da über die äußeren Flügel Stauwärme abgeführt wird (Status: 8 bit).

Während der Sommerferien blieben die Kastenfenster fast durchgehend innen wie außen geschlossen, der eigentlich vorgesehene Sommerfall (außen offen) wurde nur während einer Woche eingestellt. Verwunderlich ist, dass die Temperaturen im Kastenbereich dennoch niedriger blieben als im Januar/Februar und "nur" max. auf 52 °C stiegen.

Nach den Sommerferien wurde die für den Sommer empfohlene Einstellung mit außen geöffneten Flügeln bis Ende September vom Nutzer umgesetzt.

Ab Oktober ist zu sehen, dass auf "Winterbetrieb" mit innen geöffneten Flügeln umgestellt wurde.

Mit einer Ausnahme: Mitte Oktober – in der Woche nach den Herbstferien – entschied man sich nochmals für den Sommerbetrieb, da es sich um eine sehr sonnige Woche handelte.

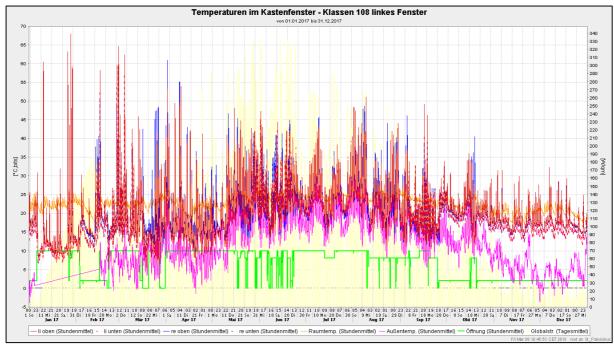


Abbildung 8-5: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – Jahr 2017

Einzelne Aspekte der Auswertung und eine feinere jahreszeitliche Auflösung der Messwerte aus Abbildung 8-5 folgen in den nachfolgenden vier Kapiteln.

## 8.3.1 Frühling

Die Auswertung des Monats April 2017 lässt in Abbildung 8-6 erkennen, dass die Kastenfenster dauerhaft geschlossen waren (grüne Linie bei 10 bit).

Im Fensterkastenbereich stellen sich Temperaturen zwischen 8 °C (20.04.2017) und 61 °C (01.04.2017) ein. Eine Korrelation mit der Globalstrahlung ist erkennbar.

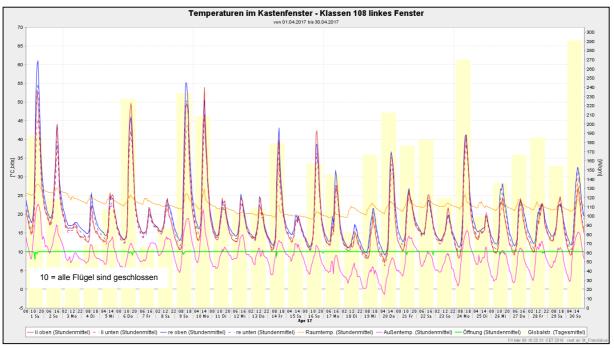


Abbildung 8-6: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – April 2017

Die vermutete Temperaturschichtung im Kastenbereich zwischen oben und unten beträgt in Einzelfällen ca. 7 K, ist aber selten vorhanden (Vergleich durchgezogene und gestrichelte Linien). Gelegentlich gibt es Unterschiede zwischen dem linken und dem rechten Flügel (Vergleich rote und blaue Linien), die durch den Sonnenstand (Verschattung einer Leibung) oder kurzzeitiges Öffnen der Flügel auf einer Seite verursacht sein können, erkennbar an den minimalen Ausschlägen der grünen Linie nach unten.

An ca. der Hälfte der Tage übersteigen die Temperaturen im Kastenbereich zumindest tagsüber die Raumtemperatur, sodass die Ausnutzung des Wintergarteneffektes möglich wäre. Jedoch besteht gerade an diesen Tagen kaum Bedarf an weiteren Gewinnen, da auch die Raumtemperatur bereits im Bereich von 25 °C liegt.

Zum Beispiel am Montag, dem 10.04. wäre es angezeigt gewesen, die äußeren Fensterflügel anzukippen, da die Temperatur im Kastenbereich 54 °C betrug, die Raumtemperatur jedoch mit 27 °C ebenfalls grenzwertig hoch war.

Am Montag, dem 17.04. hingegen lag die Raumtemperatur bei knapp über 20 °C mit Kastenfenstertemperaturen von 27 bis 32 °C. Eine Öffnung des inneren Flügels wäre für die Raumtemperatur vorteilhaft gewesen.

#### 8.3.2 **Sommer**

Im Juni 2017 (Abbildung 8-7) waren in ca. 55 % der Zeit alle Fensterflügel geschlossen (10 bit). Insbesondere dann kam es auch zu Stauwärme in den Kastenfenstern, die zu Temperaturen bis 47 °C führte.

Der Sommerfall (außen geöffnet) wurde in ca. 30 % der Stunden umgesetzt. Jedoch lassen die Temperaturunterschiede zwischen dem linken und rechten Flügel (Vergleich der roten und blauen Linien) vermuten, dass dies nur einseitig umgesetzt wurde. Zum Beispiel vom 09.04. bis 11.04. zeigt die Meldung von 8 bit, dass mindestens ein Außenflügel geöffnet ist. Da die Temperaturen links (rot) ca. 7 K niedriger als rechts (blau) liegen, war vermutlich nur eine Seite offen.

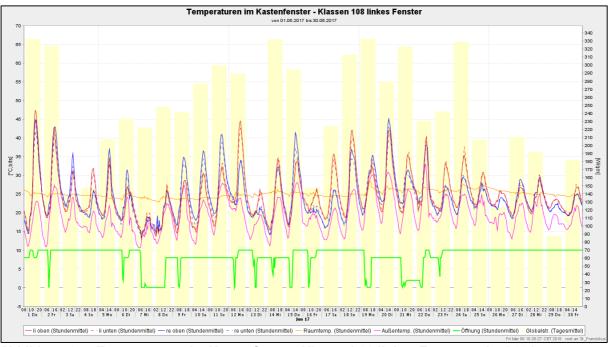


Abbildung 8-7: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – Juni 2017

Am Mittwoch, dem 07.04. wurden alle Flügel geöffnet (vermutlich angekippt) und bis zum Donnerstagnachmittag in dieser Einstellung belassen. Die Temperaturen im Kastenbereich haben sich dabei der Außentemperatur angenähert. Auch die Raumtemperatur ist in dieser Zeit kontinuierlich gefallen.

#### 8.3.3 Herbst

Abbildung 8-8 zeigt den Monat Oktober 2017. Hier ist die Einstellung bereits in 85 % der Zeit auf den Winterfall ausgelegt, das heißt die Wärme aus dem Kastenbereich soll passiv genutzt werden.

In den ersten beiden Wochen waren Herbstferien, es gab keine Veränderungen. Die Temperaturen im Kasten überstiegen nur einmalig die 30 °C-Marke.

Mit Beginn des Unterrichts am 16.10.2017 wurde durch die Nutzer noch einmal auf "Sommerbetrieb" umgestellt, denn nach vier sonnigen Tagen lag die Raumtemperatur anfangs bei 26 °C. Diese sank im Wochenverlauf kaum und zeigte immer wieder Spitzen von 25 °C. Trotz der Öffnung – vermutlich nur des linkes Außenflügels – stellten sich rechtsseitig Temperaturen im Fensterkasten bis 41 °C ein.



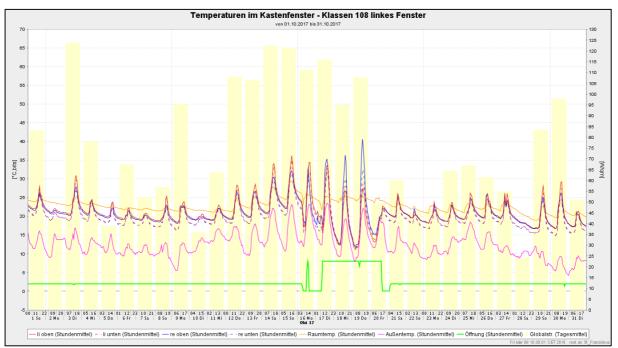


Abbildung 8-8: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – Oktober 2017

#### 8.3.4 Winter

Im Januar 2018 (Abbildung 8-9) waren zunächst die Innenflügel angekippt. Am 05.01.2018 wurden alle Flügel geschlossen und vom Nutzer im Laufe des Monats nicht mehr bedient.

An vier Unterrichtstagen des Januars wäre es theoretisch möglich gewesen, die Wärme aus dem Kastenbereich als Gewinn auszunutzen, da sie höher als die Raumtemperatur lag. Jedoch lag diese ohnehin bereits bei 23 bis 25 °C, sodass kein weiterer Wärmebedarf bestand.

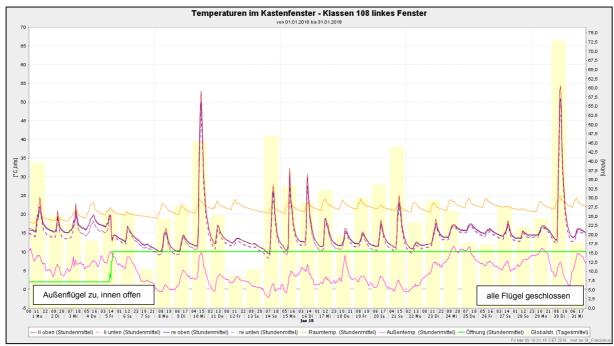


Abbildung 8-9: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – Januar 2018

## 8.4 Ergebnisse Nordklassenraum 2.01

Die Auswertung der Ergebnisse für die Nordorientierung erfolgt für das linke Kastenfenster des Raumes 2.01 für das Jahr 2016. Im Jahresverlauf in Abbildung 8-10 ist erkennbar, dass es im Juli zu Datenausfällen kam.

Die maximale Kastentemperatur beträgt in der linken Leibung 36,6 °C und in der rechten Leibung 47,5 °C. Jedoch fallen die gehäuften Temperaturausreißer im rechten Flügel ab Juli 2016 auf. Es wird vermutet, dass es sich um Messfehler handelt. Insgesamt werden erwartungsgemäß deutlich kleinere Temperaturspitzen erreicht als im Südfenster.

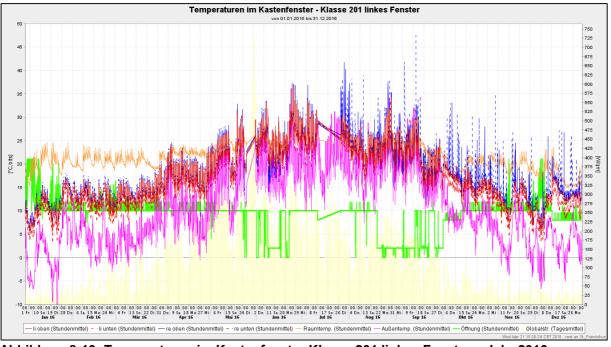


Abbildung 8-10: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster – Jahr 2016

Die zahlreichen Ausschläge beim Öffnungsverhalten über 10 bit hinaus (grün) können nicht erklärt werden. Ein Versuchslauf zu der Funktion der Fensterkontakte am 05.01.2018 zeigte, dass es sich bei dem Wert von 10 bit um geschlossene Flügel handelt.

Einzelne Aspekte der Auswertung und eine feinere jahreszeitliche Auflösung der Messwerte aus Abbildung 8-10 folgen in den nachfolgenden vier Kapiteln.

## 8.4.1 Frühling

Die Temperaturen im Kastenbereich liegen in Abbildung 8-11 zwischen der Raumtemperatur und der Außentemperatur. Nur an fünf Tagen übersteigt die Kastentemperatur marginal die Raumtemperatur. Es gibt demnach keinen nutzbaren "Wintergarteneffekt" auf der Nordseite. Die Stellung der Fenster im Bereich um 10 bit zeigt an, dass alle Flügel geschlossen sind.

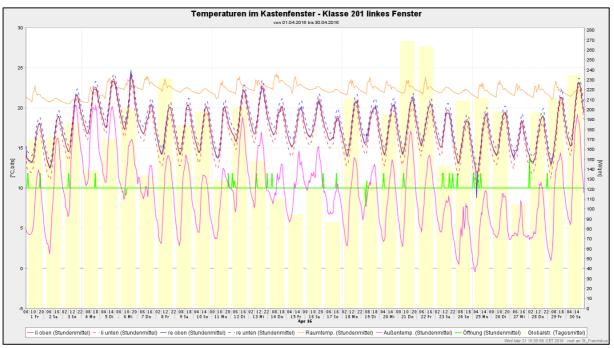


Abbildung 8-11: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster – April 2016

#### 8.4.2 Sommer

Im Juni (Abbildung 8-12) zeigt sich, dass das Fenster durch die Nutzer betätigt wird. Bei geschlossenen Flügeln (10 bit, grüne Linie) kommt es zu Stauwärme im Kastenbereich, welche oberhalb der Raumtemperatur liegt und Ende Juni Maximalwerte von ca. 37 °C erreicht.

Das Öffnen des/der äußeren Flügel am 09.06.2016 (2 bit) führt zur Abfuhr der Stauwärme, jedoch übersteigen auch hier die Temperaturen im Kasten teilweise die Raumtemperatur trotz niedrigerer Außentemperatur.

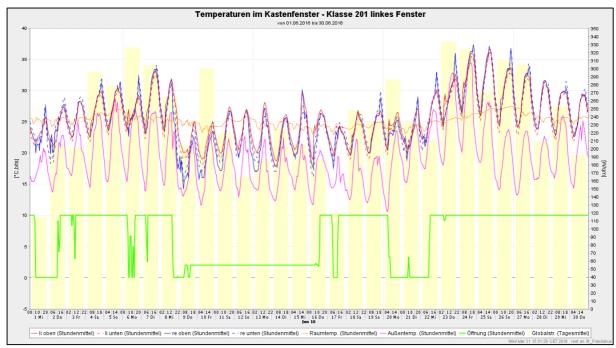


Abbildung 8-12: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster – Juni 2016

#### 8.4.3 Herbst

Im Oktober 2016 (Abbildung 8-13) zeigen sich zahlreiche Ausreißer in der rechten Leibung (blaue Linien). Für den linken Flügel kann festgestellt werden, dass sich eine leichte Temperaturschichtung zwischen oben und unten mit ca. 1-2 K Temperaturdifferenz einstellt.

Anfang Oktober wurde bereits der Winterfall (8 bit, innere Flügel offen) gewählt. Es ist jedoch zu sehen, dass die Raumtemperatur über die ersten beiden Oktoberwochen kontinuierlich abfällt, da es sich um die Herbstferien handelt und nicht geheizt wurde. Mit Rückkehr der Nutzer wurden die Flügel komplett geschlossen (10 bit). Dies führte jedoch, gemessen an der linken Leibung (rot) nicht zu einer Erhöhung der Kastentemperaturen.

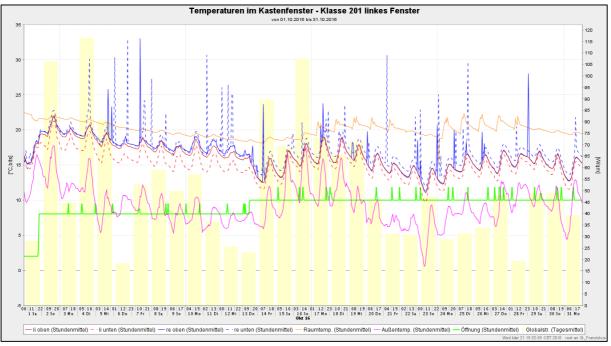


Abbildung 8-13: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster - Oktober 2016

#### 8.4.4 Winter

Im Winter zeigt sich in Abbildung 8-14, dass die Fensterflügel wahrscheinlich über die gesamte Zeit geschlossen waren. Die Temperaturen im Kastenbereich erreichen nicht annähernd die Raumtemperatur, sodass ein Wintergarteneffekt ausgeschlossen ist.

Die Entwicklung der Kastentemperaturen geschieht in Anlehnungen an die Entwicklung der Außentemperatur. Die kontinuierlichen Abfälle der Raumtemperatur über die Wochenenden setzen sich im Kastenfensterbereich nicht fort.

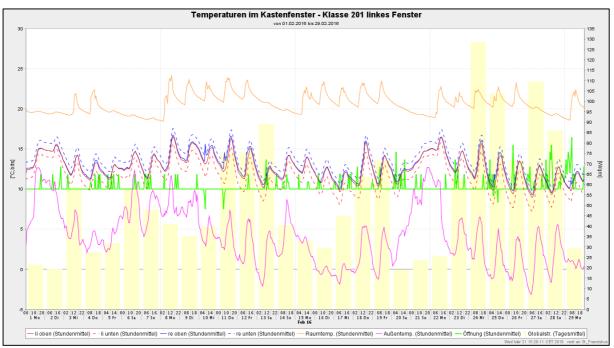


Abbildung 8-14: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster – Februar 2016

### 8.5 Probleme und Verbesserungsansätze

#### 8.5.1 Fensterkonstruktion

Der Fensterkastenbereich ist so konstruiert, dass bei einigen Fenstern das Schließen des Innenflügels auch zu einem Zudrücken des Außenflügels führt. Der lichte Abstand zwischen dem Innenflügel und dem Griff des Außenflügels ist so knapp bemessen (für den Griff gibt es sogar eigens eine Aussparung im Rahmen des Innenflügels), dass er bei Maßtoleranzen vereinzelt nicht ausreicht und der Außenflügel ungewollt zufällt.

Auch ohne gegenseitige Berührung von Innen- und Außenflügel scheinen die Fensterflügel aus der Kippstellung gelegentlich von selbst zuzufallen, da die Außenflügel sich nur sehr gering kippen lassen. Um dies zu verhindern, werden durch die Nutzer Stopper dazwischen geklemmt. Es wurde der Wunsch nach Feststellern geäußert, um das Zuschlagen der Fenster zu vermeiden.

Abbildung 8-15 zeigt das Fenster in Raum 1.24 mit geöffnetem Außenflügel. Der äußere Beschlag berührt fast die Ausbuchtung im Rahmen des Innenflügels.

Im fertigen Bauzustand mit der sichtbaren verbleibenden Innenleibungstiefe erschließt sich dem Betrachter zunächst nicht, warum man den Innenflügel nicht deutlich nach innen gerückt hat. Betrachtet man jedoch die Einbausituation der Fenster im Rohbau (Abbildung 8-16), so wird deutlich, dass diese innen bündig mit der Luftdichtheitsebene sitzen und außen bündig mit der Horizontallattung. Die Innenleibung im Fertigzustand resultiert demnach aus den Maßen der Installationsebene.

Würde man bei Folgeprojekten mit diesem Bausystem eine Verbreiterung des Fensterkastens anstreben, müsste man demnach schon am Grundaufbau der Außenwand ansetzen.

Andererseits hätte ein Nach-innen-Rücken der Fenster bewirkt, dass aufgedrehte Flügel noch weiter in den Raum ragen.



Abbildung 8-15: Fenster in Raum 124 mit geöffnetem Außenflügel



Abbildung 8-16: Fenster im Rohbauzustand: Links: von innen, Rechts: von außen

#### 8.5.2 Sonnenschutzlamellen

Die Tiefe des Fensterkastens hatte auch einschränkenden Einfluss auf die gewählte Lamellenbreite der Jalousien. Der Kritikpunkt durch die Nutzer ist, dass bei der geringen Lamellenbreite von 25 mm die Sicht nach draußen stark eingeschränkt ist. Insbesondere in den südorientierten Klassenräumen müssen die Jalousien aufgrund des Wärmeschutzes und der Blendung fast immer heruntergefahren werden. Es kam häufiger die Aussage, man fühle sich "eingesperrt". Jalousien mit breiteren Lamellen von ca. 50-60 mm hätten automatisch in horizontaler Stellung einen deutlich größeren Lamellenzwischenraum, durch den die Nutzer hindurchschauen könnten.

Die Lehrer gaben zudem in der Nutzerbefragung vom 29.09.2017 an, eine Montage der Lamellen genau andersherum sei logischer. Sollen die Lamellen zur Verdunkelung komplett geschlossen sein, so ist dies nur möglich, wenn die schwarze Absorberseite nach außen zeigt. Stellt man die silberne Reflektorseite nach außen, scheint noch Licht durch die Lamellen hindurch. Ist eine gute Verdunkelung gewünscht, wird demnach die "Absorbervariante" gewählt (die Problematik wird in Bericht 11 näher betrachtet). In den südorientierten Räumen besteht jedoch grundsätzlich kein Bedarf, über die Kastenfenster weitere Wärme zu absorbieren. Hier gibt es auch im Winter eher ein Wärmeüberangebot, siehe Bericht 5.

Nachdem es mehrfach zu Spannungsrissen in Fensterscheiben und Problemen mit der Motorsteuerung des Jalousieantriebs gekommen war, wurde seitens des Schulträgers die Anweisung gegeben, die Jalousien nur noch ganz hoch oder ganz runter zu fahren. Auf halbhoher Stellung sei die Temperaturdifferenz im Fensterkastenbereich zwischen oben und unten zu groß, was zu Problemen führe. Die vermutete Temperaturdifferenz konnte zunächst seitens des Monitorings nicht bestätigt werden (Kapitel 8.3) jedoch wurden keine Temperaturschichtungen in halbhoher Jalousiestellung untersucht.

Diese Anweisung schränkt die Nutzer stark in der Bedienung der Jalousien ein. Häufig besteht das Bedürfnis, die Jalousien nur anteilig herunterzufahren, um zwar Blendschutz zu gewährleisten, jedoch Tageslichtnutzung und Außenbezug im unteren Bereich beizubehalten. Aus Sicht des Monitorings sollten Jalousien in halbhoher Stellung ermöglicht werden, um die Nutzerzufriedenheit zu erhöhen. Da i. d. R. das Öffnen des äußeren (Sommer) bzw. inneren (Winter) Flügels vorgesehen ist, sollte es nicht zu temperaturbedingten Problemen z. B. durch Stauwärme kommen.

#### 8.5.3 Fensteröffnung und Fensterbänke

Im Zuge der Gruppendiskussionen vom 14.04.2015 berichteten die Schüler, dass man sich an den gedreht geöffneten Fensterflügeln leicht stoßen könne, da diese sehr breit sind und somit 1 Meter weit in den Raum ragen.

Die Fensterbänke werden durch die Nutzer fast überall zum Abstellen von Pflanzen und anderen Dingen genutzt. Dies führt dazu, dass die Stellung der Fensterflügel nicht ohne größeren Aufwand (Abräumen der Fensterbänke) verändert werden kann.

Die Nutzer argumentieren, dass die Fensterbank der beste Ort für die Pflanzen sei. Diese seien wiederum notwendig, da sie Feuchtigkeit an die eher trockene Raumluft abgeben.

Für eine (selten notwendige, aber dennoch gelegentlich durchgeführte) Stoßlüftung sollten jedoch mindestens ein bis zwei Flügel je Klassenraum freigehalten werden. Alternativ wäre zu empfehlen, künftig auf Innenfensterbänke zu verzichten und stattdessen unter dem Fenster (oder im Raum allgemein) Kleinmöbel vorzusehen, die so flach sind, dass sie sich zum Abstellen von Pflanzen oder z. B. Ordnern bis zu einer Höhe von DIN A 4 eignen.

#### 8.5.4 Südorientierte Klassenräume

Abbildung 8-17 zeigt die Südansicht des Klassenbereiches in den Sommerferien 2015. Es ist erkennbar, dass sich in manchen Klassenräumen die Jalousien korrekt in Sommerstellung befinden (silber außen). Jedoch wurde der Sonnenschutz in den meisten Räumen überhaupt nicht benutzt. Auch ist hier nicht erkennbar, dass sich äußere Fensterflügel in Kippstellung befinden, um Stauwärme im Fensterkastenbereich zu vermeiden. Nicht allen Nutzern scheint das Konzept der Kastenfenster bewusst zu sein. Möglicherweise unterschätzen sie ihre Einflussmöglichkeiten auf das Raumklima. Insofern ist es gut, dass der Hausmeister bei seinen Rundgängen die Einstellungen vornimmt.



Abbildung 8-17: Fensteransicht Klassentrakt im Juli 2015

Bei der Nutzerbefragung durch die Hochschule Magdeburg-Stendal am 29.09.2017 im südorientierten Klassenraum 1.08 gaben fast alle Schüler an, den Klassenraum als zu warm zu empfinden. Bei steigender Raumlufttemperatur wird der Raum auch als stickiger empfunden, obwohl die CO<sub>2</sub>-Messungen dies nicht bestätigen können.

Die Kastenfenster waren auf Anweisung des Schulträgers bereits im September aufgrund vorangegangener kühler Tage auf "Winterbetrieb" eingestellt, d. h. alle Innenflügel waren geöffnet, alle Außenflügel geschlossen. Zum Zeitpunkt des Gespräches betrug die Raumtemperatur 24,2 °C und wurde von den Anwesenden bereits als eher unbehaglich warm empfunden.

Der Anweisung des Schulträgers wird jedoch Folge geleistet, eine Rückkehr zur Sommereinstellung (innen zu / außen auf) wird nicht unternommen, obwohl das menschliche Empfinden dem widerspricht.

Zur Verbesserung der Situation sollte anstelle der dogmatischen Umstellung zwischen einer kalendarisch motivierten Sommer- und Winterbetrieb eine klare Handlungsanweisung formuliert werden, die auf dem Wärmeempfinden der Nutzer basiert.

Ist es im Raum zu warm, sollte unabhängig von der meteorologischen Jahreszeit die Erlaubnis bestehen, die Fenster zum Beispiel auch an einem sonnigen Wintertag auf Sommerstellung zu bringen. Für kühle Sommertage gilt dies umgekehrt ebenfalls.

Um den hohen Temperaturen in den südorientierten Klassenräumen entgegenzuwirken, hat es sich eingebürgert, dass die Klassenraumtüren so häufig wie möglich offengelassen werden, damit die Luft zirkuliert und die gefühlt frischere Luft aus den Fluren in die Klassenräume kommt. Auch in den Unterrichtsstunden bleiben die Türen offen. Die Reinigungskräfte schließen am Nachmittag die Türen. Der Hausmeister geht anschließend herum und öffnet alle Türen wieder, sodass auch nachts eine Zirkulation stattfindet.

## 8.6 Verallgemeinerung und Fazit

Die Empfehlung zur Nachahmung der Kastenfenster ist zwiegespalten. Die Kastenfenster werden durch die Größe der Fensterflügel und ihr hohes Gewicht nach Aussage der Nutzer (hier der Lehrer) ungern bedient. Dies bestätigt auch das Monitoring des Fensteröffnungsverhaltens, welches teilweise über mehrere Wochen keine Bedienung der Fenster registriert.

Positiv ist, dass aufgrund der vorhandenen maschinellen Lüftung eine häufige manuelle Bedienung der Fenster nicht zwingend notwendig ist. Grundsätzlich ist es zu begrüßen und in Folgeprojekten unbedingt zu empfehlen, dass das Öffnen der Fenster trotz der Passivhausbauweise ermöglicht wird. Dies trägt maßgeblich zur Nutzerzufriedenheit bei. Eine anderslautende Darstellung in der Lokalpresse, in der der Journalist zum Zeitpunkt des Einzuges über die Schule berichtete, man dürfe die Fenster nicht öffnen, führte zu vielen Nachfragen durch besorgte Eltern und zu langanhaltender Verunsicherung in der Lehrerschaft.

In Gebäuden ohne Lüftungstechnik wäre der gewählte Fensteraufbau hinsichtlich der Bedienerfreundlichkeit nicht nur aufgrund der Größe und des Gewichtes weniger zu empfehlen, sondern auch aufgrund der Notwendigkeit, stets Innen- und Außenflügel bedienen zu müssen.

Zwar sind großformatige Fenster bezüglich der Investitionskosten von Vorteil. Hinsichtlich der in der St. Franziskus-Grundschule vorhandenen Flügelbreite von ca. 1,25 m berichteten die Schüler jedoch, dass bei Stoßlüftungen die Gefahr besteht, dass sich die Nutzer an den in den Raum ragenden Flügeln stoßen.

In Folgeprojekten, deren Lüftungskonzept eine manuelle Fensterlüftung (auch anteilig) vorsieht, sollte es daher einen ausgewogenen Mix aus breiten und schmalen Öffnungsflügeln geben, die leicht bedienbar sind und nicht weit in den Raum schwenken. Dies verbessert auch die Möglichkeit, die Schule im Sommer auch durch natürliche Belüftung anstelle der mechanischen Belüftung mit Frischluft zu versorgen.

Nachteilig bei zusätzlichen Unterteilungen der Fensterflächen ist jedoch, dass sich durch die Zunahme des Randverbundes die Wärmebrückenverluste der Fenster erhöhen und durch einen höheren Rahmenanteil die transparente Fläche verkleinert.

Positiv ist, dass der Fensterkasten die Jalousie vor Wind und Vandalismus schützt. Jedoch schränkt er damit die Wahl und die Dimension des Sonnenschutzes entsprechend ein. Die Nutzer hätten sich Jalousien mit einer größeren Lamellenbreite gewünscht, da diese auch maßgeblich für die entstehenden Zwischenräume – und somit den Blick nach außen – in waagerechter Lamellenstellung ist. Dass dieser Außenbezug maßgeblich für die Nutzerzufriedenheit ist, zeigt sich auch in der Kritik, dass die Lamellen zur Vermeidung von thermischen Spannungen im Fenster nicht halbhoch gefahren werden dürfen. Grundsätzlich sollte der gewählte Sonnenschutz hier keine Einschränkungen zur Folge haben.

Die winterliche Wärmepufferung des Fensterkastens ist messtechnisch nachweisbar, insbesondere in den Südräumen, die allerdings während der Nutzeranwesenheit (und damit internen Wärmelasten) kaum Bedarf an weiteren äußeren Wärmelasten aufweisen.

Kritisch ist der Sommerfall: wird das äußere Fenster nicht rechtzeitig geöffnet, steigt die Temperatur im Kasten auf so hohe Werte (> 60 °C), dass die Fenstergriffe des äußeren Flügels nicht mehr gefahrlos angefasst werden können. Dieser Fall tritt auch an sehr sonnigen Wintertagen auf.

Hinsichtlich der Ausnutzung des Wintergarteneffektes (Winter) oder des Abführens von Stauwärme (Sommer) kann den Lehrern ein ständiges Öffnen und Schließen nach Wetterlage nicht zugemutet werden. Der Realbetrieb sieht daher so aus, dass der Hausmeister mit dem pauschalen Öffnen der Außenflügel im Frühjahr den Sommer einleitet – unabhängig vom wirklichen Bedarf. Im Herbst erfolgt die Einstellung auf den Winterfall. Die Nutzer sind hinsichtlich eigenmächtiger Veränderungen dieser Einstellungen verunsichert. Nicht alle haben das energetische Prinzip der Kastenfenster verstanden. Eine Automatisierung im Nachhinein wäre jedoch viel zu aufwändig.

Es ist zu beobachten, dass die Temperaturen im Kastenbereich der südorientierten Fenster (Raum 1.08) sehr viel höher als die Temperaturen der Fenster in Nordrichtung (Raum 2.01) sind. Der Wintergarteneffekt tritt im nordorientierten Bereich praktisch nicht auf, weshalb die Einstellungen für den Sommer- bzw. Winterfall hier kaum relevant sind.

Es gibt keine signifikanten Unterschiede der Temperaturen vom oberen zum unteren Teil des Fensters. Lediglich zwischen links und rechts gibt es kleinere Temperaturunterschiede innerhalb der Fenster. Als mögliche Ursachen sind dabei der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf das Fenster und eventuelle Verschattungen zu benennen.

## 9 PCM

Dieses Kapitel beschreibt zunächst das zum Einsatz gekommene PCM-Material sowie das Messkonzept in den Referenzräumen. Die Messergebnisse der Kinderzimmer geben Rückschlüsse auf den Effekt des PCM-Einsatzes.

## 9.1 Material- und Lagebeschreibung

Als Phase Change Material (PCM) kam das Fabrikat Alba balance der Firma Rigips zur Ausführung. Hierbei handelt es sich um 25 mm starke Vollgipsplatten mit eingelassenen Paraffinen. Die Wärmespeicherkapazität c<sub>wirk</sub> beträgt 83 Wh/m² entsprechend 300 kJ/m² [8].

Ziel ist es, durch die Aggregatzustandsänderung der Paraffine bei einem Schmelzpunkt von 23 °C thermische Energie aufzunehmen und Temperaturspitzen abzufangen (Peakshifting), bis der Prozess abgeschlossen ist. Da bei einem Temperaturabfall durch das Erstarren der Paraffine der Prozess umgekehrt wird, ergibt sich insgesamt eine Temperaturglättung.

Die PCM-Platten wurden im Kinderzimmer 2.27 vollflächig an der Decke (15  $\,\mathrm{m}^2$ ) und den Wänden (44,5  $\,\mathrm{m}^2$ ) als innere Beplankung verbaut. Die Wärmespeicherkapazität C<sub>wirk</sub> für den gesamten Raum beträgt demnach 59,5  $\,\mathrm{m}^2$  x 83 Wh/m²K = 4938,5 Wh/K.



Abbildung 9-1: Wandbeplankung im Türbereich des Kinderzimmers 2.27

In der Aula wurde die Beplankung an der Innenwand zum Flur 0.19 vorgenommen. Die Fläche beträgt ca. 70 m². Eine Beplankung der Decke war nicht möglich, da hier eine Lochdecke vorgesehen war.



Abbildung 9-2: Wandbeplankung an der Aulawand zum Flur/Treppenhaus

#### 9.2 Messorte und Messtechnik

Geplant war die Temperatur- und Feuchtemessung in der PCM-Beplankung (Wand und Decke) sowie die Erfassung der Raumtemperatur im jeweiligen Raum. Ausgewählt wurden zwei baugleiche Kinderzimmer in der Hausmeisterwohnung (2.27 mit und 2.26 ohne PCM). In der Decke beider Kinderzimmer sollte vor und hinter der Beplankung gemessen werden. Geplant waren redundante Messstellen mit 1 m Entfernung zueinander.

Die Messung wurde grundsätzlich umgesetzt, jedoch mit einer verminderten Zahl von Messfühlern: je Raum eine Raumtemperaturmessung (per Funkfühler) und eine Temperatur in der Konstruktion. Auch hier lag der Grund für die verminderte Ausstattung beim fehlenden Platz im dafür vorgesehenen Schaltkasten in der Hausmeisterwohnung (siehe Kapitel 8.2).

### Messkonzept:

- Ausstattung eines Kinderzimmers mit PCM-Beplankung in Wänden und Decke
- Referenzmessung im anderen Kinderzimmer ohne PCM
- in der Decke beider Kinderzimmer wird vor und hinter der Beplankung gemessen (Messpunkte für die Wände sind entfallen)
- Synchronisation der Messintervalle beider Kinderzimmer
- es werden Rückschlüsse auf den PCM-Effekt gezogen

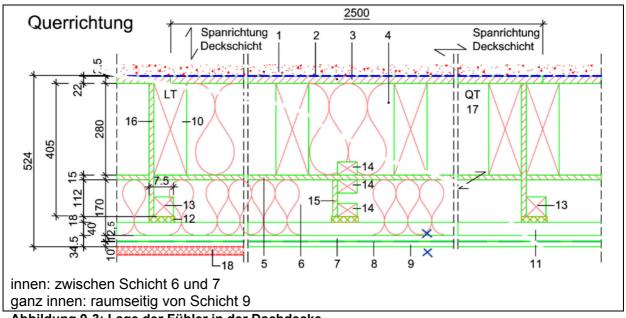


Abbildung 9-3: Lage der Fühler in der Dachdecke

Innerhalb der Konstruktion kamen Sensoren vom Typ LM 75 zum Einsatz (Messgenauigkeit ± 2 K), raumseitig unterhalb der Decke sind Funksensoren vom Typ enOcean verbaut (Messgenauigkeit ± 0,5 K bei 17 bis 27 °C, sonst ± 1 K). Anmerkung: die Messgenauigkeit ist deutlich zu ungenau für die Messaufgabe, jedoch wurden die Genauigkeitsklassen erst im Zusammenhang mit der Dokumentation des Gewerkes "Messtechnik" bekannt. In Folgeprojekten muss die Genauigkeitsklasse vorher festgelegt und ausgeschrieben werden.

Tabelle 9-1: Messpunkte bezüglich PCM in Raum 2.26 und 2.27

Kürzel	Ein-	Gruppe	Unter-	Beschreibung
	heit		gruppe	
DF0220-5727-0	°C	BAU	PCM	Temperatur_Decke_innen_Raum_227
DF0220-5796-0	°C	BAU	PCM	Temperatur_Decke_hinter_Gipskarton_Raum_226
DF0220-579E-0	°C	BAU	PCM	Temperatur_Decke_hinter_PCM_Raum_227
DF0220-57CA-0	°C	BAU	PCM	Temperatur_Decke_innen_Raum_226
DF0321-7002-0	°C	WET	WET	Außentemperatur
DF0384-7001-0	W/m²	WET	WET	Globalstrahlung_der_Wetterstation

Auf eine detaillierte Messung der PCM-Wand in der Aula wird verzichtet, da Referenzräume fehlen. Die Aula an sich wird hinsichtlich ihres Raumklimas erfasst. Eine Auswertung folgt in Bericht 5.

## 9.3 Ergebnisse Kinderzimmer der Hausmeisterwohnung

Verwertbare Messdaten lagen erst ab Juli 2016 vor, weshalb sich die Jahresübersicht in Abbildung 9-4 auf den Zeitraum vom 01.07.2016 bis 30.06.2017 im Tagesmittel bezieht.

Während die gestrichelten Kurven die Temperaturen in der Konstruktion darstellen, stehen die durchgezogenen Linien für die Temperaturen raumseitig der Zimmerdecke. Die Werte oberhalb der Beplankung liegen im gesamten Jahresverlauf unterhalb der Werte raumseitig der Beplankung. Sie sind den Temperaturschwankungen im Raum weniger ausgesetzt und liegen daher auch im Vergleich der beiden Räume sehr nah beieinander.

Maßgebliche Unterschiede sind hingegen bei den Deckentemperaturen innerhalb der Räume sichtbar. Im Jahresverlauf zeigt sich, dass im Kinderzimmer ohne PCM-Beplankung (2.26) stets eine höhere Raumlufttemperatur vorherrscht (im Mittel 23.65 °C) als im Kinderzimmer mit PCM (im Mittel 22,56 °C), siehe Tabelle 9-2. Die mittlere Temperaturdifferenz beider Räume beträgt 1,09 K.

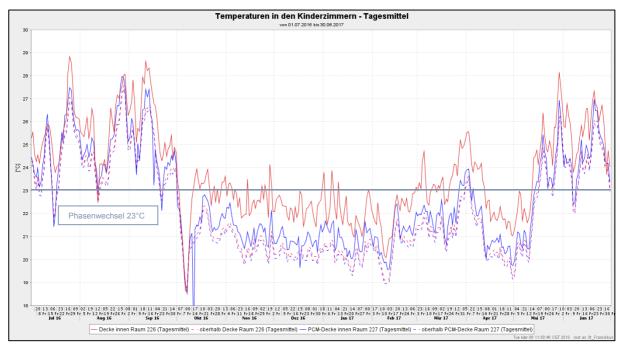


Abbildung 9-4: Deckentemperaturen in den Kinderzimmern, 01.07.2016 - 30.06.2017 - Tagesmittel

**Tabelle 9-2: Mittlere Temperaturen der Kinderzimmer** 

Temperatur	Raum 2.26 Referenzraum	Raum 2.27 PCM-Raum
Mittlere Innentemperatur	23,65 °C	22,56 °C
Differenz zwischen Decke innen (Raumtemperatur) und Decke oberhalb der Beplankung	1,50 K	0,57 K
Übertemperaturstunden > 23 °C [h]	57 %	39 %
Übertemperaturgradstunden [Kh]	(4980 h)	(3396 h)
Übertemperaturstunden > 26 °C [h]	1084 h	453 h
Übertemperaturgradstunden [Kh]	1041,9 Kh	513,5 Kh
Übertemperaturstunden > 27 °C [h]	412 h	210 h
Übertemperaturgradstunden [Kh]	369 Kh < 1200 Kh	191 Kh < 1200 Kh

Während die Phasenwechseltemperatur von 23 °C im Raum mit PCM-Decke an 3396 h des Jahres überschritten wird (39 %), ist dies im Referenzraum in 4980 h des Jahres der Fall (57 %).

Die Behaglichkeitsgrenze von 26 °C wird im Referenzraum mit 1084 h mehr als doppelt so oft überschritten wie im Raum mit PCM-Decke mit 453 h.

Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2:2013 Tabelle 9 werden in beiden Räumen bei weitem erfüllt. Die Übertemperaturgradstunden betragen hier in 412 Stunden mit i. M. 0,9 K = 369 Kh ohne PCM bzw. in 210 h mit i. M. 0,91 K = 191 Kh mit PCM. Der Anforderungswert von max. 1200 Kh wird eingehalten.

Bei der allgemeinen Plausibilitätsprüfung fällt jedoch auf, dass in der Zeit von Oktober 2016 bis April 2017 auch unterhalb der 23 °C-Grenze die Temperaturen im Kinderzimmer 2.27 mit PCM-Beplankung deutlich geringer sind als in Raum 2.26 ohne PCM (Abbildung 9-5).

Da insbesondere in Raum 2.26 (ohne PCM) die Phasenwechseltemperatur von 23 °C nicht erreicht wird, kann dieses Phänomen kaum durch die latente Wärmespeicherung erklärt werden, sondern es scheinen grundlegend unterschiedliche Voraussetzungen vorzuliegen.

Ein genauerer Blick auf die beiden Winter 2016/17 und 2017/18 bestätigt dies auch bei der Betrachtung der Stundenmittel: Raum 2.26 ohne PCM ist stets wärmer als Raum 2.27 mit PCM, auch unterhalb von 23 °C Raumtemperatur.

Eine mögliche Erklärung dieser Differenzen wäre, dass die Kinderzimmer unterschiedlich beheizt werden. Die Räume der Hausmeisterwohnung verfügen über raumweise regelbare elektrische Nachheizregister im Zuluftkanal, das Einstellen raumweiser Solltemperaturen ist also möglich.

Des Weiteren handelt es sich bei den Fühlern unterhalb der Decke um Funksensoren vom Typ enOcean, welche mit einer schlechten Messgenauigkeit von ± 0,5 bis 1 K angegeben sind. Diese Ungenauigkeit entspricht jedoch teilweise in etwa der Temperaturdifferenz zwischen den Räumen. Auffällig sind auch die starken Ausreißer, welche in Raum 2.26 nach oben und in Raum 2.27 nach unten ausschlagen, siehe Abbildung 9-5.

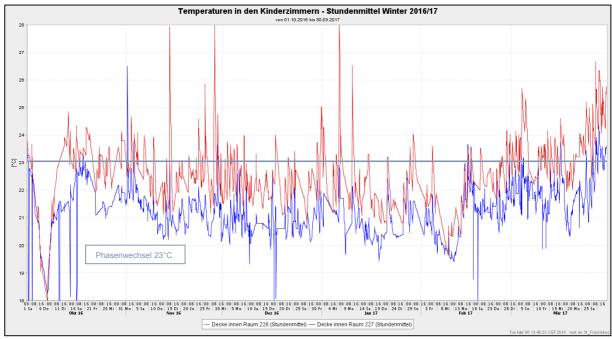


Abbildung 9-5: Temperaturen in den Kinderzimmern – Winter 2016/17 im Stundenmittel

Da das Phasenwechselmaterial insbesondere für den sommerlichen Wärmeschutz bestimmt ist, werden in der folgenden Auswertung die Messwerte der Sommermonate vom 01.07.2016 bis zum 31.08.2016 betrachtet (Abbildung 9-6).

Zunächst wird deutlich, dass die Mehrheit der Messwerte des Raumes 2.27 (mit PCM) unterhalb derer des Raumes 226 (ohne PCM) liegen. Jedoch tritt Mitte Juli auch häufiger der umgekehrte Fall auf. In dem ausgewerteten Zeitraum beträgt die durchschnittliche Temperatur im Kinderzimmer ohne PCM 25,62 °C und im Kinderzimmer mit PCM 24,98 °C. Daraus ergibt sich eine mittlere Temperaturdifferenz von 0,64 K.

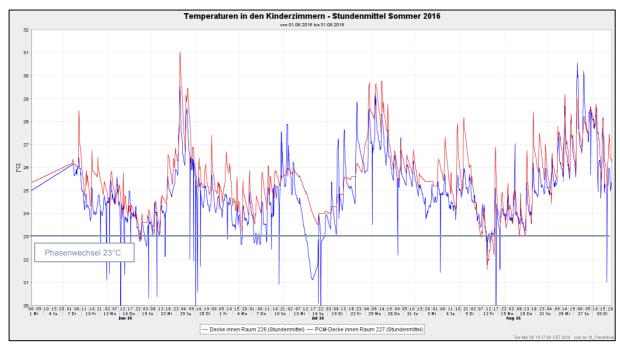


Abbildung 9-6: Temperaturen in den Kinderzimmern – Sommer 2016 im Stundenmittel

Als Beispielwoche wird im Folgenden der 04. bis 10. Juli 2016 näher untersucht. Die Abbildung 9-7 zeigt die Temperaturverläufe der Kinderzimmer raumseitig der Decke, weiterhin sind die Außenlufttemperatur und die Stundenmittel der Globalstrahlung eingeblendet.

Auffallend sind die grundlegend verschiedenen Verläufe der Kurven hinsichtlich ihrer Glätte. Während die Messwerte im Raum 2.26 ohne PCM (rot) meist zum frühen Nachmittag ihren Höhepunkt erreichen und dann äußerst gleichmäßig bis in die Morgenstunden abfallen, verläuft die blaue Kurve für Raum 2.27 mit PCM (blau) unruhiger.

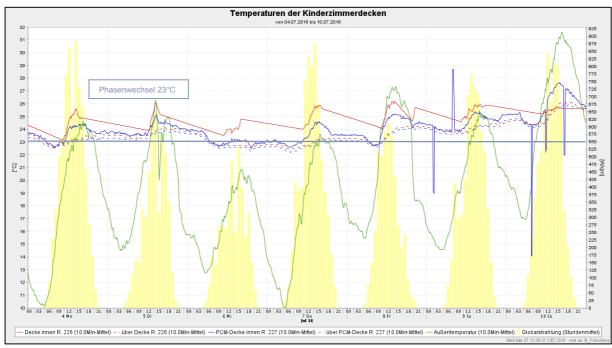


Abbildung 9-7: Temperaturen in den Kinderzimmern 04.07.-10.07.2016 – 10-Minuten-Mittel

Ein Verharren der PCM-Platte (blau), wahrscheinlich aufgrund des Phasenwechsels, ist besonders deutlich am Mittwoch zu sehen. Hier bleibt die Temperatur raumseitig der Decke über ca. 24 Stunden fast konstant bei 23 °C. Ähnliche Stagnationen sind in der Nacht von Montag zu Dienstag und von Donnerstag zu Freitag erkennbar.

Hier gibt es zunächst am Vorabend einen Temperaturabfall auf ca. 23,5 °C, gefolgt von einem fast 12-stündigen Verharren auf ebendiesem Wert. Gut erkennbar ist dann am Freitagmorgen der weitere Temperaturabfall nach Abschluss des Erstarrungsvorgangs.

Eine zeitliche Verschiebung der Temperaturspitze ist praktisch nicht erkennbar. Beide Räume erreichen ihre Höchsttemperatur nahezu zeitgleich. Mit dem Unterschied, dass die Spitze im Raum 2.27 mit PCM nahezu 1 K geringer ausfällt.

Auffällig ist, dass am Sonntag die Temperatur im Raum 2.27 mit PCM den Wert ohne PCM um fast 2 K übersteigt. An diesem Tag herrschte jedoch auch eine maximale Außentemperatur von 31,5 °C. Möglicherweise ist dieser Anstieg auf das Nutzerverhalten, z. B. ein geöffnetes Fenster oder eine geöffnete Jalousie zurückzuführen.

## 9.4 Probleme und Verbesserungsansätze

Leider wurde das Messkonzept nicht vollumfänglich umgesetzt und die eingeplanten redundanten Fühler nicht installiert, was – auch aufgrund der hohen Messungenauigkeit der Fühler – zu Einschränkungen bei der Auswertung führt.

Es wird dennoch davon ausgegangen, dass das eingebaute PCM-Material im Kinderzimmer 2.27 wirksam ist, da die gemessenen Raumtemperaturen meist unter denen des Referenzraumes lagen. Selbst wenn sich im Ergebnis nicht gezeigt hätte, dass der sommerliche Wärmeschutz dadurch verbessert wird, hätte dies aufgrund des baulichen Aufwandes keine Optimierungsmaßnahmen zur Folge.

## 9.5 Verallgemeinerung und Fazit

Die Messergebnisse haben für den Raum mit PCM-Decke im gesamten Jahresverlauf überwiegend geringere Raumtemperaturen gezeigt als im Referenzraum. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Platten im Bereich des Phasenübergangs über längere Zeit ihre Temperatur konstant gehalten haben und das Prinzip der latenten Wärmespeicherung grundsätzlich funktioniert.

Die sommerlichen Temperaturspitzen des Referenzraumes traten im PCM-Raum deutlich abgeschwächt auf, sie wurden erfolgreich abgefangen.

Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass der Einsatz von PCM-Materialien im geeigneten Einsatzbereich eine sinnvolle Maßnahme zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes darstellen.

Über die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme soll hier keine Aussage getroffen werden.

# 10 Anhang

#### 10.1 Literatur

- [1] U. Gebhardt, "Masterarbeit "Untersuchung der Wärmebrückenfreiheit einer Passivhausschule in Holzbauweise anhand der St. Franziskus-Grundschule Halle (Saale)"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.
- [2] J.-H. Ritter, "Untersuchung einer Flachdachkonstruktion im Hinblick auf den klimabedingten Feuchteschutz," Ritter Bauphysik, Potsdam, 2012.
- [3] Ingenieurbüro Naumann & Stahr, *Planungsunterlagen*, Leipzig, 2011.
- [4] Steinblock Architekten, "Katholische Grundschule "St. Franziskus" in Halle," Präsentation auf der Holzbaufachtagung am 09. November 2012 in Dessau, 2012.
- [5] J.-H. Ritter, "Untersuchung einer Fußbodenkonstruktion gegen Erdreich im Hinblick auf den klimabedingten Feuchteschutz," Ritter Bauphysik, Potsdam, 2012.
- [6] WUFI, WUFI Pro Ver. 5.2, Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.
- [7] R. Adriaans, R. Borsch-Laaks, C. Fülle, D. Kehl, H. Künzel, D. Zirkelbach, M. Mohrmann, O. Pankratz, U. Ruisinger, D. Schmidt, H. Schmidt, K. Schwaner, M. Teibinger, S. Winter und M. Zumoberhaus, "Konsens der Referenten des Kongresses "Holzschutz und Bauphysik" am 10./11.02.2011 in Leipzig zum Thema: "Unbelüftete Flachdächer in Holzbauweise"," Leipzig, 2011.
- [8] Rigips AG, "Infobroschüre Alba balance, Version 2.0 a," Rigips AG, 2017. [Online]. Available: http://ch.rigips.de/download/Alba\_balance\_dt.pdf. [Zugriff am 22 August 2017].
- [9] Steinblock Architekten, *Planungsunterlagen*, Magdeburg: Steinblock Architekten, 2013.
- [10] M. Münch, "Masterarbeit "Ökologische Bewertung einer Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.
- [11] Passivhaus Institut, Zertifikat "Passivhausgeeignete Komponente: Kastenfenster", Darmstadt: Passivhaus Institut, 2010.
- [12] Passivhaus Institut, Zertifikat "Passivhausgeeignete Komponente: Fensterrahmen", Darmstadt: Passivhaus Institut. 2011.
- [13] DIN EN ISO 6946, Bauteile, 2008.
- [14] Passivhaus Institut, Passivhaus Projektierungspaket 2007, Darmstadt: Passivhaus Institut, 2007.
- [15] K. Zilch, C. J. Diederichs, R. Katzenbach und K. J. Beckmann, Grundlagen des Bauingenieurwesens, K. Zilch, Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [16] P. Weingart, "Masterarbeit "Qualitätssicherung einer Passivhausschule in Holzbauweise mithilfe ingenieurtechnischer Messverfahren"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [17] ZUB-Systems GmbH, "ZUB Argos Pro 2014," Kassel, 2014.
- [18] DIN V 18599, Energetische Bewertung von Gebäuden, 2007.
- [19] DIN EN ISO 10211, Wärmebrücken im Hochbau Wärmeströme und Oberflächentemperaturen, 2007.
- [20] U. Gebhardt und K. Gebhardt, "Im grünen Bereich Wärmebrückenfreiheit einer Passivhausschule in Holzbauweise," *Gebäudeenergieberater*, Nr. 10-2015, 2015.
- [21] DÄMMWERK, DÄMMWERK, Berlin: KERN ingenieurkonzepte, 2018.
- [22] DIN 4108-3, Baulicher Wärmeschutz im Hochbau, Berlin: Beuth, 2001.
- [23] Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Online-Hilfe für WUFI-pro4.01, Stuttgart, 2006.

- [24] A. Albert und H. u. Bergner, "Bauphysik," in *Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen*, A. Goris, Hrsg., Köln, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, 2012, p. 10.37.
- [25] R. Keylwert, 1951. [Online]. Available: http://www.holzfragen.de/seiten/ausgleichsfeuchte.html. [Zugriff am 16 März 2017].
- [26] DIN 335-1, "DIN EN 335-1:2006 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten Definition der Gebrauchsklassen Teil 1: Allgemeines," DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2006.
- [27] Karlsruher Institut für Technologie, "MoniSoft," 2013.
- [28] C. Kriegenburg, "Auswertung Luftdichtheitsmessung und Leckage- und Wärmebrückenuntersuchung mittels Thermografie," Ingenieurbüro Kriegenburch, Magdeburg, 2014.
- [29] DIN EN 13829:2000, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2000.
- [30] Fachverband für Luftdichtheit im Bauwesen e.V., *Beiblatt zur DIN EN 13829*, Kassel: eps, Kassel, 2008.
- [31] The Energy Conversatory, *Tectite Express 4.1*.
- [32] DIN 4108-7, Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Berlin: Beuth, 2001.
- [33] Naumann und H. Stahr, "Entwicklung eines Passivhaus-tauglichen Konstruktionssystems für den Holzbau unter Verwendung ökologisch positiv bewerteter Bau- und Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen für den Büromehrgeschossigen Wohnungs-, und Gesellschaftsbau," Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Dezember 2001. [Online]. Available: https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-11965.pdf. [Zugriff am 19 Juni 2017].
- [34] DIN EN ISO 717-1, Akustik Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen Teil 1: Luftschalldämmung, 2006.
- [35] L. HFB Engineering GmbH, "www.naumannstahr.info," 17 Mai 2001. [Online]. Available: http://www.naumannstahr.info/kap\_nachweise.htm. [Zugriff am 26 Mai 2011].
- [36] DIN EN ISO 16283-1, "Akustik Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau Teil 1: Luftschalldämmung," CEN-CENELEC Management-Zentrum, Brüssel, 2014.
- [37] DIN EN ISO 16283-2, "Akustik Messung der Schalldämmung und von Bauteilen am Bau Teil 2: Trittschalldämmung," CEN-CENELEC Management-Zentrum, Brüssel, 2017.
- [38] DIN EN ISO 12354, "Bauakustik Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen," Beuth, Berlin, 2000.
- [39] D. Kleer, "Bachelorarbeit "Schallschutz und Raumakustik in einer Grundschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.
- [40] DIN EN ISO 717-2, "Akustik Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen Teil 2: Trittschalldämmung," Beuth, Berlin, 2013.
- [41] L. Haferung, "Masterarbeit "Untersuchungen zu Behaglichkeitskriterien, zur Raumluftqualität und zum Lüftungsverhalten in einer Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [42] Ingenieurbüro Naumann & Stahr, "www.naumannstahr.info," 04 Mai 2011. [Online]. Available: http://www.naumannstahr.info/. [Zugriff am 04 Mai 2011].
- [43] K. Bounin, W. Graf und P. Schulz, Schallschutz, Wärmeschutz, Feuchteschutz, Brandschutz, Regensburg: Friedrich Pustet KG, 2010.

- [44] M. Stahr, F. Hensen, H. Kolbmüller, J. Weber und U. Wild, Bausanierung Erkennen und Beheben von Bauschäden, Wiesbaden: Vieweg+Teubner |GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [45] BlowerDoor GmbH Messsysteme für Luftdichtheit, "Tectite Express 4.1," 2016.
- [46] P. K. Jagnow, "Thermografieaufnahmen St. Franziskus Grundschule in Halle (Saale)," Murmansker Straße 14, 06130 Halle (Saale), 2017.

#### 10.2 Nomenklatur

Tabelle 10-1: Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
Α	Fläche	m²
A <sub>abs</sub>	äquivalente Schallabsorptionsfläche	m²
A <sub>EB</sub>	Energiebezugsfläche	m²
A <sub>N</sub>	Nutzfläche nach Energieeinsparverordnung	m²
С	spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)
g	Energiedurchlassgrad (von Fenstern)	-
L'n	Norm-Trittschallpegel	dB
L <sub>korr</sub>	Korrekturpegel	dB
Ls	gemessener Schallpegel im Senderaum	dB
L <sub>sb</sub>	gemessener Empfangsraumpegel	dB
L <sub>b</sub>	gemessener Störpegel	dB
n, n <sub>50</sub>	Luftwechselrate	h <sup>-1</sup>
р	Druck	Pa
Q	Energiemenge	kWh/a
q	Energiemenge, flächenbezogen	kWh/(m²a)
Q	Wärmestrom, Leistung	W
R	Wärmedurchlasswiderstand	(m <sup>2</sup> K)/W
R'	Bauschalldämmmaß	dB
R <sub>W</sub>	bewertetes Schalldämmmaß	dB
S	Fläche des Trennbauteils	m²
Т	Nachhallzeit	S
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> K)
V	Volumen	m³

Tabelle 10-2: Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
Δ	Differenz	verschieden
θ	Temperatur	°C, K
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
ρ	Reflexionsfaktor	-
$\Psi_{a}$	außenmaßbezogener linearer Wärmebrückenver- lustkoeffizient	W/(mK)
$\Psi_{\rm i}$	innenmaßbezogener linearer Wärmebrückenverlust- koeffizient	W/(mK)

## Tabelle 10-3: Abkürzungen

Kürzel	Erläuterung
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
d	Tag
d. J.	des Jahres
DIN	Deutsches Institut für Normung; deutsche Norm
DIN V	Deutsches Institut für Normung; deutsche Vornorm
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG	Erdgeschoss
EN	Europäische Norm
EnBau	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen im Neubau
EnEV	Energieeinsparverordnung (Jahr 2009)
EnOB	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen
EnSan	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung
EWT	Erdwärmetauscher, Erdwärmeübertrager
ISO	International Standardisation Organisation; internationale Norm
k. A.	keine Angabe
OG	Obergeschoss
OSB	Oriented Strand Board
PCM	Phase change material
PE-HD	Polyethylen "high density" (hohe Dichte)
PHI	Passivhaus Institut Darmstadt
PP	Polypropylen
PV	Photovoltaik
SZR	Scheibenzwischenraum
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
T/F-Fühler	Temperatur- und Feuchte-Fühler

## 10.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1-1: Detail Außenwand [1]	8
Abbildung 1-2: Foto Südseite, Gebäudeteil B	8
Abbildung 1-3: Detail Dach	9
Abbildung 1-4: Grundaufbau schallentkoppelte Decke [3]	. 10
Abbildung 1-5: Montage der Bodenplatte [4]	. 10
Abbildung 1-6: Detail Bodenplatte	. 11
Abbildung 1-7: Links: Kastenfenster; Rechts: Pfosten-Riegel-Fassade Aula	. 11
Abbildung 1-8: Temperatur- und Feuchteverlauf der Bodenplatte im Gefach [6]	. 13
Abbildung 1-9: Temperatur- und Feuchteverlauf der holzverkleideten Außenwand im Gefach [6]	. 14
Abbildung 1-10: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach - Gefachanteil [6][6]	. 15
Abbildung 1-11: Links: Sommerfall, Rechts: Winterfall [3]	
Abbildung 1-12: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 108 linkes Fenster – April 2017	. 18
Abbildung 1-13: Deckentemperaturen in den Kinderzimmern, 01.07.16 - 30.06.17 - Tagesmittel	. 19
Abbildung 2-1: Detail Außenwand [1]	. 21
Abbildung 2-2: Außenwand im Bereich einer Fensterbrüstung [4][4]	. 22
Abbildung 2-3: Außenwand im Bereich des Fußpunktes [4]	. 22
Abbildung 2-4: Foto Südseite, Bauteil B	
Abbildung 2-5: Übergang Standardwand zu Brandwand [9]	
Abbildung 2-6: Anordnung der verschiedenen Außenwandtypen [10][10]	
Abbildung 2-7: Sockelbereiche mit bedruckten Eternitplatten	. 24
Abbildung 2-8: Detail Außenwand	. 25
Abbildung 2-9: Detail Brandwand	
Abbildung 2-10: Detail Verlängerung der Brandwand	. 26
Abbildung 2-11: Detail Solarwand	
Abbildung 2-12: Innenwand NT III [9]	. 27
Abbildung 2-13 - Innenwand NT II [9]	. 27

Abbildung 2-14 - Innenwand NT I [9]	27
Abbildung 2-15 - Innenwand T II [9]	27
Abbildung 2-16: Links: GK-Ständerwand 100 mm, Rechts: GK-Ständerwand 200 mm	28
Abbildung 2-17: Detail Dach	
Abbildung 2-18: Detail Dachfirst [9]	. 29
Abbildung 2-19: Grundaufbau schallentkoppelte Decke [3]	
Abbildung 2-20: Schallentkoppelte Decke [4]	
Abbildung 2-21: Grundaufbau Decke [3]	
Abbildung 2-22: Unterzug Flur-Klassenraum [9]	31
Abbildung 2-23: Unterzug Flurtrennwand mit Lüftungsdurchlass	
Abbildung 2-24: Bodenbeläge Erdgeschoss	
Abbildung 2-25: Legende Bodenbeläge	
Abbildung 2-26: Bodenbeläge 1. Obergeschoss	
Abbildung 2-27: Bodenbeläge 2. Obergeschoss	
Abbildung 2-28: Erdaushub für Erdwärmeübertrager [4]	
Abbildung 2-29: Gründung und Treppenhauskerne [4]	
Abbildung 2-30: Streifenfundamente [4]	
Abbildung 2-31: Montage der Bodenplatte [4]	36
Abbildung 2-32: Detail Bodenplatte	37
Abbildung 2-33: Detail Bodenplatte Stahlbeton	37
Abbildung 2-34: Fußpunkt Außenwand an Bodenplatte [9]	38
Abbildung 2-35: Anschluss Holzbau an Stahlbetontreppenhaus [9]	39
Abbildung 2-36: Fundamentanschluss Einzelstütze [9]	39
Abbildung 2-37: Zertifikat Kastenfenster [11]	
Abbildung 2-38: Zertifikat Fensterrahmen [12]	
Abbildung 2-39: Links: Fensteröffnung im Rohbauzustand, Rechts: Lieferung	
Abbildung 2-40: Äußerer Fensteranschluss	
Abbildung 2-41: Pfosten-Riegel-Fassade Aula	
Abbildung 2-42: Außentür Aula	
Abbildung 2-43: Treppenhäuser [9]	
Abbildung 2-44: Links: Treppenhaus West, Rechts: Haupttreppe im Flur Nord	
Abbildung 3-1: Schnitt Außenwand mit U-Wert-Teilbereichen	
Abbildung 3-2: Ansicht Außenwand mit U-Wert-Teilbereichen	
Abbildung 3-3: Screenshot Berechnung der Außenwand mit zwölf Teilbereichen	
Abbildung 3-4: Screenshot Berechnung der Außenwand mit drei Teilbereichen [14]	
Abbildung 3-5: Links: Raumseitige Sensoren in der Außenwand. Rechts: Sensoren in Hinterlüftung	
Fassade	
Abbildung 3-6: Lage der Messfühler in der Bodenplatte Raum 0.04	
Abbildung 3-7: Temperaturverlauf der Holzbodenplatte	
Abbildung 3-8: Temperaturverlauf der Bodenplatte im Juli 2017	
Abbildung 3-9: Temperaturverlauf der Bodenplatte im Januar bis März 2016	
Abbildung 3-10: Temperaturverlauf der Bodenplatte im Jahr 2016	
Abbildung 3-11: Lage der Messfühler in der Außenwand Nord Raum 2.01	56
Abbildung 3-12: Temperaturverlauf der Außenwand am 17.01.2016 um 23:00 Uhr	57
Abbildung 3-13: Temperaturverlauf der Außenwand vom 07.08. bis 15.08.2016	58
Abbildung 3-14: Temperaturverlauf der Außenwand im Januar 2016 (Stundenmittel) [16]	58
Abbildung 3-15: Temperaturverlauf der Außenwand im Oktober 2016 (Stundenmittel) [16]	
Abbildung 3-16: Lage der Messfühler im Dach Raum 2.01	
Abbildung 3-17: Temperaturverlauf des Daches 1 am 17.01.2016	
Abbildung 3-18: Plausibilitätsprüfung der Fühlerpositionen in Dach 1 und 2	
Abbildung 3-19: Temperaturverlauf im Dach 1 im Jahr 2016 (Tagesmittel)	
Abbildung 3-20: Temperaturverlauf im Dach 1 vom 07.08. bis 14.08.2016 (10-Min-Mittel)	
Abbildung 3-21: Temperaturverlauf im Dach 1 vom 14.01.2016 bis 21.01.2016 (10-Min-Mittel)	
Abbildung 4-1: Markieren der geschlossenen Dämmschicht [1]	
Abbildung 4-2: Grundriss Erdgeschoss – Wärmebrücken [1]	
Abbildung 4-3: Grundriss 1. Obergeschoss – Wärmebrücken [1]	09
Abbildung 4-4: Grundriss 2. Obergeschoss – Wärmebrücken [1]	
Abbildung 4-5: Schnitt 1-1 – Wärmebrücken [1]	
Abbildung 4-6: Schnitt 2-2 – Wärmebrücken [1]	
Abbildung 4-7: Wärmebrückenberechnung Anschluss Außenwand – Verlängerung Brandwand	
Abbildung 4-8: Wärmebrückenberechnung Anschluss Bodenplatte - Außenwand	
Abbildung 4-9: Wärmebrückenberechnung Anschluss Dach – Außenwand (First, hohe Attika)	76

Abbildung 4-10: Wärmebrückenberechnung Anschluss Kastenfenster – Außenwand (seitlich	ch)77
Abbildung 4-11: Wärmebrückenberechnung Anschluss Pfosten-Riegel-Fassade –	
(Eingang) unten	
Abbildung 4-12: Modellbildung Erdreich - Auswirkungen auf den Ψ-Wert	80
Abbildung 5-1: Bauteilquerschnitt Bodenplatte [21]	85
Abbildung 5-2: Bodenplatte Gefach - Eingaben in DÄMMWERK [21]	85
Abbildung 5-3: Bodenplatte Rahmen - Eingaben in DÄMMWERK [21]	86
Abbildung 5-4: Glaserdiagramm Bodenplatte – Gefach [21]	
Abbildung 5-5: Glaserdiagramm Bodenplatte – Rahmen [21]	
Abbildung 5-6: Gesamtwassergehalt der Holzbodenplatte – Gefach [6]	
Abbildung 5-7: Temperatur- und Feuchteverlauf der Bodenplatte im Gefach [6]	
Abbildung 5-8: Wassergehalte der einzelnen Schichten in der Bodenplatte - Gefach [6]	
Abbildung 5-9: Wassergehalt der Zellulosedämmung in der Bodenplatte [6]	
Abbildung 5-10: Wassergehalt der unteren OSB-Lage in der Bodenplatte [6]	
Abbildung 5-11: Gesamtwassergehalt der Holzbodenplatte – Rahmen [6]	
Abbildung 5-12: Temperatur- und Feuchteverlauf der Bodenplatte im Rahmen [6]	
Abbildung 5-13: Wassergehalte der einzelnen Schichten in der Bodenplatte - Rahmen [6] .	
Abbildung 5-14: Wassergehalt der OSB-Lage oberhalb der Träger	
Abbildung 5-15: Wassergehalt der Träger in der Bodenplatte [6]	
Abbildung 5-16: Wassergehalt der OSB-Lage unterhalb der Träger	
Abbildung 5-17: Feuchteverlauf der Bodenplatte im Jahr 2016	
Abbildung 5-18: Feuchteverlauf der Bodenplatte im Januar bis Juli 2017	
Abbildung 5-19: Bauteilquerschnitt Außenwand [21]	
Abbildung 5-20: Außenwand Gefach - Eingaben in DÄMMWERK [21]	
Abbildung 5-21: Außenwand Gefach - Eingaben in DÄMMWERK [21]	
Abbildung 5-22: Glaserdiagramm Außenwand Standard – Gefach [21]	
Abbildung 5-23: Glaserdiagramm Außenwand Standard – Rahmen [21]	
Abbildung 5-24: Gesamtwassergehalt der Außenwand mit Holzbekleidung – Gefach [6]	
Abbildung 5-25: Temperatur- und Feuchteverlauf der Außenwand mit Holzbekleidung im G	
Abbildung 5-26: Wassergehalt der Holzfaserplatte in der Außenwand [6]	99
Abbildung 5-27: Wassergehalt der inneren OSB-Wandaussteifung hinter der Installationse	
Außenwand [6]	
Abbildung 5-28: Wassergehalte der einzelnen Schichten in der Außenwand - Gefach [6]	
Abbildung 5-29: Gesamtwassergehalt der Außenwand mit Holzbekleidung – Rahmen [6]	
Abbildung 5-30: Temperatur- und Feuchteverlauf der Außenwand mit Holzbekleidung im	
	-
Abbildung 5-31: Wassergehalte der einzelnen Schichten in der Außenwand - Rahmen [6] .	
Abbildung 5-32: Temperatur- und Feuchteverlauf AW Nord – Wand 1 und 2 - im Jahr 2016 (	
	102
Abbildung 5-33: gemessener Temperatur- und Feuchteverlauf Außenwand Nord	103
Abbildung 5-34: Außenwand Gefach ohne Dampfbremse - Eingaben in DÄMMWERK [21]	
Abbildung 5-35: Außenwand Rahmen ohne Dampfbremse - Eingaben in DÄMMWERK [21	
Abbildung 5-36: Glaserdiagramm Außenwand Standard ohne Dampfbremse – Gefach [21]	
Abbildung 5-37: Glaserdiagramm Außenwand Standard ohne Dampfbremse – Rahmen [2	
Abbildung 5-38: Bauteilquerschnitt Dach, mit pro clima Intello [21]	
Abbildung 5-39: Dach Gefach - Eingaben in DÄMMWERK [21]	
Abbildung 5-40: Dach Rahmen - Eingaben in DÄMMWERK [21]	
Abbildung 5-41: Glaserdiagramm Dach – Gefach [21]	108
Abbildung 5-42: Darstellung der Tauwasserbildung im Gefach [21]	
Abbildung 5-43: Glaserdiagramm Dach – Rahmen [21]	109
Abbildung 5-44: Darstellung der Tauwasserbildung im Rahmen [21]	
Abbildung 5-45: Gesamtwassergehalt des Daches – Gefachanteil [6]	
Abbildung 5-46: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach - Gefachanteil [6]	110
Abbildung 5-47: Wassergehalte der einzelnen Schichten des Daches - Gefach [6]	
Abbildung 5-48: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach [6]	
Abbildung 5-49: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach bis 2034 [6]	
Abbildung 5-50: Wassergehalt der oberen Zellulosedämmung im Dach [6]	
Abbildung 5-51: Gesamtwassergehalt des Daches – Gefachanteil ohne Dampfbremse [6].	
Abbildung 5-52: Wassergehalte der einzelnen Schichten des Daches ohne Dampfbremse	
Abbildung 5-53: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach ohne Dampfbremse [6]	
Abbildung 5-54: Gesamtwassergehalt des Daches – Rahmenanteil [6]	115

Abbildung 5-55: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach - Rahmenanteil [6]	
Abbildung 5-56: Wassergehalte der einzelnen Schichten des Daches - Rahmen [6]	
Abbildung 5-57: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach - Rahmenanteil [6]	
Abbildung 5-58: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach – Rahmenanteil bis 2034 [6]	117
Abbildung 5-59: Wassergehalt im Trägerbereich im Dach - Rahmenanteil [6]	
Abbildung 5-60: Gesamtwassergehalt des Daches – Rahmenanteil ohne Dampfbremse [6]	118
Abbildung 5-61: Wassergehalt der oberen OSB-Lage im Dach - Rahmenanteil ohne Dampfbremse	e [6]
	118
Abbildung 5-62: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach im Jahr 2016 (Tagesmittel)	119
Abbildung 5-63: Feuchteverlauf im Dach 1 vom 01.01.2015 bis 31.01.2018 (Tagesmittel)	120
Abbildung 5-64: Feuchteverlauf im Dach 2 vom 01.01.2015 bis 31.01.2018 (Tagesmittel)	
Abbildung 6-1: Detail luftdichte Ebene Bodenplatte und Außenwandanschluss [16]	123
Abbildung 6-2: Anschluss Außenecke / Innenecke [16]	124
Abbildung 6-3: Anschluss Außenwand / Sockel [16]	
Abbildung 6-4: Links: Präparation der Fortluftöffnungen des Gebäudeteils A [16]	126
Abbildung 6-5: Präparation Erdwärmeübertrager – Links: Zuluft, Rechts: Kondensatablauf [16]	126
Abbildung 6-6: Präparation der Bodeneinläufe in der Küche	127
Abbildung 6-7: Aufbau BlowerDoor [16]	127
Abbildung 6-8: Leckagekurve Unter- und Überdruck 06.01.2017 [16]	128
Abbildung 6-9: Ergebnisse Differenzdruckmessreihe [31]	129
Abbildung 6-10: Eingangstür Treppenhaus, 06.01.2017 [16]	130
Abbildung 6-11: Eingangstür Hof am 06.01.2017 [16]	130
Abbildung 6-12: Haupteingangstür am 06.01.2017 [16]	131
Abbildung 6-13: Eingangstür Mitarbeiter Küche [16]	131
Abbildung 6-14: Eingangstür zur Aula am 28.01.2014 [28]	132
Abbildung 6-15: Eingangstür zur Aula am 06.01.2017 [16]	132
Abbildung 6-16: Jalousieanschlüsse, 06.01.2017 [16]	
Abbildung 6-17: Übergang 2. OG Gebäudeteil A zu Gebäudeteil B, 06.01.2017 [16]	133
Abbildung 6-18: Südfenster Kunstraum mit getauschter Verglasung im linken Innenflügel	
Abbildung 6-19: Undichtigkeit an Steckdose	134
Abbildung 6-20: Kabeldurchdringung Raum 203 am 28.01.2014 [28]	134
Abbildung 6-21: Kabeldurchdringung Raum 203 am 06.01.2017 [16]	
Abbildung 7-1: Links: Wandaufbau; Rechts: Grundriss Trennwand Raum 201/202 [9]	138
Abbildung 7-2: Schallentkoppelte Trennwand	
Abbildung 7-3: Schnittansicht Decke über Raum 101 [9]	139
Abbildung 7-4: Untersicht der schallentkoppelten Decke im Rohbau	140
Abbildung 7-5: Deckenbekleidung im Raum der Stille	
Abbildung 7-6: Bezugskurve für Luftschall in Terzbändern [34, p. 7]	
Abbildung 7-7: Schalldämmmaß Wand Raum 2.01/2.02 (verschobene Bezugskurve) [39]	
Abbildung 7-8: Schalldämmmaß der Decke über Raum 1.01 (verschobene Bezugskurve) [39]	145
Abbildung 7-9: Bezugskurve für Trittschall in Terzbändern [40, p. 7]	146
Abbildung 7-10: Trittschalldämmmaß der Decke über Raum 1.01 (verschobene Bezugskurve) [39]	
Abbildung 7-11: Schalldämmmaß der Decke über dem Raum der Stille (verschobene Bezugskurve)	[39]
Abbildung 8-1: Links: Sommerfall, Rechts: Winterfall [3]	151
Abbildung 8-2: Links: Blick in Fensterkasten mit hochgefahrener Jalousie, Rechts: Durchblick	
heruntergefahrener Jalousie	
Abbildung 8-3: Links: Absorberseite außen, Rechts: Absorberseite innen	
Abbildung 8-4: Lage der Messpunkte im Kastenfenster	153
Abbildung 8-5: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – Jahr 2017	
Abbildung 8-6: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – April 2017	
Abbildung 8-7: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – Juni 2017	
Abbildung 8-8: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – Oktober 2017	
Abbildung 8-9: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 1.08 linkes Fenster – Januar 2018	
Abbildung 8-10: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster – Jahr 2016	
Abbildung 8-11: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster – April 2016	
Abbildung 8-12: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster – Juni 2016	
Abbildung 8-13: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster – Oktober 2016	
Abbildung 8-14: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 201 linkes Fenster – Februar 2016	
Abbildung 8-15: Fenster in Raum 124 mit geöffnetem Außenflügel	
Abbildung 8-16: Fenster im Rohbauzustand: Links: von innen, Rechts: von außen	
Abbildung 8-17: Fensteransicht Klassentrakt im Juli 2015	165

Abbildung 9-1: Wandbeplankung im Türbereich des Kinderzimmers 2.27 1	169
Abbildung 9-2: Wandbeplankung an der Aulawand zum Flur/Treppenhaus1	170
Abbildung 9-3: Lage der Fühler in der Dachdecke1	
. Abbildung 9-4: Deckentemperaturen in den Kinderzimmern, 01.07.2016 - 30.06.2017 - Tagesmittel	172
Abbildung 9-5: Temperaturen in den Kinderzimmern – Winter 2016/17 im Stundenmittel	
Abbildung 9-6: Temperaturen in den Kinderzimmern – Sommer 2016 im Stundenmittel	
Abbildung 9-7: Temperaturen in den Kinderzimmern 04.0710.07.2016 – 10-Minuten-Mittel	
Abbildung 10-1: Holzfeuchtegleichgewicht nach Keylwert [25]	
Abblidding 10-1. Holzieddinegieldigewicht nach Neylwert [25]	100
Tabelle 1-1: Übersicht der Wärmedurchgangskoeffizienten	12
Tabelle 2-1: Innenwandtypen	
Tabelle 2-2: Träger des Daches	
Tabelle 2-3: Technische Daten der Kastenfenster	
Tabelle 2-4: Technische Daten der Pfosten-Riegel-Fassade	
Tabelle 2-5: U-Werte der Außentüren	
Tabelle 3-1: Übersicht der Wärmedurchgangskoeffizienten	
Tabelle 3-2: Teilbereiche der Außenwand mit Anteilen und 1/R-Werten der Teilfläche	
Tabelle 3-3: Messpunkte in der Bodenplatte Raum 004	. 51
Tabelle 3-4: Berechnung des Temperaturverlaufs in der Bodenplatte (Gefach)	. 52
Tabelle 3-5: Messpunkte in der Nordwand Raum 2.01	
Tabelle 3-6: Berechnung des Temperaturverlaufs in der Außenwand (Gefach)	
Tabelle 3-7: Messpunkte im Dach Raum 2.01	
Tabelle 3-8: Berechnung des Temperaturverlaufs im Dach 1 (Gefach)	61
Tabelle 4-1: Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen der Planungsphase [1]	.72
Tabelle 4-2: Ergebnisse –Wertberechnung [1]	
Tabelle 4-3: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse (Ψ-Wert) [20]	
Tabelle 4-4: Auswirkungen unterschiedlicher Wärmebrückenzuschläge auf den Endenergiebedarf na	
EnEV	
Tabelle 4-5: Zeitaufwand der Berechnung einer Wärmebrücke	
Tabelle 5-1: Auswertung der Holzfeuchte der Bodenplatte [16] [25]	
Tabelle 5-2: Jahresmittelwerte und resultierende Holzfeuchte der Außenwand Nord [27] [16]	
Tabelle 5-3: Jahresmittelwerte und resultierende Holzfeuchte des Daches [27] [16]	
Tabelle 6-1: Maßnahmen zur Gebäudepräparation [16]	
Tabelle 6-2: Vergleich wichtiger Parameter der BlowerDoor Erst- und Zweitmessung [28] [16] 1	
Tabelle 7-1: Messwerte der Wand zwischen Raum 2.01 und 2.02 [39]	1/2
Tabelle 7-1: Messwerte der Warid zwischer Raum 2.01 und 2.02 [39]	han
Raum 2.01 und 2.02 [39]	
Tabelle 7-3: Messwerte der Decke über Raum 1.01 [39]	
Tabelle 7-3. Messwerte der Decke über Raum 1.01 [39]	144
Raum 1.01 und 2.01 [39]	
Tabelle 7-5: Messwerte der Decke über Raum 1.01 [39]	145
Tabelle 7-6: Ermittlung der Einzahlangabe für den bewerteten Norm-Trittschallpegels der Decke ü	ber
Raum 1.01 [39]	
Tabelle 7-7: Messwerte der Decke über dem Raum der Stille [39]	147
Tabelle 7-8: Ermittlung der Einzahlangabe für das bewertete Bauschalldämmmaß der Decke über d	em
Raum der Stille [39]1	148
Tabelle 8-1: Messpunkte in den Kastenfenstern	
Tabelle 9-1: Messpunkte bezüglich PCM in Raum 2.26 und 2.271	
Tabelle 9-2: Mittlere Temperaturen der Kinderzimmer1	
Tabelle 10-1: Lateinische Formelzeichen1	179
Tabelle 10-2: Griechische Formelzeichen1	179
Tabelle 10-3: Abkürzungen 1	180
Tabelle 10-4: Planer, Ausführende, Projektbeteiligte1	185

## 10.4 Tabelle zu Bestimmung des Holzfeuchtegleichgewichtes

Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt in folgender Tabelle nach *Keylwert* etwa 65 % bei einer Temperatur von 20 °C und einer Holzfeuchte von 12 %. Dabei soll dieser Wert über einen längeren Zeitraum möglichst nicht überschritten werden, stellt aber kein Maximum dar.

bei einer relativen Luftfeuchte in %:	Wert für	die jewe	eilige Ho	lzausgle	eichsfeu	chte (Ma	asse%):
90 %	21,1	21,0	21,0	20,8	20,0	19,8	19,3
85 %	18,1	18,0	18,0	17,9	17,5	17,1	16,9
80 %	16,2	16,0	16,0	15,8	15,5	15,1	14,9
75 %	14,7	14,5	14,3	14,0	13,9	13,5	13,2
70 %	13,2	13,1	13,0	12,8	12,4	12,1	11,8
65 %	12,0	12,0	11,8	11,5	11,2	11,0	10,7
60 %	11,0	10,9	10,8	10,5	10,3	10,0	9,7
55 %	10,1	10,0	9,9	9,7	9,4	9,1	8,8
50 %	9,4	9,2	9,0	8,9	8,6	8,4	8,0
45 %	8,6	8,4	8,3	8,1	7,9	7,5	7,1
40 %	7,8	7,7	7,5	7,3	7,0	6,6	6,3
35 %	7,0	6,9	6,7	6,4	6,2	5,8	5,5
30 %	6,2	6,1	5,9	5,6	5,3	5,0	4,7
25 %	5,4	5,3	5,0	4,8	4,5	4,2	3,8
und einer Temperatur in °C:	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°

Abbildung 10-1: Holzfeuchtegleichgewicht nach Keylwert [25]

## 10.5 Verantwortliche Planer und Ausführende

Tabelle 10-4: Planer, Ausführende, Projektbeteiligte

Kurz	ausführliche Angabe	Gewerk/Verantwortlichkeit
HOLLENBACH	Sachverständigenbüro	Projektsteuerer
	Herr Hollenbach	
	Karlstraße 14	
	39261 Zerbst	
STEINBLOCK	Steinblock Architekten GmbH	Architektur
	Herr Tietze	
	Porsestraße 19	
	39104 Magdeburg	
GEDES	Gedes e.V.	Messtechnik,
	Herr Döring	Ausführung
	Promenadenring 8	
	02708 Löbau	
LUBOSCH	IngBüro Lubosch	Brandschutz
	Harsdorferstr. 31 A	
	39110 Magdeburg	
LUS	LUS GmbH	Baugrund
	Sandtorstraße 23	
	39106 Magdeburg	
KLEIN	Baugrundbüro Klein	Baugrund/Versickerung
	Hummelweg 3	
	06120 Halle/ Saale	
	Herr Neumann	

Kurz	ausführliche Angabe	Gewerk/Verantwortlichkeit
BACHMANN	Dr. Bachmann	Akustik
	Hohenwarther Str. 15	
	39126 Magdeburg	
RITTER	Bauphysik Ritter	Bauphysik
	Herr Illgner	
	David-Gilly-Str. 1	
	14469 Potsdam	
KRIEGENBURG	Ingenieurbüro Kriegenburg	Luftdichtigkeit
	Breite Str. 24	
	39114 Magdeburg	
IPROPLAN	Iproplan Planungsgesellschaft mbH	Zimmerer/Einblasdämmung und
	Bernhardstr. 68	Statik,
	09126 Chemnitz	Bauleitung
	Herr Stiller	
HENNING	Henning GmbH	Rohbau,
	Herr Ellendt	Ausführung
	Rasenweg 1 a	
	99765 Urbach	
DAFA	DAFA Bau	Zimmerer,
	Herr Pilarski	Ausführung
	Merseburger Str. 189	
	04179 Leipzig	
PFENNIG	Pfennig Bau GmbH & Co KG	Einblasdämmung,
	Herr Pfennig	Ausführung
	Bahnhofstraße 29	
	04758 Oschatz	
GLASBAU	Holz-Glasbaugesellschaft mbH	Fenster und Außentüren,
	Herr Engelage, Herr Hoffrogge	Ausführung
	Seumestraße 124	
	04249 Leipzig	
HOLL	Holl Flachdachbau GmbH & Co KG	Dachabdichtung,
	Herr Schröder	Ausführung
	Schmiedstraße 18	
	06112 Halle	
KURCH	Kurch Bedachungs GmbH	Fassade.
NUNUN	Herr Fischer	Ausführung
	Damaschkeweg 24	Austuriung
	06366 Köthen	
	OOOOO KOUIEII	
SPOMA	Spoma Parkett und Ausbau GmbH	Trockenbau/PCM,
	Frau Sporkenbach, Herr Conrad	Ausführung
	Saalestr. 43/44	
	39126 Magdeburg	

# 10.6 Überblick über separate Anhänge

- A B Technische Daten der Baustoffe
- Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten
- С Detaillierter Wärmebrückennachweis
- D Feuchteschutzberechnungen – stationär und instationär
- Ε Protokolle der Gebäudedichtheitsmessungen