

# MASTERARBEIT

## **EIN BEITRAG ZUM HYGROTHERMISCHEN VERHALTEN VON BRETTSPERRHOLZ-KONSTRUKTIONSDetails**

Haimo Stramitzer 0711025

Vorgelegt am Institut für Hochbau

bei

Herrn Dipl. Ing. Heinz Ferk

am

12.03.2013



## Inhalt

<b>0</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>9</b>
0.1	Ausschlaggebendes Projekt.....	9
0.2	Motivation .....	10
0.3	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	11
0.4	Vorgehensweise .....	12
<b>1</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>13</b>
1.1	Brettsperrholz.....	13
1.1.1	Ausgangsprodukte und Herstellung.....	13
1.1.1.1	Brett bzw. keilgezinkte Brettlamelle.....	14
1.1.1.2	Klebstoffe.....	16
1.1.2	Materialspezifische Eigenschaften und technische Kenndaten.....	17
1.2	Bauphysik allgemein .....	18
1.2.1	Luftdurchlässigkeit .....	18
1.2.1.1	Näherungsweise Berechnung der max. zul. Luftdurchlässigkeit .....	20
1.2.2	Wärmeschutz .....	21
1.2.2.1	Winterlicher Wärmeschutz .....	21
1.2.2.2	Sommerlicher Wärmeschutz .....	22
1.2.3	Feuchteschutz.....	25
1.3	Bauphysik spezifisch.....	27
1.3.1	Das Element Wasser .....	27
1.3.2	Feuchtetransport durch Konvektion.....	28
1.3.2.1	Dichte und Gewicht von Luft in Abhängigkeit des Luftdrucks.....	28
1.3.2.2	Druckverteilung an der Gebäudefassade infolge Wind .....	31
1.3.2.3	Luftdruckdifferenz durch thermischen Auftrieb im Gebäude .....	33
1.3.3	Feuchtetransport durch Diffusion.....	34
<b>2</b>	<b>PLANUNG</b>	<b>36</b>
2.1	Detailplanung.....	36
<b>3</b>	<b>VERSUCHSAUFBAU</b>	<b>37</b>
3.1	Versuchsmodellplanung.....	37
3.2	Fertigung.....	41
3.3	Einbau .....	51
<b>4</b>	<b>MESSUNG</b>	<b>58</b>
4.1	Messpunkte.....	58
4.2	Messverfahren .....	62
4.2.1	Feuchtemessverfahren.....	62
4.2.2	Temperaturmessverfahren .....	63
<b>5</b>	<b>BERECHNUNG</b>	<b>65</b>
5.1	WUFI 2D-3.....	65
5.1.1	Geometry.....	65
5.1.2	Grid.....	66
5.1.3	Materials .....	67
5.1.4	Initial Conditions.....	67
5.1.5	Surface/Climate .....	67

5.1.6	Computational Parameters.....	68
5.2	Therm .....	69
<b>6</b>	<b>AUSWERTUNG</b>	<b>70</b>
6.1	Aklimatisation.....	70
6.2	Differenzdruckklimakammer .....	72
6.2.1	Differenzdruckklimakammerausfall.....	74
6.2.2	Analyse und Vergleich Wandplatten.....	75
6.2.3	Analyse Deckenplatte .....	80
6.2.4	Analyse Messpunkte .....	82
6.2.4.1	Messpunkt 13.....	82
6.2.4.2	Messpunkt 20.....	84
6.2.4.3	Messpunkt 3 .....	86
6.2.4.4	Messpunkt 24.....	88
6.3	Berechnungsergebnisse aus Therm 5.2.....	90
<b>7</b>	<b>DETAILBERECHNUNGEN</b>	<b>92</b>
7.1	Allgemeines .....	92
7.1.1	Detail-F .....	92
7.1.1.1	Detail-E .....	95
7.1.1.2	Detail-C.....	97
<b>8</b>	<b>BEURTEILUNG</b>	<b>99</b>
8.1	Erforderlichkeit von Dampfsperren bzw. Dampfbremsen .....	99
8.2	Vergleich stationäre- und instationäre Berechnungsergebnisse .....	99
8.3	Arbeitsverlauf .....	100
<b>9</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>101</b>
<b>10</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>103</b>
<b>11</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>105</b>
<b>12</b>	<b>ANHANG</b>	<b>107</b>
12.1	Datenblätter .....	107
12.1.1	U-Wert Berechnung Außenwand, Aufbau 6.....	107
12.1.2	Temperatur-Amplitudendämpfung Außenwand, Aufbau 6 .....	108
12.1.3	Glaserdiagramm Außenwand, Aufbau 6.....	109
12.1.4	Auswertungsdiagramme WUFI2-3.....	111
12.1.4.1	Aklimatisation.....	111
12.1.4.2	Differenzdruckklimakammer .....	114
12.1.4.3	Messpunkte .....	120
12.1.5	Messprotokolle.....	128
12.2	Pläne .....	140

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht verwendet und die den benutzten Quellen, wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Judendorf Straßengel am, .....

.....

Haimo Stramitzer



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie bedanken, die mich bei meiner Entscheidung zu studieren immer wieder bestärkt und tatkräftig unterstützt hat. Ihnen bin ich zu tiefstem Dank verpflichtet. Großen Verdienst daran trägt meine Mutter, Helga Stramitzer, die das Unterfangen erst möglich gemacht hat. Nicht zu vergessen mein Bruder Hannes Stramitzer, der immer hinter mir stand, um mir den Rücken zu stärken.

Ein ganz besonderes Dankeschön gilt meinem Betreuer, Dipl. Ing. Heinz Ferk, der mir bei dieser Arbeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist und immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte.

Großer Dank gilt auch den Labor- und Technikmitarbeitern des Institutes für Bauphysik der TU Graz, die mir bei der Durchführung meines Versuches im Bautechnikzentrum sehr geholfen haben. Hierbei ist besonders Hr. Christian Gottfried Zoller zu erwähnen, der mich in dieser Zeit persönlich betreut hat und mir zur Seite stand.

Ein Dankeschön möchte ich auch der Firma KLH aussprechen, die sich bereiterklärt hat, die BSP-Platten für das Versuchsmodell kostenlos zur Verfügung zu stellen. Hier möchte ich besonders meinem langjährigen Freund und Meisterkollegen, Hrn. Zimmermeister Harald Gänser danken, der dies ermöglicht hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kollegen und Mitarbeitern Uwe Schabernak, Erwin Karner, Gilbert Lehmann, Martin Lehmann und Anton Buchmüller sehr herzlich bedanken, die mich bei der Herstellung, der Manipulation, dem Einbau und dem Ausbau des Versuchsmodelles tatkräftig unterstützt haben, ohne deren Hilfe das ganze Unterfangen nicht möglich gewesen wäre.

Abschließend möchte ich mich bei allen Damen und Herren bedanken, die mich während meiner Studienzeit an der TU Graz betreut haben und bei denen ich meine Ausbildung machen durfte.

Auch all jenen Mitarbeitern der TU Graz, die hier namentlich nicht erwähnt wurden und die mir beim Erreichen meiner Ziele geholfen haben, sei an dieser Stelle gedankt.



## 0 EINLEITUNG

### 0.1 Ausschlaggebendes Projekt

Die Arbeit basiert auf der Projektentwicklung einer Wohnanlage im Ortsgebiet von Gratkorn. Die Anzahl der Gebäude war nicht vorgegeben, sondern durch Bebauungsdichte, Grundgrenzabstände und Form des Grundstücks beschränkt. Nach Berücksichtigung dieser Faktoren wurde die Liegenschaft mit 7 Wohneinheiten zu je 119,75 m<sup>2</sup> Wohnnutzfläche geplant.

Beim Entwurf der Wohneinheiten wurde auf häufig festgestellte Probleme, wie mangelnde Belichtung, Belüftung und Schallübertragung, eingegangen und diese berücksichtigt. So wurden zum Beispiel die Obergeschosse durch eine Verdrehung um 90° von der jeweiligen Nachbarwohneinheit vollständig entkoppelt. Das Resultat waren vier freie Außenwände, bei einer gekoppelten Bauweise, die mit Sicherheit eine höhere Wohnqualität für den Nutzer zur Folge haben.

Dieser Grundgedanke war richtungsweisend für das gesamte Konzept. So wurde der moderne bautechnische Gedanke, mit frischer Architektur vereint, um zu zeigen, dass man es mit etwas Liebe zum Detail deutlich besser machen kann. Um den Worten auch Taten folgen zu lassen, wurde spezifischen Fragen der technischen Ausführung auf den Grund gegangen.

Im Zuge der Projektplanung, genauer gesagt der Detailentwicklung, ergaben sich Fragestellungen bezüglich des hygrothermischen Verhaltens spezifischer Details, auf diese im Rahmen dieser Arbeit unter Zuhilfenahme moderner Simulationsprogramme Antworten gesucht wurden. Dazu wurde zusätzlich ein exemplarisches Versuchsmodell entwickelt, um die Berechnungsergebnisse anhand eines Laborversuches zu verifizieren.

Die so gewonnenen Erkenntnisse sollen sicherstellen, dass verwendete Produkte sowie entwickelte Details und Aufbauten technisch einwandfrei funktionieren. Vertieftes Wissen bedeutet mehr Sicherheit, um so Mängel und Schäden im Vorfeld bei richtiger Ausführung und Nutzung abzuwenden. Dies sollte in jedem Fall eines der Kernthemen der technischen Ausführung sein.

## 0.2 Motivation

Im Frühjahr 2013 werden in Gratkorn zwei Reihenhäuser in Holzmassivbauweise realisiert. Die Objekte sind voll unterkellert und werden neben der Bundesstraße B 67 (Grazer Straße) errichtet. An der südöstlichen Seite der Liegenschaft verläuft der Felberbach. Der bauliche Abstand der Häuser zum Felberbach muss laut Vorgabe der Behörde für Wildbach- und Lawinenverbauung Steiermark 10 m betragen.

Das Bauvorhaben wird auf der Liegenschaft mit der Grundstücksnummer 572/1, Bachweg 4, A-8101 Gratkorn, Katastralgemeinde 63243 Kirchenviertel, realisiert. Die Fundierung erfolgt mit einer Plattengründung aus Stahlbeton, welche die Lasten flächig in den Baugrund ableitet.

Im Zuge der Entwicklung und der Planung wurde ein Wandaufbau hinsichtlich winterlichen- und sommerlichen Wärmeschutzes, Schallschutzes und Feuchteschutzes entwickelt. Die Feuchteeinwirkung von innen sowie von außen ist in der Klimazone, in der sich die Liegenschaft befindet und in der die Objekte realisiert werden sollen, sehr gutmütig. Aus langjähriger Erfahrung weiß man, dass die Durchfeuchtung der Konstruktion, die sich in den Wintermonaten einstellt, in den Sommermonaten wieder austrocknen kann und somit in den meisten Fällen keine Schäden verursacht.

So werden zum Beispiel Wohnhäuser in Holzmassivbauweise mit EPS Dämmung und folgend beschriebenem Aufbau errichtet. Die EPS-F Platten sind an der Außenseite mit einem Silikat Dünnputz verputzt und mit einem speziellen Kleber auf eine 3-schichtige Brettsperrholzplatte geklebt. Obwohl weder zwischen Dämmung und Brettsperrholzplatte noch auf der Innenseite der Brettsperrholzplatte im Bereich der Installationsebene dampfgebremst bzw. dampfgesperrt wird, funktionieren solche Aufbauten in unserer Klimaregion einwandfrei.

Da eine dauerhafte Möglichkeit der Ausführung einer hochwertigen Dampfsperre nur durch das vollständige Verflämmen der Oberfläche mit einer bitumenkaschierten Aluflämbahn realisiert werden kann und eine funktionierende Dampfbremse, ähnlich wie die zuvor erwähnte Dampfsperre, einen hohen wirtschaftlichen Aufwand darstellt, stellt sich dem aufmerksamen Beobachter die Frage, inwieweit solche Maßnahmen bei der Verwendung von Brettsperrholzplatten erforderlich sind und ab welcher Dämmstärke, welchem Dämmmaterial und welcher Klimazone die tragende Sperrholzstruktur beginnt, Schaden zu nehmen.

### 0.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Brettsperrholzbauweise stellt noch eine sehr junge Disziplin dar. Obwohl das Produkt schon länger bekannt ist, steckt sie zu artverwandten Bauweisen, wie dem Stahlbetonfertigteilbau, der auch eine Plattenbauweise aufweisen kann, noch in den Kinderschuhen. Wie im BSP-Handbuch der technischen Universität Graz erwähnt, wurde im Jahr 1907 in Glasgow das erste 8-geschossige Stahlbetonobjekt erbaut. Erst 100 Jahre später, im Jahr 2007 konnte man mit einem 8-geschossigen Wohnhaus in London in Holzmassivbauweise mit Brettsperrholzplatten nachziehen.

Das Produkt Brettsperrholz erfreut sich aufgrund seiner Eigenschaften, nicht nur bei Bauausführenden sondern auch bei Bauherren, steigender Beliebtheit, da es eine rasche, weitgehend trockene und saubere Alternative zu anderen konstruktiven Baustoffen darstellt. Die Gefahr, die damit einhergeht, ist die teilweise Unwissenheit vieler bauausführenden Firmen im richtigen Umgang mit diesem Produkt.

So ist der Einsatz von Brettsperrholz derzeit nur für die Nutzungsklassen 1 und 2 normativ erlaubt und geregelt. Die Nutzungsklassen beschreiben die in der Umgebung des Bauwerks herrschenden klimatischen Verhältnisse während dessen Lebensdauer, in Bezug auf Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit. In Abhängigkeit dieser Parameter stellt sich im Holz die sogenannte Ausgleichs- oder Gleichgewichtsfeuchte ein. Des Weiteren sollte man nicht vergessen, dass man es hier mit einem gewachsenen, natürlichen Baustoff zu tun hat, welcher in Bezug auf bauphysikalische- und bautechnische Fehler sehr sensibel reagieren kann.

Da die Brettsperrholzelemente, in Form von kleinformatischen- und großformatigen Platten mit Abmessungen bis zu 3 Metern Breite und 16 Metern Länge bis hin zu fertigen Raumzellen die tragende Struktur der Bauwerke bilden, zieht eine Schädigung dieser tragenden Teile dramatische Folgen nach sich, welche nur sehr schwer und meist mit einem hohen finanziellen Aufwand zu beheben sind.

Ziel dieser Arbeit, ist die Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von spezifischen Brettsperrholz-Konstruktionsdetails. Dies soll einerseits mit Hilfe moderner Simulationssoftware und andererseits mit einem exemplarischen Versuchsmodell in einem Laborversuch geschehen, um anschließend die Ergebnisse aus den Berechnungen zu verifizieren. Im Laborversuch soll das Verhalten der Konstruktion unter extremen Klimabedingungen analysiert werden. Des Weiteren soll die Einwirkung des Jahreszyklus untersucht werden, um festzustellen, wann und ob sich in der Konstruktion eine Gleichgewichtsfeuchte einstellt. Eine große Rolle hierbei spielt auch die Luftdichtigkeit der Konstruktion bzw. der Brettsperrholzplatten in Bezug auf Konvektion und Feuchtetransport.

Gleichzeitig soll diese Arbeit ein Leitfaden für planende Ingenieure und Architekten sein, um das Produkt Brettsperrholz richtig einzusetzen, Bauschäden vorzubeugen und somit kein schlechtes Licht auf den Baustoff Holz fallen zu lassen und um nicht die entfachten Feuer der Zweifler und Kritiker zu schüren.

## 0.4 Vorgehensweise

Die Untersuchung wird mit Hilfe der Bauphysik Software WUFI 2D-3 (Version 3.3) der Firma IBP-Software durchgeführt. Entwickelt wurde das Programm am Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Das Programm berechnet 2-dimensional stationär, als auch instationär, die Entwicklung der Feuchtigkeit und Temperatur in einem Bauteil, das aus mehreren Schichten besteht, über die Zeit. Somit ist es mit einfachen Mitteln möglich, Bauteile vorab hinsichtlich Temperatur- und Feuchteverhalten über die Zeit zu bewerten.

Um die Berechnungsergebnisse von WUFI 2D-3 überprüfen zu können und wissenschaftlich zu untermauern, wird im Bautechnikzentrum der TU Graz in die Differenzdruckklimakammer ein Versuchsmodell im Maßstab 1:1 (in Anlehnung an das Detail F) eingebaut. Die Kammer soll auf der Außenseite eine Temperatur von **-15,00 °C** und eine relative Luftfeuchtigkeit von **60,00 %** und auf der Innenseite **23,00 °C** und **45,00 %** relative Luftfeuchtigkeit aufweisen. Die Messungen am Modell werden mit den Berechnungsergebnissen verglichen, um diese zu validieren.

Das Modell soll am 16.11.2012 in die Kammer eingebaut werden. Bis zum 04.12.2012 soll sich das Modell im Kellergeschoß des Bautechnikzentrum aklimatisieren und am 05.12.2012 soll dann der Versuch gestartet werden. Die Aklimatisation des Versuchsmodells wird auch schon berechnet und die Ergebnisse danach mit den Messungen verglichen. Die Messergebnisse vom 05.12.2012 werden als Startwerte für die weitere Berechnung herangezogen. Ende Februar 2013 soll der Versuch beendet werden. Nach dem Abschalten der Differenzdruckklimakammer wird dann das Versuchsmodell ausgebaut.

Bei den Messungen gilt das spezielle Augenmerk dem Feuchtigkeitsverhalten der BSP-Platten. Um dies messen zu können werden insgesamt **26 Messpunkte** über das ganze Modell verteilt, welche eine möglichst genaue Vorstellung von dem durchschnittlichen Wassergehalt der BSP Bauteile liefern sollen. Die Lage der Messpunkte wird in Detailplänen festgehalten. Des Weiteren wird, neben der Holzfeuchte, auch die Temperatur der Messstellen in den Messprotokollen vermerkt. Beide Datensätze werden danach mit den Berechnungen verglichen.

Beispielhaft werden dann die spezifischen Details F, E und C des zugrundeliegenden Projektes hinsichtlich des Wassergehaltes instationär untersucht, um mit überschaubarem Aufwand komplexe Zusammenhänge zu analysieren. Detail F wurde aufgrund der an der Unterseite ungedämmten Deckenplatte, welche in ihrer Verlängerung als Carport dient und natürlich wegen seiner Affinität, zum Versuchsmodell ausgewählt. Detail E soll zusätzlich als Vergleich zum Detail F und dem Versuchsmodell dienen, da hier zum Unterschied zu F und dem Versuchsmodell, die Deckenplatte nicht ungedämmt weiterläuft, sondern die Fassade vollständig gedämmt ist. Zum Abschluss wurde noch das Detail C ausgewählt. Hier steht die Verbindung der Dachplatte mit der Außenwand und der Attika im Focus der Berechnung, da die Dachplatte, im Gegensatz zur Außenwand und der Attika, an der Oberseite vollständig mit einer bitumenkaschierten Aluflämbahn verflämmt ist.

## 1 GRUNDLAGEN

### 1.1 Brettsperrholz

Brettsperrholz oder auch kurz BSP ist eines der vielen Massenprodukte der Holzindustrie, welches seine Wurzeln im deutschsprachigen Raum hat. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt unterscheiden sich die Produkte der verschiedenen Hersteller noch in ihren Dimensionen wie Breite und Dicke aber dies soll sich in naher Zukunft ändern, um das Produkt benutzerfreundlicher zu machen. Die Länge der Elemente ist bei allen Herstellern variabel und wird immer dem zu realisierenden Objekt angepasst. Sie ist in der Praxis durch die Längen der Pressen begrenzt. Theoretisch ist Brettsperrholz ein Endlosprodukt.

Der grundlegende Aufbau von BSP ist bei allen Herstellern gleich. Keilgezinkte Brettlamellen in Längs- bzw. in Querrichtung werden nebeneinander in eine Presse gelegt und in weiterer Folge orthogonal miteinander verklebt. Dies erfolgt momentan von 3 bis etwa 8 Schichten, aber theoretisch sind der Plattendicke keine Grenzen gesetzt, somit sind je nach Dicke der Platten auch größere Spannweiten in BSP realisierbar. Auch der Einsatz als Verbundbaustoff in Verbindung mit Brettschichtholz (BSH) zu einem sogenannten Kastenquerschnitt ist möglich und eröffnet neue Möglichkeiten, Tragstrukturen in Holz zu realisieren.

#### 1.1.1 Ausgangsprodukte und Herstellung

Ausgangsprodukte von BSP sind von Hersteller zu Hersteller verschieden, aber im Allgemeinen sind es Bretter bzw. keilgezinkte Brettlamellen und Klebstoff. Einzelne Hersteller verkleben ihr Produkt nicht nur auf der Flachseite, sondern auch auf der Schmalseite. Die Bretter bzw. Brettlamellen werden entweder gleichzeitig mit der Flachseite in der Presse verklebt oder vorab zu sogenannten Einschichtplatten verklebt und danach in die Presse eingelegt, was den Klebevorgang in der Presse erheblich vereinfacht und eine qualitativ hochwertigere Schmalseitenverklebung sicherstellt. Dabei ist zu bedenken, dass die Seitenverklebung der Längslagen sehr viel einfacher zu realisieren ist als die Seitenverklebung der Querlagen, da sich die Brettlamellen über eine Länge von 3 Metern mit einem sehr viel geringeren Pressdruck zusammenschieben lassen als über eine Länge von 16 Metern. Hierzu gibt es jedoch auch schon Lösungen, auf die hier nicht genauer eingegangen werden soll. Derzeit kommen hauptsächlich 2 verschiedene Pressverfahren zur Anwendung, die Hydraulische Flächenpressung und die Flächenverklebung mittels Vakuumtechnik. Der Mindestpressdruck sollte, wie im BSP-Handbuch der technischen Universität Graz erwähnt, bei der Plattenherstellung zwischen 0,60 und 0,80 N/mm<sup>2</sup> liegen. Dieser Mindestpressdruck kann bei der Flächenverklebung mittels Vakuumverfahren nicht eingehalten werden (nur etwa 0,10 N/mm<sup>2</sup>) was zusätzliche Maßnahmen erfordert um die gewünschte Qualität zu erzielen. Der Vorteil des Vakuumverfahrens liegt darin, dass man nicht an eine Pressform gebunden ist so wie bei der hydraulischen Flächenpressung.

Diese Seitenverklebung kann Vorteile in Bezug auf die Luftdichtigkeit, den Luftschall und den Brandfall bringen. Die Tragfähigkeit bzw. Festigkeit des Produktes wird dadurch nicht gesteigert, da davon ausgegangen werden muss, dass die Bretter bzw. keilgezinkten Brettlamellen Risse bekommen und somit das gleiche Tragverhalten wie ohne Schmalseitenverklebung an den Tag legen. Solange der Grenzwert Brettbreite zu Brettstärke  $\geq 4$  beträgt kann auf eine Schmalseitenverklebung verzichtet werden. Andernfalls muss sie aufgrund des vorzeitigen Versagens bei Rollschub planmäßig erfolgen.

#### 1.1.1.1 Brett bzw. keilgezinkte Brettlamelle

Die Ausgangsprodukte für Brettsperrholz sind eigenständige Produkte, die jedes für sich normativ geregelt sind. Aufgrund der normativen Regelung muss jedes Ausgangsprodukt gewisse Anforderungen erfüllen. Das Produkt BSP wird stark durch die Eigenschaften der Ausgangsprodukte beeinflusst. Der E-Modul, die Festigkeit in Bezug auf Zug, Druck, Biegung oder Schub haben Auswirkungen auf die Materialeigenschaften der BSP-Platten. So müssen zum Beispiel bei einer einachsig belasteten Decke außenliegende Längslagen hohe Zug-, Druck- und Biegefestigkeiten aufweisen, wohin gegen Querlagen eine höhere Schub- bzw. Rollschubfestigkeit aufweisen sollten.

Als Ausgangsmaterial kommt hauptsächlich Fichte zum Einsatz. Da die Tanne sich von der Fichte in Bezug auf die Materialeigenschaften nicht unterscheidet, können diese beiden Holzarten vermischt werden. Um gewisse Eigenschaften zu steuern, ist die Herstellung von BSP aus Lärche, Zirbe oder Föhre, je nach Rohstoffzugänglichkeit, auch kein Problem. Des Weiteren kommen auch Laubhölzer wie Esche, Eiche, Robinie, Pappel oder Buche zum Einsatz, um mechanische Eigenschaften des BSP zu beeinflussen. Die Verwendung von Pappel für die Querlagen, welche ein sehr gutes Verhalten in Bezug auf Rollschub an den Tag legt, steigert somit die mechanischen Eigenschaften des Endproduktes.

C24 ist die bevorzugte Festigkeitsklasse für die Herstellung von BSP. Dennoch ist es sinnvoll, für Zwischenlagen oder Querlagen auf Material der Festigkeitsklassen C16 oder C18 zurückzugreifen, da diese zwar geringere Festigkeiten haben aber die Anordnung der Jahrringe der Rollschubbeanspruchung entgegenkommt. So ist zum Beispiel ein Brett aus Kernnähe mit eher senkrecht zur Flachseite stehenden Jahrringen der Festigkeitsklasse C18 in der Lage, einen höheren Rollschubwiderstand zu leisten, als ein Brett der Festigkeitsklasse C24 mit eher parallel zur Flachseite verlaufenden Jahrringen. Dies hängt einerseits mit der Lage der Jahrringe zusammen und andererseits mit dem Alter des Holzes, wobei Ersteres einen größeren Einfluss darauf hat. Man sieht also, dass man mit einem intelligenten Aufbau die mechanischen Eigenschaften von BSP sehr gut den jeweiligen Anforderungen anpassen kann.

Aus dem Sägeprodukt Brett wird in weiterer Folge mit Hilfe der Keilzinkenverbindung das theoretische Endprodukt Brettlamelle hergestellt. Die Keilzinkenverbindung ist normativ in der ÖNORM EN 385 „Keilzinkenverbindungen im Bauholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung“, geregelt. Die Keilzinkenverbindung ist im Ingenieurmäßigen Holzbau nicht mehr wegzudenken. Sie ermöglicht nicht nur die Herstellung von Bauteilen größerer Länge, sondern bietet auch die Möglichkeit durch das

Auskappen von festigkeitsmindernden Fehlstellen die Aufstufung von Brettern in die nächsthöhere Festigkeitsklasse. Keilzinkenverbindungen werden in der Regel so ausgeführt, dass man die Keilzinken auf der Flachseite des Brettes sehen kann. Keilzinkenverbindungen, bei denen man die Keilzinken auf der Schmalseite des Brettes erkennen kann, werden nur in Sonderfällen eingesetzt (z.B.: bei sichtbarer Flachseite) da sie eine geringere Tragfähigkeit aufweisen.

Holz ist ein schlechter Wärmeleiter, was an der Porosität des Materials liegt. Die Wärmeleitfähigkeit von Holz, nimmt mit steigender Rohdichte und Feuchtigkeit zu. Im Vergleich mit anderen Baustoffen ist aber zu erwähnen, dass das Material aber bei einer Feuchtigkeitszunahme von etwa 2% auch nur etwa 2% seiner Dämmeigenschaften einbüßt. Bei Beton sind es, bei gleichem Feuchteanstieg in etwa 20 bis 25% und bei Mineralwolle sogar 30 bis 40%.

Da Holz ein anisotropes Material ist, gibt es Unterschiede bezogen auf die Faserrichtung. So leitet das Material Wärme quer zur Faserrichtung schlechter als in Faserrichtung. Wenn Holz Feuchtigkeit aufnimmt, wird das quellen genannt und das Gegenteil davon nennt man schwinden. Aufgrund des Schwindens von Holz und der schlechten Wärmeleitfähigkeit, kann die Wärmedehnung von Holz in der Regel vernachlässigt werden.

Holz ist durch seine Struktur in der Lage Wasser hygroskopisch, gebundenes Wasser in den Zellwänden und kapillar, in den Zellhohlräumen, als freies Wasser aufzunehmen und wieder abzugeben. Durch die hygroskopische Eigenschaft und der damit verbundenen schwankenden Holzfeuchte, ist das Material in der Lage, sich bis zu einem gewissen Grad, seinem Umgebungsklima anzupassen, bis sich die sogenannte Ausgleichs- oder Gleichgewichtsfeuchte einstellt.

Der hygroskopische Bereich der Wasseraufnahme, beeinflusst die physikalischen Eigenschaften von Holz ausschlaggebend. Freies Wasser wird erst über dem Fasersättigungsgrad (bei mitteleuropäischen Fichtenholz in etwa 30 bis 35%) in die Zellhohlräume aufgenommen.

### 1.1.1.2 Klebstoffe

Der Klebstoff spielt bei der BSP Herstellung eine sehr wichtige Rolle. Bei der Keilzinkenverbindung der Brettlamellen fallen ihm die Einhaltung der Mindestbiege- und Mindestzugfestigkeit zu und bei der Flächenverklebung die Mindestscherfestigkeit, resultierend aus dem Mechanismus II aus der Bemessung. Des Weiteren muss er seine Eigenschaften bei Temperaturveränderung und über die Lebensdauer der vorgesehenen Verwendung hinaus beibehalten.

Zur Zeit werden hauptsächlich einkomponentige Polyurethanklebstoffe (1K-PUR) und Aminoplaste, dazu zählen in erster Linie Melamin Harnstoff Formaldehyd (MUF) und Melamin Formaldehyd (MF) Klebstoffe, bei der BSP Herstellung eingesetzt. 1K-PUR Klebstoffe finden häufiger Anwendung, da sie einfacher zu verarbeiten sind. Jedoch benötigen sie bei der Verarbeitung eine Mindestholzfeuchte von 8%, um Abbinden zu können. Ihr großer Nachteil liegt jedoch darin, dass sie nicht temperaturbeständig sind. Im Brandfall löst sich die gesamte Schicht nach einer gewissen Zeit ab, wodurch es danach zu einer erhöhten Abbrandgeschwindigkeit kommt. Dieser Problematik kann nur mit einer höheren Schichtdicke begegnet werden.

MUF Klebstoffe sind temperaturbeständig, deshalb kann hier das gleiche Abbrandverhalten wie bei Vollholz angenommen werden. Sie sind preislich günstiger als 1K-PUR Klebstoffe aber aus dem Zweikomponentensystem ergeben sich höhere Anforderungen in der Verarbeitung. Bei beiden Klebstoffsorten besteht die Möglichkeit der Hochfrequenzaushärtung. Die Aminoplaste sind in der ÖNORM EN301 und die PUR-Klebstoffe in der ÖNORM EN 15425 geregelt.

In Bezug auf die feuchtetechnischen Eigenschaften von Klebstoffen ist relativ wenig zu sagen, außer dass sie durch ihre spezifischen Materialeigenschaften, den Dampfdiffusionswiderstand des Produktes BSP, normal zur Plattenebene, etwas erhöhen. Durch den flächenhaften Auftrag im Zuge der Verklebung, entstehen Klebstoffschichten. Der Anteil an Klebstoff mit etwa 0,6%, ist in Bezug zum Holz mit etwa 99,4% aber sehr gering.

Auch die Wärmeleitfähigkeit des Materials, wird durch den geringen Anteil an Klebstoff nur unerheblich beeinflusst. Einzig bei der statischen Bemessung im Brandfall, kommt der verwendete Klebstoff zum Tragen, wie oben schon erwähnt.

### 1.1.2 Materialspezifische Eigenschaften und technische Kenndaten

Eine materialspezifische Eigenschaft von BSP ist die strukturbedingte zweiachsige Möglichkeit der Lastabtragung von Deckenplatten. BSP-Decken werden derzeit hauptsächlich als einachsig belastete Platten eingesetzt. Durch die Querlagen ist aber durchaus eine zweiachsige Lastabtragung möglich, wobei es eine Hauptspannrichtung und eine Nebenspannrichtung geben muss. Dabei ist aber auch die Plattenbreite von ca. 3 Metern ein Handikap. Es besteht zwar die Möglichkeit, die Plattenlängsstöße biegesteif auszubilden, aber der Einsatz beschränkt sich momentan noch auf eher kürzere Längen, wie zum Beispiel eine Tür- oder Fensteröffnung, die man ohne einen biegesteifen Längsstoß auszubilden, mit der zur Verfügung stehenden Plattenbreite überspannen kann.

Für die Weiteren bauphysikalischen Berechnungen werden gemäß ÖNORM EN 12524 folgende technische Kenndaten angenommen [4]:

- Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,13 \text{ W/(mK)}$
- Spezifische Wärmekapazität:  $c_p = 1600 \text{ J/(kgK)}$
- Diffusionswiderstand:  $\mu = 25 \text{ bis } 50$
- Holzfeuchte:  $12\% (\pm 2\%)$
- Brandverhalten: Euroklasse D-s2, d0
- Luftdurchlässigkeit: streut stark und ist von mehreren Faktoren abhängig;  
dichte Elemente sind möglich
- Gewicht:  $5,0 \text{ kN/m}^3$
- Formveränderung in Plattenebene:  $\approx 0,01\% / \% \text{ Holzfeuchteänderung}$
- Formveränderung in Dickenrichtung:  $\approx 0,20\% / \% \text{ Holzfeuchteänderung}$

## 1.2 Bauphysik allgemein

Die Bauphysik im heutigen Sinne ist Bestandteil der angewandten Physik und bedient sich dabei der Experimentalphysik und der theoretischen Physik. Das Kennzeichnende an angewandter Physik ist das Beobachten bzw. Untersuchen physikalischer Vorgänge nicht des Vorgangs selbst wegen, sondern um daraus Rückschlüsse und Lösungsansätze für daraus entstehende Probleme zu erhalten. Das Gebiet der Bauphysik umfasst in Bezug auf Bauwerke den Wärme-, Feuchte-, Schall- und Brandschutz. Auch der Einfluss von Licht bzw. Belichtung ist ein Kernthema der Bauphysik von heute. Aufgrund dieser Themengebiete werden Bauwerke, hingehend ihrer Funktionalität der jeweiligen Nutzung betreffend, klassifiziert.

Schon in der Planungsphase ist es von großer Wichtigkeit, bauphysikalische Aspekte mit einzubeziehen und entsprechend zu berücksichtigen. Die Gewichtung des jeweiligen Themas ist immer von der anzustrebenden Nutzung des Bauwerks abhängig. In dieser Arbeit soll der Schwerpunkt auf die Themengebiete Wärme- und Feuchteschutz und auch der damit einhergehenden Luftdichtigkeit gelegt werden, da diese Einwirkungen bei Holzbauten schwerwiegende und meist nur mit großem arbeitstechnischem – und wirtschaftlichem Aufwand zu behebende Schäden verursachen. Sind die Einwirkungen und Vorgänge bekannt, ist es in der Planungsphase ein Leichtes, ihnen zu begegnen und entgegenzuwirken.

### 1.2.1 Luftdurchlässigkeit

Die Luftdurchlässigkeit eines Gebäudes ist in der OIB Richtlinie 6 sowie in der DIN 4108 geregelt. Sie wird mit der Luftwechselrate  $n_{50}$ , welche in der Einheit [1/h] definiert ist, bewertet. Das Prüfverfahren das bei der Ermittlung des  $n_{50}$  Wertes anzuwenden ist, ist in der ÖNORM EN 13829 geregelt. Der  $n_{50}$  Wert gibt an, wie oft das Innenluftvolumen eines Gebäudes pro Stunde ausgetauscht wird. Dabei ist zu erwähnen, dass die Luftwechselrate  $n_{50}$  keine Auskunft über die Gebäudelüftung selbst liefert. Der  $n_{50}$  Wert ist kein Garant für die notwendige Frischluftzufuhr für die jeweilige Nutzung eines Bauwerkes.

Die Anforderungen an die notwendige Luftwechselrate nach der OIB Richtlinie 6 sind:

- für Gebäude ohne kontrollierte Wohnraumlüftung:  $n_{50} \leq 3,0$  [1/h]
- für Gebäude mit kontrollierter Wohnraumlüftung:  $n_{50} \leq 1,5$  [1/h]

Als Vorschlag für energieeffiziente Gebäude sollte der  $n_{50}$  Wert 0,6 nicht überschreiten. Dieser Wert ist jedoch normativ nicht festgelegt.

Wie schon vorab erwähnt erfolgt die Ermittlung der Luftwechselrate nach dem Verfahren A, welches in der ÖNORM EN 13829 geregelt ist. Dabei wird mit Hilfe eines stufenlos regelbaren Ventilators zwischen Außen und dem Gebäudeinneren eine Druckdifferenz von 50 Pa ( $50 \text{ Pa} \equiv 50 \text{ N/m}^2 \equiv 5 \cdot 10^{-4} \text{ bar}$ ) erzwungen.

Der Ventilator wird in eine Außenöffnung, vorzugsweise Eingangstüre, mit Hilfe einer Dichtplane eingebaut. Der Luftvolumenstrom des Ventilators entspricht dann dem Luftvolumenstrom aller luftdurchlässigen Fehlstellen und Gebäudeteile.

Die Luftwechselrate ergibt sich dann als Quotienten aus dem Luftvolumenstrom bei einer Druckdifferenz von 50 Pa und dem Innenraumvolumen des Gebäudes.

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V_L}$$

- $n_{50}$  Luftwechselrate [1/h]
- $V_{50}$  Luftvolumenstrom bei einer Druckdifferenz von 50Pa [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $V_L$  Innenraumvolumen des Gebäudes [ $\text{m}^3$ ]

Der hygienische Mindestluftwechsel  $n_L$  ist stark von der Nutzung des Gebäudes oder der Räumlichkeiten abhängig. Es finden sich in den einschlägigen Normenwerken verschiedene Angaben, aber ein Wert von 30  $\text{m}^3$  Frischluft pro Stunde oder eine Luftwechselzahl von  $n_L = 0,5$  [1/h], also alle 2 Stunden ein kompletter Luftaustausch, erscheint sinnvoll. Dabei ist zu beachten, dass sowohl der Mindestluftwechsel als auch die Luftwechselrate Werte sind, die mit der Behaglichkeit und dem Wohlbefinden der Nutzer im Einklang stehen müssen. So ist der Mensch zum Beispiel auf Luftbewegungen und nachfolgend erwähnte Temperaturunterschiede sehr empfindlich und empfindet schon Luftbewegungen  $\geq 0,1\text{m/s}$  in seiner Hautnähe als unangenehm. Die Lufttemperatur sollte keine größeren Schwankungen als  $\pm 0,50^\circ\text{C}$  haben und der Unterschied der Raumluft- zur Oberflächentemperatur der raumumschließenden Oberflächen wird bis zu  $2^\circ\text{C}$  noch nicht als störend empfunden. Nachweise dahingehend sollten also in jedem Fall zusätzlich geführt werden.

Die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle ist von großer Bedeutung in Bezug auf:

- Energieverluste resultierend aus unkontrollierter Lüftung durch Fehlstellen in der Gebäudehülle, welche auf unzureichend dicht hergestellte Montagefugen oder auf unzureichend hergestellte Luftundichtheit allgemein zurückzuführen sind.
- unkontrollierte Konvektion, die in weiterer Folge Bauschäden durch den Ausfall von Tauwasser (Kondensat) innerhalb der der Konstruktion zur Folge hat.
- Zugluft, um das Durchlüften der Wärmedämmung und die damit verbundene Reduktion der Dämmwirkung zu vermeiden und Zugluft im Allgemeinen, da diese eine Beeinträchtigung der Behaglichkeit zur Folge hat.

Des Weiteren ist noch zu erwähnen, dass nicht nur die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle relevant ist, sondern auch die Luftdurchlässigkeit einzelner Bauteile, welche in eigenen Prüfnormen geregelt ist.

Ein weiterer Aspekt der noch zu berücksichtigen ist, ist der Luftschallschutz. Dieser hat aber keinen Einfluss auf konstruktive Schäden, sondern betrifft das Wohlbefinden des Nutzers.

### 1.2.1.1 Näherungsweise Berechnung der max. zul. Luftdurchlässigkeit

Im Fall des Projektes Gratkorn, im spezielleren der Wohneinheit 2.1 im Haus II, sind bis auf einen kleinen Anteil im Bereich des Obergeschoßüberstandes die gebäudeumschließenden BSP Platten 3-schichtig. Im Bereich des Geschoßüberstandes über eine Fläche von 6,19m<sup>2</sup> krägt die 5-schichtige Deckenplatte inklusive Fußbodenaufbau 0,80m aus, welche unter der Voraussetzung des Nichtvorhandenseins von Fehlstellen, durch ihren 5-schichtigen Aufbau in jedem Fall eine höhere Luftdichtigkeit aufweist, als eine Platte mit einem 3-schichtigen Aufbau. Deshalb wird diese Fläche als annähernd luftundurchlässig angenommen und vernachlässigt. Diese Annahme betrifft auch sämtliche Montagefugen und Durchdringungen der Haustechnik, die ebenfalls aufgrund geeigneter Ausführungsmaßnahmen als luftundurchlässig in Rechnung gestellt werden. Des Weiteren wird berücksichtigt, dass die Deckenplatte des Obergeschosses vollflächig mit einer bitumenkaschierten Aluflämbahn verflämmt wird, welche eine dampfsperrende- und somit auch eine luftdichte Schicht darstellt. Aus der Zulassung des Herstellers wurde für die Fenster ein Mittelwert für die Luftdurchlässigkeit von 0,30m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, bei einer Druckdifferenz von 50Pa entnommen. Bei den Fenstertüren der Nebeneingangs- und der Eingangstür wurde gleich vorgegangen und ein Mittelwert von 0,10m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> bei ebenfalls 50Pa Druckdifferenz ermittelt.

- $A_{CLT}$  freie BSP Flächen [m<sup>2</sup>]
- $A_D$  Türflächen [m<sup>2</sup>]
- $A_W$  Fensterflächen [m<sup>2</sup>]
- $n_D$  Luftdurchlässigkeit Türen bei einer Druckdifferenz von 50Pa [m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>]
- $n_W$  Luftdurchlässigkeit Fenster bei einer Druckdifferenz von 50Pa [m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>]
- $n_{CLT}$  max. zul. Luftdurchlässigkeit BSP bei einer Druckdifferenz von 50Pa [m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>]

Unter der Annahme, dass die Wohneinheit über keine kontrollierte Wohnraumlüftung verfügt wird nach der OIB Richtlinie 6 der  $n_{50}$  Wert mit 3,0 [1/h] angenommen. Mit diesen Werten und Annahmen kann nun näherungsweise die maximal zulässige Luftdurchlässigkeit  $n_{CLT}$  der 3-schichtigen BSP Platten bei einer Druckdifferenz der Umgebung und dem Gebäudeinneren von 50 Pa ermittelt werden.

- erforderlicher Luftvolumenstrom:

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V_L} \Rightarrow V_{50} = n_{50} * V_L = 3,0 \frac{1}{h} * 323,96 m^3 = 971,88 \frac{m^3}{h}$$

- maximal zulässige Luftdurchlässigkeit  $n_{CLT}$  der 3-schichtigen BSP Platten

$$V_{50} = \Sigma (n_i * A_i) = n_{CLT} * A_{CLT} + n_D * A_D + n_W * A_W$$

$$971,88 \frac{m^3}{h} = n_{CLT} \frac{m^3}{hm^2} * 164,65 m^2 + 0,10 \frac{m^3}{hm^2} * 22,13 m^2 + 0,30 \frac{m^3}{hm^2} * 10,92 m^2$$

daraus folgt:

$$n_{CLT} = 5,98 \frac{m^3}{hm^2}$$

Die maximal zulässige Luftdurchlässigkeit ergibt sich aus dieser näherungsweise Berechnung zu etwa 6m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, welche allerdings nur die 3-schichtigen BSP Platten alleine und nicht den gesamten Wandaufbau betrifft.

## 1.2.2 Wärmeschutz

Der Wärmeschutz von Gebäuden soll sicherstellen, dass je nach Verwendung und klimatischen Verhältnissen, die einwandfreie Nutzung in Bezug auf Energieverbrauch, Raumklima und Funktion der Konstruktion gewährleistet ist. Er betrifft die wirtschaftliche Reduktion des Energieaufwandes, um ein Gebäude seines Wesens nach, sowohl im Sommer (Kühlung) als auch im Winter (Heizung), unter einem nutzungsorientierten Raumklima zu betreiben und geht ausnahmslos mit der vorher erwähnten Luftdurchlässigkeit der umschließenden Gebäudehülle einher. In welchem Ausmaß Wärmeschutz erforderlich ist, ist sehr stark von der geplanten Nutzung und dem jeweiligen Standortklima bzw. den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Der Austausch von Wärme zwischen zwei Medien kann auf drei Arten erfolgen.

- Wärmeleitung
- Wärmestrahlung
- Wärmeströmung (Konvektion)

Auf den, bei der Konvektion zwangsläufig mit einhergehenden Feuchtetransport, wird in Kapitel 1.3.2 noch genauer eingegangen.

### 1.2.2.1 Winterlicher Wärmeschutz

Der winterliche Wärmeschutz als Teilgebiet des Wärmeschutzes umfasst primär die energetischen Wärmeverluste während der Heizperiode. Er regelt somit den Heizwärmebedarf eines Gebäudes. Dies ist jene Wärmemenge, die man dem konditionierten Volumen eines Gebäudes zuführen muss, um eine vorgegebene Solltemperatur von 20°C aufrecht zu erhalten.

Erfahrungsgemäß gilt vereinfacht nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre, dass Wärme selbstständig vom wärmeren zum kälteren Körper fließt. Wärme ist also bestrebt, einen Temperatúrausgleich herbeizuführen, bis Temperaturgleichgewicht herrscht. Im Falle des winterlichen Wärmeschutzes also Wärmeverluste von innen nach außen. Dabei unterscheiden wir zwischen Lüftungs- und Transmissionswärmeverlusten. Erstere können wie schon im Kapitel 1.2.1 besprochen, kontrolliert oder aber auch unkontrolliert sein. Transmissionswärmeverluste hängen von der Wärmedämmung der peripheren Bauteile, im speziellen von den Wärmeübergangswiderständen, vom Wärmedurchlasswiderstand der einzelnen homogenen Baustoffschichten und in weiterer Folge vom Wärmedurchgangskoeffizienten ab.

- $R_{se}$  Wärmeübergangswiderstand außen (external surface) [ $m^2K/W$ ]
- $R_{si}$  Wärmeübergangswiderstand innen (internal surface) [ $m^2K/W$ ]
- $R_i$  Wärmedurchlasswiderstand der Baustoffschicht  $i$  [ $m^2K/W$ ]
- $d_i$  Stärke der Baustoffschicht  $i$  [ $m$ ]
- $\lambda_i$  Wärmeleitfähigkeit der Baustoffschicht  $i$  [ $W/mK$ ]
- $U$  Wärmedurchgangskoeffizient [ $W/m^2K$ ]

Richtung des Wärmestroms			
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
$R_{si}$ [m <sup>2</sup> K/W]	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$ [m <sup>2</sup> K/W]	0,04	0,04	0,04

Tab. 1 Wärmeübergangswiderstände nach ÖNORM EN ISO 6946/A1

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \qquad U = \frac{1}{R_{se} + \sum R_i + R_{si}}$$

Dabei ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eines homogenen Baustoffes eine charakteristische Materialgröße die angibt, welche Wärmemenge in Watt, durch 1 Quadratmeter einer 1 Meter starken Schicht dieses Baustoffes bei einem Temperaturgefälle von 1 Kelvin hindurchgeht.

Die Wärmeübergangswiderstände der bauteilangrenzenden Luftschichten setzen sich anteilig aus Konvektion und Strahlung zusammen und hängen dabei in der Realität von mehreren Faktoren wie zum Beispiel Wind oder Einrichtung, ab. Für die Berechnung sind sie jedoch nach Tab. 1 in der ÖNORM EN ISO 6946/A1 je nach Richtung des Wärmestroms definiert.

Für das Projekt Gratkorn wurde im Punkt 12.1.1 für das Detail A, Außenwand Aufbau 6, ein U-Wert von 0,14 [W/m<sup>2</sup>K] bestimmt. Der U-Wert wurde stellvertretend für das Detail-A bestimmt, da die Außenwand den größten Flächenanteil an der Gebäudehülle besitzt. Die Außentemperatur wurde mit -10°C und die Innentemperatur mit 20°C angenommen. Dabei wurde die hinterlüftete Vorsatzschale mit einer Zuluftöffnung von  $\approx 13000 \text{ mm}^2/\text{m}$  als stark belüftete Luftschicht beurteilt. In der Berechnung wurde diese Tatsache berücksichtigt, indem an der Außenseite derselbe Wärmeübergangswiderstand wie auf der Innenseite angenommen wurde.

### 1.2.2.2 Sommerlicher Wärmeschutz

Der sommerliche Wärmeschutz gestaltet sich in seinen Zusammenhängen ein wenig komplexer als der vorab erwähnte winterliche Wärmeschutz. Hauptursache der Gefahr der sommerlichen Überwärmung ist, neben den internen betrieblichen Lasten, die solare Einstrahlung, von der ein Großteil Wärmeenergie ist. Durch Absorptionsvorgänge (Aufwärmen der Bauteile), wird die kurzwellige Strahlung, die auf die Bauteile trifft, von diesen wiederum als langwellige Strahlung in den Raum abgegeben. Dieser Effekt, der in der Heizperiode begrüßt wird, da es zu Energieeinsparungen im Bereich der Heizkosten kommt und der nebenbei für das subjektive Wohlbefinden des Menschen essentiell wichtig ist, kann in den Sommermonaten zum Kostenfaktor für aufzubringende Kühlenergie werden und Unbehagen auslösen. Abseits der Heizperiode soll nach der ÖNORM B 8110-3, welche sich gerade in Überarbeitung befindet, darauf geachtet werden, dass die Empfindungstemperatur tagsüber nicht über 27°C und in der Nacht nicht über 25°C steigt. Die Empfindungstemperatur ist hier definiert als das arithmetische Mittel aus Raumtemperatur und Oberflächentemperaturen des jeweils betrachteten Raumes.

Zu den internen Lasten, welche vorab schon kurz erwähnt wurden, zählen Elektrogeräte in jeder Form sowie künstliche Lichtquellen. Besonders Geräte der EDV (elektronische Datenverarbeitung) in Büroräumlichkeiten können extreme Wärmequellen sein. Der externen Belastung kann man planerisch, gestalterisch und mit technischen Mitteln, wie zum Beispiel mit Klimaanlage, entgegenwirken. Wobei Letzteres nur unterstützend bzw. nur dann zur Anwendung kommen sollte, wenn alle anderen Optionen ausgeschöpft sind, da diese Art der Innenklimaregulierung meist mit hohen Kosten verbunden ist und einen zusätzlichen Wartungsfaktor darstellt.

Planerisch kann man den Neigungswinkel, die Ausrichtung, die Größe und die Art des Sonnenschutzes der lichtdurchlässigen Flächen berücksichtigen, oder eventuell Akzente durch Vordächer und Vertiefungen in der Fassade setzen. Gestalterisch kann man die Fensterflächen selbst positiv verändern, indem man sie färbt oder verspiegelt, um die Immission zu verringern und die Reflexion zu erhöhen. Auch die Farbgebung der Oberflächen fließt stark ein. So absorbieren helle Farben weniger Strahlung als dunkle Farben. Wobei planerische und gestalterische Möglichkeiten sich teilweise vermischen bzw. Hand in Hand einhergehen.

Des Weiteren sollte für eine ausreichende Belüftung der Gebäude gesorgt sein, im speziellen ist hier eine funktionierende Nachtlüftung gemeint. Die Öffnungen sollten schlagregen- und einbruchssicher sein und über einen funktionierenden Insektenschutz verfügen. Die Anordnung der Lüftungsöffnungen sollte so gewählt sein, dass sie auf gegenüberliegenden Seiten des Gebäudes angeordnet sind, um die Durchlüftung der Gebäudegeometrie sicherzustellen.

Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt auf den hier noch genauer eingegangen werden soll ist die Wärmespeicherfähigkeit der raumumschließenden Außenbauteile und die Wärmespeicherfähigkeit der Innenbauteile. Innenbauteile mit einem hohen Wärmespeichervermögen verzögern die sommerliche Überhitzung des Innenraumes. Dabei sind folgende Gesetzmäßigkeiten einzuhalten: Eine ausreichende Stärke jener Bauteile, welche über ein dementsprechendes Wärmespeichervermögen verfügen, zur Speicherkapazität im Innenraum beitragen und direkten Kontakt zur Raumluft haben. Wobei die Speicherkapazität durch die Wärmeeindringtiefe, welche eine Funktion der Zeit ist, begrenzt wird. Sie liegt bei den meisten Baustoffen bei einer Periodendauer von 24 Stunden zwischen 10 und 15 Zentimetern. Weiters ist zu beachten, dass diese Bauteile nicht mit wärmedämmenden Schichten abgedeckt werden. Das bekannteste Beispiel hierfür ist sicher der Teppich oder Teppichboden.

Für das Wärmespeichervermögen der raumumschließenden Außenbauteile spielt die gewählte Bauweise eine große Rolle, nach der sich die Konstruktion bzw. Tragstruktur richtet. Wichtig ist jedoch, dass die Bauteile an der Außenseite über eine ausreichende und gute Wärmedämmung verfügen, um dämpfend wirken zu können. Damit ist im Speziellen die Temperatur-Amplitudendämpfung und die damit verbundene Phasenverschiebung gemeint. Unter Temperatur-Amplitudendämpfung ist der reziproke Wert des Temperatur-Amplituden-Verhältnisses (TAV) zu verstehen, nämlich das Verhältnis der Temperaturamplitude an der Außenseite des Bauteils zur Temperaturamplitude an der Innenseite des Bauteils.



### 1.2.3 Feuchteschutz

Unter Feuchteschutz im Bereich der Bautechnik versteht man alle konstruktiven Maßnahmen um Bauwerke vor schädigenden Feuchtigkeitseinflüssen zu schützen. Dies betrifft als Einwirkungen von außen:

- Meteorwässer wie, Regen, Nebel, Schnee, Eis,
- Luftfeuchtigkeit
- Bodenfeuchtigkeit, Grundwasser, Stauwasser

und als Einwirkungen von innen:

- Wasser aus Nasszellen wie Bad, Küche oder Toilette
- Reinigungswasser
- Baufeuchte infolge von Baumaßnahmen
- Wasserdampf aus der Nutzung wie Haushalt und Körperpflege
- Kondensat, das sich an kühleren Oberflächen sammelt
- Tauwasser, das in der Konstruktion ausfällt.

Bei Tauwasser in der Konstruktion spricht die ÖNORM B 8110-2 von nicht schädlicher- und schädlicher Kondensation. Von nicht schädlichem Kondensat ist die Rede, wenn sich zwar Feuchtigkeit in sehr geringen Mengen in der Konstruktion sammelt, dieser Vorgang sich aber aufgrund der Klimaveränderung innerhalb eines Jahres, in einer für die Konstruktion positiv wirkenden Zeitspanne wieder umkehrt und keine nachhaltigen Schädigungen hinterlässt. Es findet also als Funktion der Zeit, ein ständiger Wechsel aus Adsorption und Desorption statt, bei dem die Porosität der Baustoffe eine Rolle spielt. Wenn dieser besagte Wechsel die Konstruktion nachhaltig schädigt, spricht der Fachmann von schädlicher Kondensation.

In der ÖNORM B 8110-2 sind 3 Kriterien festgelegt welche einen Bauteil in Bezug auf schädliche- bzw. nicht schädliche Kondensation beurteilen.

- 1) Es wird zu keinem Zeitpunkt des Jahres an irgendeiner Grenzfläche des Bauteils eine Kondenswasserbildung vorhergesagt.
- 2) Es kommt zu einer Kondenswasserbildung an einer oder mehreren Grenzflächen, jedoch wird bei jeder betroffenen Grenzfläche die vollständige Verdunstung des Kondenswassers über sie Sommermonate vorhergesagt. Dabei sind aber folgende Anforderungen nachzuprüfen:
  - a) kann die anfallende Kondenswassermenge von der betroffenen Bauteilschicht gespeichert werden, wobei die Kondenswassermenge an Berührungsflächen von kapillar nicht oder wenig aufnahmefähigen Schichten  $\leq 500\text{g/m}^2$  sein muss.
  - b) wird durch den erhöhten Feuchtigkeitsgehalt der betroffenen Baustoffschicht die Wärmeleitfähigkeit dermaßen erhöht, dass es zu einer Schädigung des Bauteils kommt oder der Wärmeschutz des Bauteils eine Verminderung von  $\geq 10\%$  erfährt.

- c) kann durch den erhöhten Feuchtigkeitsgehalt die betroffene Baustoffschicht oder der betroffene Bauteil eine Schädigung erfahren, wobei bei Holz und Holzwerkstoffen eine Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig ist.
- 3) Es kommt zu einer Kondenswasserbildung an einer oder mehreren Grenzflächen, welcher über die Sommermonate eine unvollständige Verdunstung vorhergesagt wird. In diesem Fall kommt es zu einer fortschreitenden Durchfeuchtung der Baustoffschicht bzw. des Bauteils, welche über mehrere Jahre auftreten und zu Schäden führen kann.

Der Feuchtigkeitsgehalt von Baustoffen beeinflusst ihre Wärmeleitfähigkeit positiv und gleichzeitig ihr Wärmedämmverhalten negativ. Damit ist gemeint, je feuchter ein Baustoff ist, desto höher wird seine Wärmeleitfähigkeit und umso schlechter werden seine wärmedämmenden Eigenschaften. Voraussetzung dafür ist, dass der Baustoff in der Lage ist, Feuchtigkeit aufzunehmen. In Bezug auf schlechtes Kondensat wirkt dieser Vorgang mathematisch positiv was bedeutet, dass die Durchfeuchtung als Funktion der Zeit ein annähernd exponentielles Wachstum erfährt.

Um das Eindringen von Feuchtigkeit in Bauteile, oder besser gesagt in die Konstruktion zu verhindern, werden Dampfbremsen und Dampfsperren an der belasteten Seite der Konstruktion angebracht. Diese sind sehr aufwendig herzustellen und stellen einen beträchtlichen Kostenfaktor dar. Die Frage, die sich der aufmerksame Leser nun stellt ist, wann habe ich kein, oder nicht schädliches Kondensat und damit eine funktionierende Konstruktion und wann schädliches Kondensat und damit einen Bauschaden. Speziell im Holzbau ist diese Frage von essentieller Bedeutung, da einige Holzarten sehr sensibel auf Feuchtigkeit reagieren.

Weiters haben Feuchtespeichereffekte nicht nur Auswirkung auf die Wärmeleitfähigkeit und das Wärmedämmverhalten, sondern im speziellen Fall des Holzes, auch auf die mechanischen Eigenschaften. Holz besitzt die Fähigkeit, Feuchtigkeit nicht nur kapillar, sondern auch hygroskopisch zu speichern. Dauerhafter und übermäßiger Feuchteintrag, ohne Austrocknungsphasen, fügt dem Material teilweise irreparable Schäden zu.

### 1.3 Bauphysik spezifisch

Aber wodurch kommt es überhaupt zu einem Feuchteeintrag in die Konstruktion und mit welchen physikalischen Gesetzen haben wir es in dem Zusammenhang zu tun?

Nun, zum Einen wäre da die **kapillare Leitung**, welche sich so darstellt, das Wasser im flüssigen Aggregatzustand von saugfähigem Material sozusagen aufgesogen (adsorbiert) wird. Verantwortlich dafür sind die Adhäsionskräfte zwischen den Flüssigkeitsmolekülen und den Molekülen des Materials, welches die Hohlräume oder Rohrleitungen bildet. Voraussetzung dafür ist, dass diese Hohlräume oder Rohrleitungen sehr klein bzw. dünn sind. Die Kapillarität zieht Wasser von außen in die Konstruktion oder verteilt es, im Falle von Tauwasserausfall in der Konstruktion.

Weiters wäre da noch die **Konvektion**. Sie wird beschrieben als der Wärmeübergang beim Vorbeiströmen eines Mediums auf ein anderes Medium. In unserem Fall ist dies nur in Bezug auf Gase und Festkörper von Bedeutung. Wenn also als Gas, oder besser gesagt als Gasgemisch, Luft die Konstruktion durchströmt, wird Wärmeenergie zwischen den Medien ausgetauscht. Dies geschieht immer vom wärmeren zum kälteren Medium. Die Luftmoleküle streichen beim Durchströmen der Konstruktion an der Oberfläche vorbei und übertragen dabei einen Teil ihrer Bewegungsenergie auf die Moleküle des Festkörpers. Ob überhaupt Konvektion stattfindet hängt ab von den Druckverhältnissen zwischen der einen und der anderen Seite des Bauteils und von Dichteunterschieden infolge von Temperaturunterschieden des durchströmenden oder vorbeiströmenden Gases.

Abschließend kommt noch die **Wasserdampfdiffusion** dazu. Sie ist physikalisch gesehen ein Transportvorgang aufgrund eines Konzentrations- bzw. Dampfteildruckgefälles des Wasserdampfes, was so viel bedeutet, dass der in der Luft enthaltene Wasserdampf in Richtung des Druckgefälles wandert. Bestehen Druckunterschiede eines Gases in verschiedenen Ebenen, so ist es bestrebt, diese auszugleichen. Bei diesem Vorgang kann es zur Tauwasserausfall infolge des Zusammenspiels eines Temperaturgefälles und der vorhandenen Luftfeuchtigkeit kommen.

#### 1.3.1 Das Element Wasser

Nachdem das Element Wasser in seinen verschiedenen Aggregatzuständen in diesem Kapitel im Mittelpunkt steht, soll darauf vorab noch ein wenig genauer eingegangen werden. Wasser spielt in der Physik eine sehr große Rolle. Seine ungewöhnlichen physikalischen Eigenschaften haben ihren Ursprung in seiner ganz speziellen chemischen Zusammensetzung. Wasser ist der berühmteste Vertreter der Dipolmoleküle, was bedeutet, dass das Wassermolekül unsymmetrisch aufgebaut ist und polare Atombindungen vorhanden sind. Dabei fallen die Ladungsschwerpunkte der positiven und negativen Partialladungen nicht zusammen und können sich somit auch nicht ausgleichen. Aufgrund ihrer Dipol-Wechselwirkung ziehen sich Wassermoleküle an und bilden mit einem Sauerstoffmolekül eine relativ starke Bindung, wobei bei diesem Vorgang auch noch die Atombindung mitwirkt.

Wichtig ist für die weiteren Zusammenhänge, dass aufgrund dieser physikalischen Eigenschaften die ihren Ursprung in der chemischen Zusammensetzung haben, Wasser auf einige Stoffe anziehend wirkt und auf andere eher abstoßend. Wasserfreundlich wird als **hydrophil** und wasserabstoßend als **hydrophob** bezeichnet. Diese Eigenschaft kann man sich im Bauwesen durchaus zu Nutze machen. In nachstehender Tabelle einige spezifische Eigenschaften bzw. Bedingungen von Wasser, aus dem Lehrbuch der ETH Zürich, mit dem Titel „*Bauphysik, Bau und Energie, Leitfaden für Planung und Praxis*“, von den Autoren Univ.-Prof. DI Dr. Christopf Zürcher und DI Thomas Frank.

Eigenschaften bzw. Bedingungen	Aggregatzustand	Temperatur [C°]	Werte	Einheit
Dichte	gasförmig	20	0,80	[kg/m <sup>3</sup> ]
	flüssig	4	1000	
	fest	0	917	
Spezifische Wärmekapazität	gasförmig	20	1,84	[kJ/kgK]
	flüssig	20	4,18	
	fest	0	2,09	
Wärmeleitfähigkeit	gasförmig	100	0,105	[W/mK]
	flüssig	20	0,59	
	fest	0	2,22	
Verdampfungs- bzw. Kondensationswärme	flüssig	20	2480	[kJ/kg]
	flüssig	0	2500	
	fest	0	2834	
Schmelzwärme		0	334	[kJ/kg]
Mittlere Geschwindigkeit	gasförmig	20	590	[m/s]
Mittlere freie Wellenlänge	gasförmig	20	40	[nm]
Gaskonstante	gasförmig	-	0,46	[kJ/kgK]

Tab. 2 Physikalische Kenngrößen von Wasser in seinen Aggregatzuständen

### 1.3.2 Feuchtetransport durch Konvektion

Wie Eingangs schon erwähnt, findet Konvektion nur statt, wenn Druckunterschiede zwischen der einen und der anderen Seite des Bauteils vorhanden sind und wenn Dichteunterschiede infolge Temperaturunterschieden beim durchströmenden oder vorbeiströmenden Gas auftreten. Grundvoraussetzung ist natürlich auch eine dementsprechende Luftundichtigkeit des zu durchströmenden Bauteils, welche in Kapitel 1.2.1 schon ausführlich behandelt wurde. Wobei hier in weiterer Folge nur das Durchströmen der Luft und der damit einhergehende Feuchtetransport von Interesse sind.

#### 1.3.2.1 Dichte und Gewicht von Luft in Abhängigkeit des Luftdrucks

Luft hat ein Gewicht. Stellt man sich nun eine Luftsäule vor, so reicht diese vom betrachteten Standort bis in die Erdatmosphäre. Der Luftdruck an diesem betrachteten Standort ist der hydrostatische Druck der Luft. Er entsteht aufgrund der Gewichtskraft der Luftsäule. Der Luftdruck auf Normalnull, das heißt auf Meereshöhe beträgt Normgemäß 1013hPa.

$$1000hPa = 1bar = 1atm = 0,10 \frac{N}{mm^2}$$

In der Natur aber ändert sich der Luftdruck durch unterschiedliche Wettereinflüsse und kann im Bereich von 890 bis 1080hPa schwanken. Bei einer Temperatur von 21°C und einem barometrischen Druck von 1013hPa beträgt die Normdichte von Luft 1,20kg/m<sup>3</sup>.

Die Dichte der Luft lässt sich wie folgt berechnen:

$$\rho_{Luft} = \frac{p_0}{287 * (T + 273)}$$

- $\rho_{Luft}$  Dichte der Luft in [kg/m<sup>3</sup>]
- $p_0$  der Umgebungsluftdruck in [Pa]
- 287 die spezifische Gaskonstante für trockene Luft in [J/kgK]
- 273 273 [K] = 0 [°C]
- T vorhandene Lufttemperatur [°C]

In der unten angeführten Tabelle ist die Dichte der Luft für einige Fälle angeführt.

Lufttemperatur [°C]	$\rho_{Luft}$ [kg/m <sup>3</sup> ]		
	89000 [Pa]	101300 [Pa]	108000 [Pa]
-20	1,226	1,395	1,487
-10	1,179	1,342	1,431
0	1,136	1,293	1,378
10	1,096	1,247	1,330
20	1,058	1,205	1,284
30	1,023	1,165	1,242
40	0,991	1,128	1,202
50	0,960	1,093	1,165

Tab. 3 Luftdichte in Abhängigkeit von Temperatur und Druck

Die Druckverteilung an der Außenseite eines Bauwerkes wird in erster Linie von den vorherrschenden Windverhältnissen beeinflusst, welche an der Außenfassade eine sehr komplexe Aufteilung von Über- und Unterdruckzonen erzeugen. Je höher ein Gebäude wird, umso höher werden auch die Winddruck- und Windsogbelastungen, die ein solches Druckfeld beeinflussen.

Wenn nun die Einwirkung des Windes vorab vernachlässigt wird, kann die Lufttemperatur und der Luftdruck an der Außen- und Innenseite als konstant angenommen werden, um so die Dichtedifferenz der Luft außen und innen zu erhalten. Dabei gilt folgende Formel:

$$\Delta\rho = (\rho_{au\ddot{a}}\text{u}\ddot{a}\text{u}\ddot{a}\text{e}n - \rho_{i\text{n}\text{n}\text{e}\text{n}}) = \frac{\rho_0}{287} \times \left[ \frac{1}{T_{au\ddot{a}}\text{u}\ddot{a}\text{u}\ddot{a}\text{e}n + 273} - \frac{1}{T_{i\text{n}\text{n}\text{e}\text{n}} + 273} \right]$$

- $\Delta\rho$  Dichtedifferenz zwischen außen und innen in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- $\rho_0$  Luftdruck, außen und innen konstant in  $[\text{Pa}]$
- 287 die spezifische Gaskonstante für trockene Luft in  $[\text{J}/\text{kgK}]$
- 273 273  $[\text{K}] = 0 \text{ } [^\circ\text{C}]$
- $T_{\text{außen}}$  Außentemperatur in  $[\text{ }^\circ\text{C}]$
- $T_{\text{innen}}$  Innentemperatur in  $[\text{ }^\circ\text{C}]$

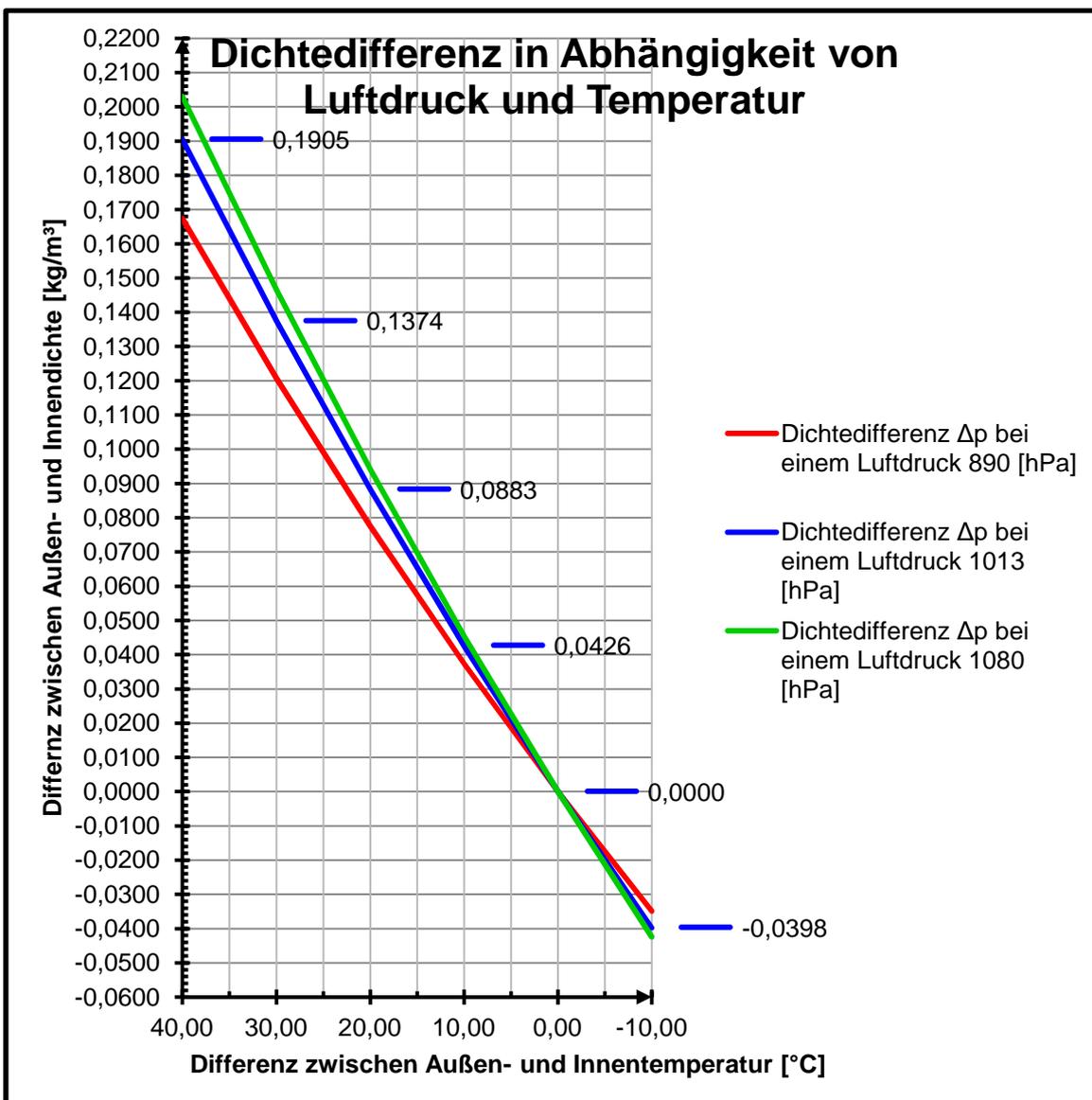


Abb. 1 Dichtedifferenz in Abhängigkeit von Luftdruck und Temperatur

In Abbildung 1 wurde die Dichtedifferenz zwischen außen und innen berechnet und mit Hilfe eines Diagramms veranschaulicht. Dabei wurde jeweils die Innentemperatur mit 20°C und der Luftdruck in drei Fällen mit 890, 1013 und 1080hPa als konstant angenommen. Hier zeigt sich, dass zum Beispiel bei einer Außentemperatur von -10°C, einer Innentemperatur von 20°C (=> Temperaturdifferenz 30°C) und einem Luftdruck von 1013hPa die Innenluft eine geringere Dichte von 0,1374kg/m<sup>3</sup> aufweist.

In dieser vereinfachten Berechnung wurde die relative Luftfeuchtigkeit nicht berücksichtigt. In dem Wissen, dass die molare Masse von trockener Luft ca. 29g/mol und die molare Masse von Wasserdampf ca. 18g/mol ist, kann man darauf schließen, dass mit Wasserdampf angereicherte, also feuchte Luft leichter als trockene ist und daher aufsteigt.

Wenn nun eine relative Luftfeuchtigkeit der Innenluft von 55% bei 20°C und der Außenluft von 80% bei -10°C angenommen wird, so erreicht die Innenluft, wenn sie abkühlt bei 10,70°C eine relative Luftfeuchte von 100%, bei einem Sättigungsdampfdruck von 1288Pa (≡ 12,88mbar) und einer absoluten Feuchte von 9,52g/m<sup>3</sup>.

Der Schluss, den man daraus ziehen kann ist, dass die leichtere Luft aus dem Innenraum durch eine Luftundichtigkeit der Außenwand nach außen drängt. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde zwar in der vereinfachten Berechnung nicht berücksichtigt, aber aus den vorab erwähnten Erläuterungen kann man schließen, dass durch das Abkühlen der Innenluft auf ihrem Weg nach draußen der Effekt noch verstärkt wird.

### 1.3.2.2 Druckverteilung an der Gebäudefassade infolge Wind

Im vorigen Kapitel wurde der Wind für die vereinfachte Berechnung in Abbildung 1 vernachlässigt. Nichts desto trotz kann der Wind ein Vielfaches an Unter- oder Überdrücken an der Außenfassade annehmen, im Gegensatz zu den thermischen Auftriebsdrücken, die in Kapitel 1.3.2.1 besprochen wurden. Die Strukturen der Winddruck- und Windsogfelder kann sehr komplex sein und durch die Form und Gestaltung der Fassaden bzw. Gebäude unerwartete Formen und Werte annehmen. In der Regel kann aber davon ausgegangen werden, dass an der dem Wind zugewandten Seite (luv) ein Überdruck und an der dem Wind abgewandten (lee) ein Unterdruck entsteht.

Je nach Form und Gestaltung des Daches kommt es dort sowohl zu Unter- als auch zu Überdrücken. Speziell die Dachneigung hat einen starken Einfluss auf die unterschiedlichen Druckverhältnisse. Aus Erfahrung weiß man, dass bei Dächern mit einer Neigung  $\leq 15,00^\circ$  die Sogkräfte dominieren, wohin gegen bei Dächern mit einer Neigung von  $\geq 30,00^\circ$  an der windzugewandten Seite Druckkräfte und an der windabgewandten Sogkräfte entstehen.

Welche Kräfte wo und in welcher Höhe entstehen kann mit Sicherheit nur in einem Modellversuch ermittelt werden. Es gibt auch numerische Lösungen, diese sind aber stark von der Annahme der Randbedingungen und der Modellparameter abhängig und stellen einen hohen Rechenaufwand dar. Hier soll mit einem sehr vereinfachten Ansatz die Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenraum ermittelt werden, um eine Vorstellung zu bekommen, inwieweit der Effekt des Druckunterschiedes bei bauphysikalischen Berechnungen berücksichtigt werden muss.

Um die Druckverhältnisse qualitativ zu erfassen wird hier die Bernoulli Gleichung benutzt (Gleichung entlang einer Stromlinie). Die Bernoulli Gleichung kann auch als Energiesatz der verlustfreien Strömung betrachtet werden. Sie ist die Summe der kinetischen Energie pro Masseneinheit ( $v^2/2$ ), der potentiellen Energie pro Masseneinheit ( $g \cdot z$ ) und Strömungsenergie pro Masseneinheit ( $p/\rho$ ). Dabei bedeuten:

- $v$  die Strömungsgeschwindigkeit in [m/s]
- $g$  die Erdbeschleunigung in [m/s<sup>2</sup>]
- $z$  die geodätische Höhe in [m]
- $p$  der Umgebungsdruck in [N/m<sup>2</sup>]
- $\rho$  die Dichte des Fluides in [kg/m<sup>3</sup>]

Weiters sind folgende Annahmen zu treffen:

- die Strömung ist laminar, ungestört und längs zum Hindernis ausgerichtet.
- die Bernoulli Gleichung gilt vereinfacht für reibungsfreie, barotrope Fluide (ideale Flüssigkeiten).
- Grenzschichteffekte, wie Reibung bei der mechanische Energie in Wärme umgewandelt wird bleiben unberücksichtigt.
- die Luft wird als inkompressibel angenommen. Dies entspricht zwar nicht den Tatsachen, aber bei den vorhandenen Geschwindigkeiten ist es hinreichend genau.

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} + g \cdot z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2} + g \cdot z_2$$

Durch Umformen der Gleichung, der Tatsache dass die geodätische Höhe ident ist und die Strömungsgeschwindigkeit  $v_2$  beim Auftreffen der ungestörten laminaren Strömung auf das Hindernis annähernd den Wert 0,00m/s annimmt, vereinfacht sich die Gleichung folgendermaßen: Dabei ist noch zu erwähnen, dass hier vereinfachend die Dichtedifferenz zwischen Innen- und Außenluft vernachlässigt wird. Daraus folgt,  $\rho_1$  ist gleich  $\rho_2$ .

$$\frac{\rho_1 \cdot v_1^2}{2} + p_1 = p_2$$

$$\Delta p = \frac{\rho_1 \cdot v_1^2}{2} = p_2 - p_1$$

- $\Delta p$  die positive mittlere Druckdifferenz in [N/m<sup>2</sup>]

Aus der ÖNORM EN 1991-1-4 wurde die Basiswindgeschwindigkeit für den Raum Graz mit 20,40m/s ermittelt. Die Basiswindgeschwindigkeit ist definiert als Mittelwert, der 10-minütigen Windgeschwindigkeit, mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren. Dieser Wert ist windrichtungs- und jahreszeitenunabhängig und als reiner Bezugswert anzusehen. Aus Tabelle 3 wurde die Dichte der Luft bei einer Temperatur von -10°C und einem Luftdruck von 1013hPa mit 1,342kg/m<sup>3</sup> entnommen. Mit diesen Werten kann nun die Druckdifferenz bestimmt werden.

$$\Delta p = \frac{1,342 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] + 20,40^2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{2} = 208,751 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \equiv 208,751 \text{Pa} \equiv 2,10 \text{hPa} \equiv 0,0021 \text{bar}$$

Die aus dieser vereinfachten Berechnung ermittelte Druckdifferenz stellt sowohl für die Bereiche die einem Winddruck ausgesetzt sind, als auch für jene Bereiche an denen Windsog auftritt, einen annehmbaren Rechenwert dar. Dabei sollte beachtet werden, dass diese Art der Berechnung eine sehr vereinfachte Annäherung der Wirklichkeit darstellt und für etwa 4-stöckige Gebäude in vorstädtischen bzw. städtischen Gebieten Anwendung finden darf. Des Weiteren sei noch erwähnt, dass Wind in unseren Breiten kein ständiges Ereignis ist.

Im Windsogbereich findet also im Bereich von eventuellen Luftundichtigkeiten aufgrund einer Luftdruckdifferenz von etwa 2,10hPa, eine Luftströmung von innen nach außen statt, welche das Bestreben hat, den Druckunterschied auszugleichen.

### 1.3.2.3 Luftdruckdifferenz durch thermischen Auftrieb im Gebäude

Thermischer Auftrieb ist ein Phänomen, das bei Dichteunterschieden auftritt. Der **Auftriebsdruck** entsteht also per Definition, wenn die Dichte in einer stehenden Luftsäule geringer ist, als die Dichte der die Luftsäule umgebenden Luft. Über die Gebäudehöhe entsteht dadurch also ein Druckanstieg. Eine nicht geringe Rolle dabei, spielt die Temperatur und die Höhe der Luftsäule. Um ein **Druckprofil** eines Gebäudes anzufertigen, benötigt man eine Reihe an Informationen.

Wärmequellen im Gebäude beeinflussen die Temperatur und damit auch den Auftriebsdruck. Dabei tragen Wärmequellen, die sich in den untersten Etagen eines Gebäudes befinden, mehr zur Druckerhöhung bei, als jene die sich in den obersten Etagen befinden. Auch die Luftzufuhr und die Abluft eines Bauwerks spielen eine wesentliche Rolle.

Es empfiehlt sich, als erstes ein Temperaturprofil des Gebäudes anzufertigen, welches von der Lage der Wärmequellen und den Zuluftöffnungen abhängig ist. Dies geschieht in der Regel durch Messdaten und in weiterer Folge durch Zonenmodelle über die Raumhöhe. Durch die Integration der Dichtedifferenz  $\Delta \rho$  in [kg/m<sup>3</sup>], die in Kapitel 1.3.2.1 schon ausführlich besprochen wurde, erhält man aus dem Temperaturprofil das Druckprofil.

$$\Delta p_{hi} = g * \int_{h_0}^{hi} \Delta \rho(h) * dh$$

- $g$  die Erdbeschleunigung in [m/s<sup>2</sup>]
- $h_0$  das Bodenniveau des Bauwerkes in [m]
- $h_i$  zu berechnende Höhe in [m]
- $\Delta p_{hi}$  der Druck in der Höhe  $h_i$  in [N/m<sup>2</sup>]
- $\Delta \rho(h)$  Dichtedifferenz zwischen außen und innen in [kg/m<sup>3</sup>]
- $p_0$  Versatzdruck in [N/m<sup>2</sup>]

Vorerst ist die absolute Lage des Druckprofils unbekannt. Um die Massen- und Energiebilanz des Bauwerkes zu erfüllen muss es mit einem Versatzdruck  $p_0$  angepasst werden, welcher anschließend zu  $\Delta p_{hi}$  addiert wird. Die Anpassung des Druckprofils geschieht in der Regel iterativ.

### 1.3.3 Feuchtetransport durch Diffusion

Wie schon einführend in Kapitel 1.3 erwähnt gilt nach dem Fick'schen Gesetz, dass Bereiche unterschiedlichen Wasserdampfpartialdruckes bestrebt sind, einen Druckausgleich herbei zu führen. Dabei findet ein Massenstrom der Wasserdampfmoleküle in Richtung geringerer Konzentration statt, welcher mit steigender Temperatur und fallendem Luftdruck zunimmt.

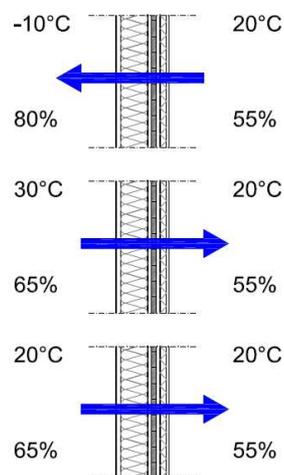


Abb. 2 Diffusion in Abhängigkeit von Temperatur und Partialdruckgefälle

Die sogenannte Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  [-], ist der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient  $\delta$  von Luft im Verhältnis zum Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient  $\delta$  des betrachteten Baustoffes. Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient  $\delta$  gibt an, wie viel Wasserdampf in [kg], pro Stunde, bei einem Druckunterschied von 1Pa, durch 1m eines Stoffes hindurchgeleitet wird. Daraus ergibt sich, dass für eine Luftschicht  $\mu=1,00$  gilt. Je größer die Zahl  $\mu$ , desto dampfdichter ist der Baustoff.

Die Dampfdurchlässigkeit von Baustoffen wird im Verhältnis zu einer äquivalenten ruhenden Luftschicht bei gleicher Temperatur angegeben. Sie gibt an, wievielfach eine Luftschicht als der betrachtete Baustoff sein muss, um dem Wasserdampf den gleichen Widerstand entgegenzusetzen. Daraus ergibt sich dann der  $s_d$ -Wert. Er ist das Produkt aus der  $\mu$ -Zahl, des betrachtenden Baustoffes und dessen Dicke in [m] in Richtung der Diffusion.

- $\mu$  Dampfdiffusionswiderstandszahl [-]
- $s_d$  wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]
- $d$  Dicke des Baustoffes in [m]

$$s_d = \mu * d$$

## 2 PLANUNG

### 2.1 Detailplanung

Im Zuge der Polierplanung der Wohnanlage im Ortsgebiet von Gratkorn, wurde auch die Detailplanung gemacht. Als Grundlage wurden 7 Außendetails ausgewählt, von denen in weiterer Folge 3 mit WUFI2D-3 berechnet wurden.

Detail A stellt den Außenwandaufbau dar, der sich bis auf die Außenschale, überall gleich gestaltet. Detail B behandelt den Anschluss des Erdgeschosses an das Kellergeschoss, also den Übergang der BSP-Außenwand auf die Stahlbetonkonstruktion des Kellers. Detail C und Detail D behandeln beide den Dachanschluss an die Außenwand. Wobei bei C, der Schnitt quer zur Tragrichtung der Dachplatten geführt wird und bei D längs. Das Detail D schließt auch noch den Dachüberstand im Bereich des Balkons mit ein.

Die Details E und F stellen den Geschossüberstand beim Übergang vom Erdgeschoss zum Obergeschoss dar. Dabei unterscheidet sich das Detail F, durch die weiterlaufende Deckenplatte, die die KFZ-Abstellplätze überdacht. Das Detail G ist ein Querschnitt der Erdgeschossdecke, der den Dachaufbau über dem Erdgeschoss, mit Anschluss an das Obergeschoss abbildet, welcher sich durch die Entkoppelung der Obergeschosse der Wohneinheiten ergibt.

Das Versuchsmodell wurde, wie im nächsten Kapitel beschrieben, an das Detail F angenähert, da hier die weiterlaufende Deckenplatte, in Bezug auf die Mess- und Berechnungsergebnisse von Interesse war. Die in Kapitel 1 aufgearbeiteten Grundlagen, sollen in weiterer Folge, nicht nur zum Verständnis der Berechnungs- und Messergebnisse beitragen, sondern auch die Komplexität und das Zusammenwirken der verschiedenen Vorgänge, die sich aus den in Kapitel 1 erwähnten Effekten ergeben, beschreiben.

### 3 VERSUCHSAUFBAU

#### 3.1 Versuchsmodellplanung

In Anlehnung an das Detail F des Projektes Gratkorn wurde das Versuchsmodell so durchdacht und geplant, dass es für möglichst viele Details Anwendung findet und optimal in die Differenzdruckklimakammer eingebaut werden kann.

Das Modell hat eine Höhe von 2,46 m, eine Breite von 0,95 m und eine Tiefe von 0,389 m bis 2,094 m. Die variierende Tiefe resultiert einerseits aus der Wandstärke und andererseits aus dem Deckenüberstand an der Innen- und Außenseite. Der genaue Schichtaufbau ist den Detailplänen zu entnehmen.

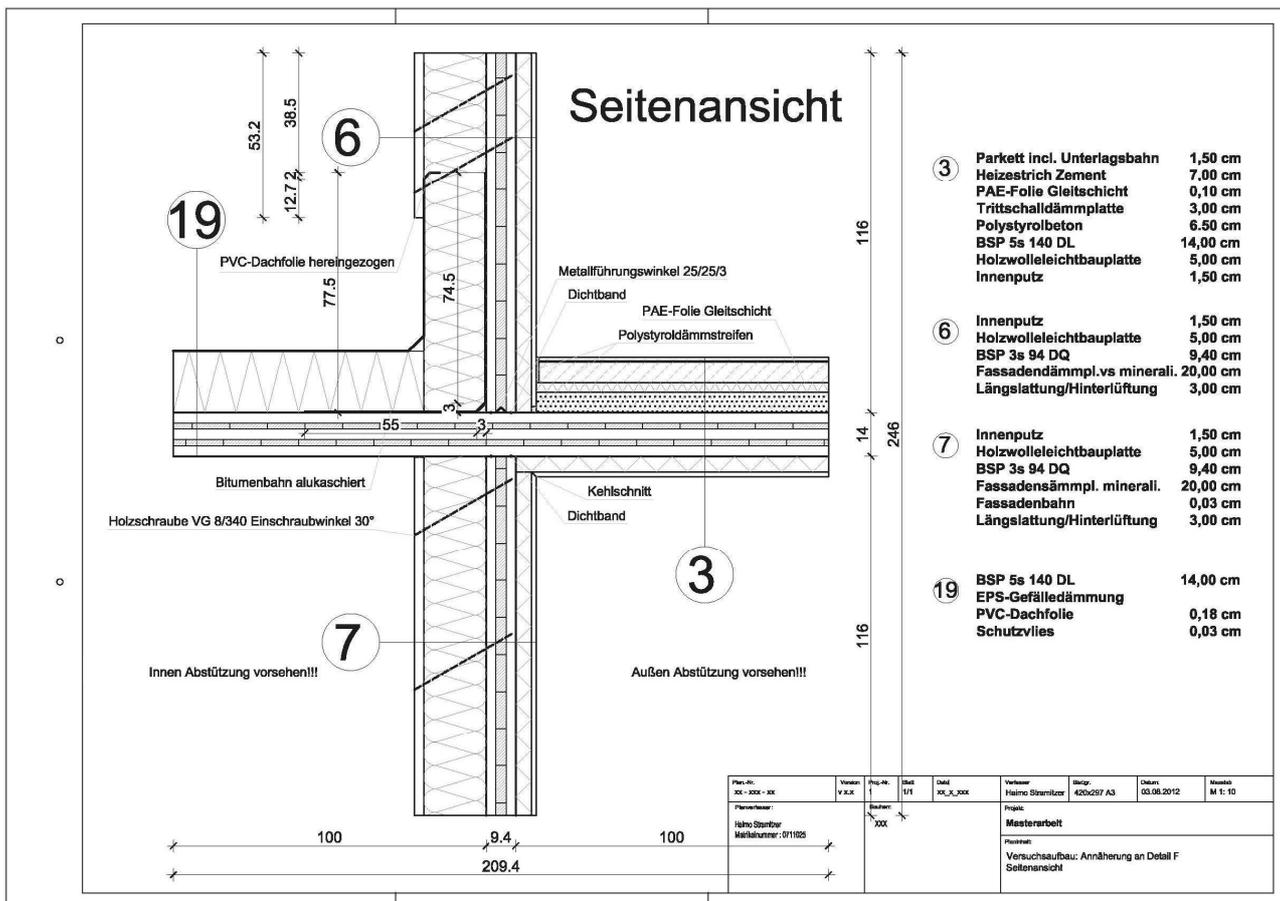


Abb. 3 Planung Seitenansicht des Versuchsmodells

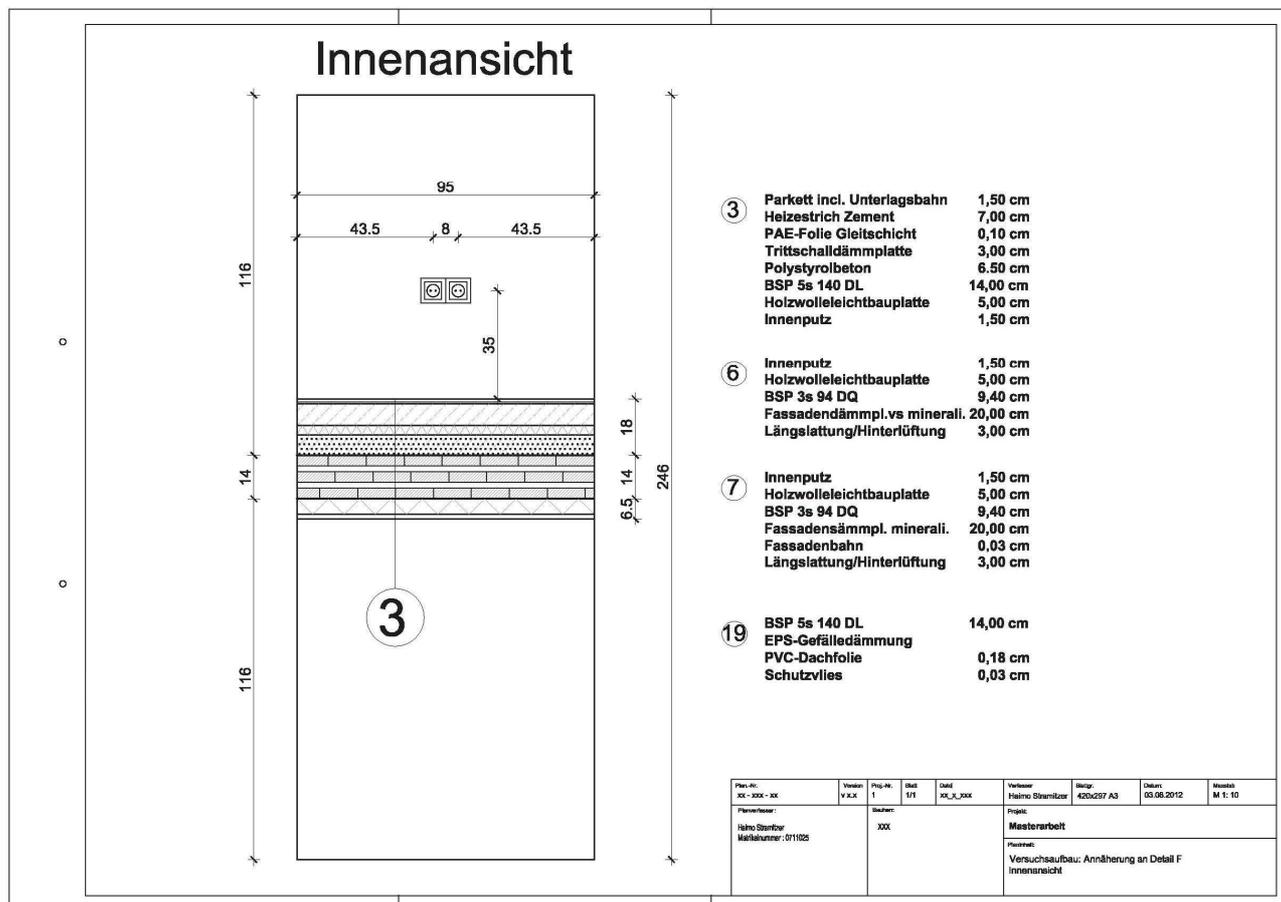


Abb. 4 Planung Innenansicht des Versuchsmodells

An der Innenseite des Versuchsmodells wurde in die Obergeschosswand eine Doppelsteckdose eingebaut. Die Leerverrohrung für die Leitungsführung wurde ebenfalls in der Installationsebene der Wand nach unten und dann auf der Deckenplatte bis ans Deckenende weitergeführt, um festzustellen, ob es im Bereich von derartigen Einbauten in Außenwänden zu einem erhöhten Feuchteintrag in die BSP-Platte kommt.

In der Detailplanung wurde auch schon die Anordnung der Messpunkte und ihre Verteilung über das Versuchsmodell überlegt. Wobei der Schwerpunkt, wie aus den nachfolgenden Abbildungen ersichtlich ist, im Bereich der Deckenplatte angeordnet wurde, da in diesem Bereich die größten Veränderungen in Bezug auf Temperatur und Feuchte zu erwarten waren.

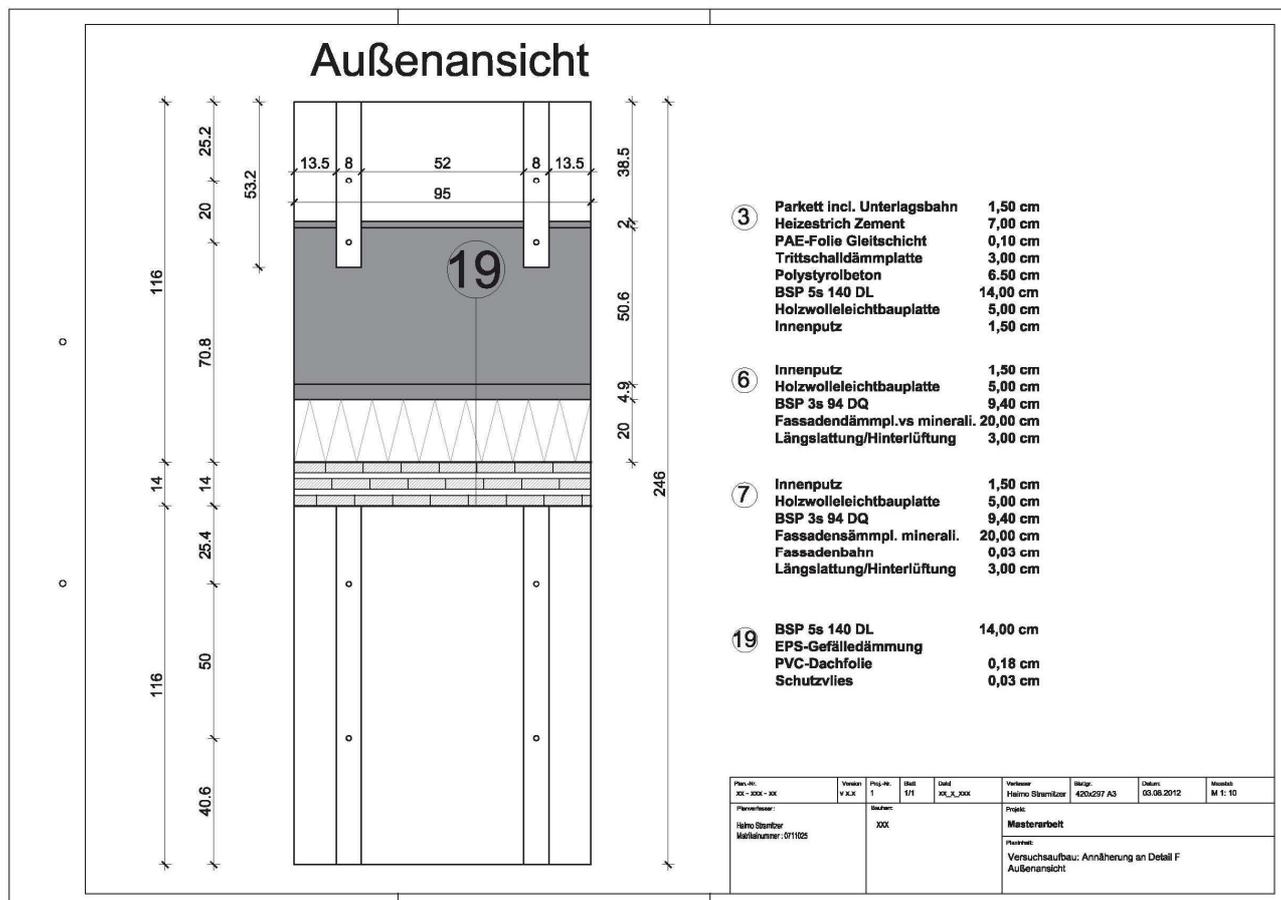


Abb. 5 Planung Außenansicht des Versuchsmodells

Die Wände bestehen aus 3-schichtigen BSP-Platten (DQ 3s 30/34/30) mit einer Stärke von 94 mm und die Deckenplatte aus einer 5-schichtigen BSP-Platte (DL 5s 34/19/34/19/34) mit einer Stärke von 140 mm. Die Verklebung erfolgte mit einem 1 K-PUR Klebstoff im hydraulischen Flächenpressverfahren mit einem Pressdruck von 6,00 kg/cm<sup>2</sup>.

Der Klebstoffauftrag erfolgte automatisiert und flächendeckend und beträgt 0,20 kg/m<sup>2</sup>. Auf die Seitenflächen wurde kein Klebstoff aufgetragen. Teilweise Verklebung der Seitenflächen kommt also nur durch überschüssigen Klebstoff zustande.

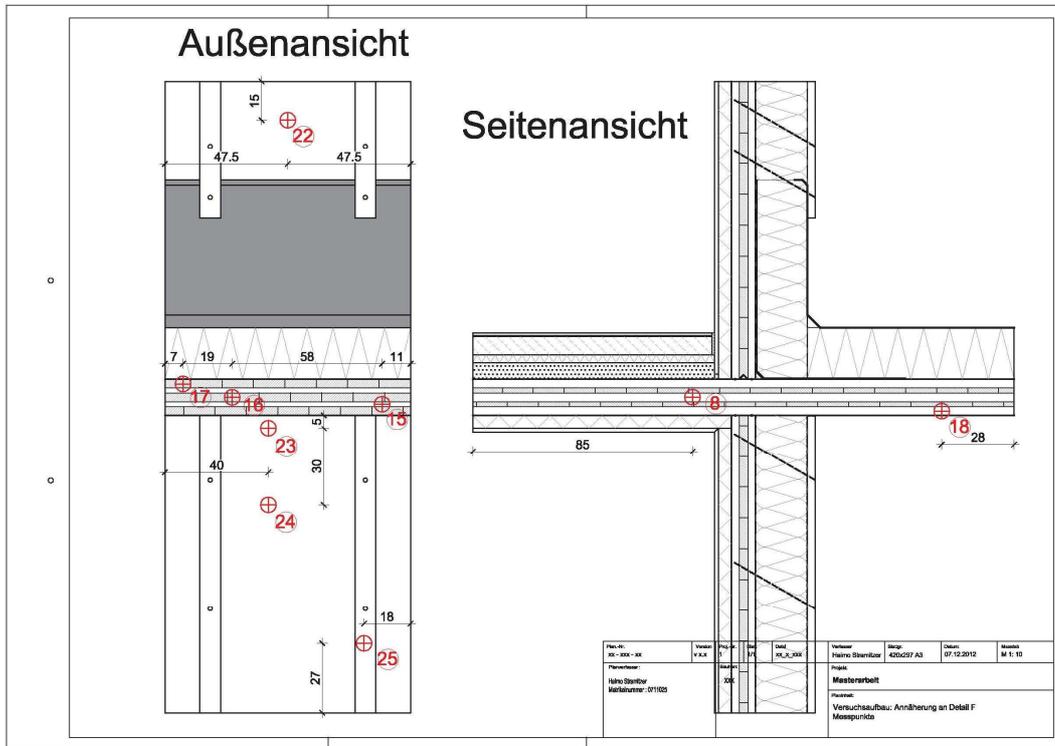


Abb. 6 Messpunktanordnung Plan 1

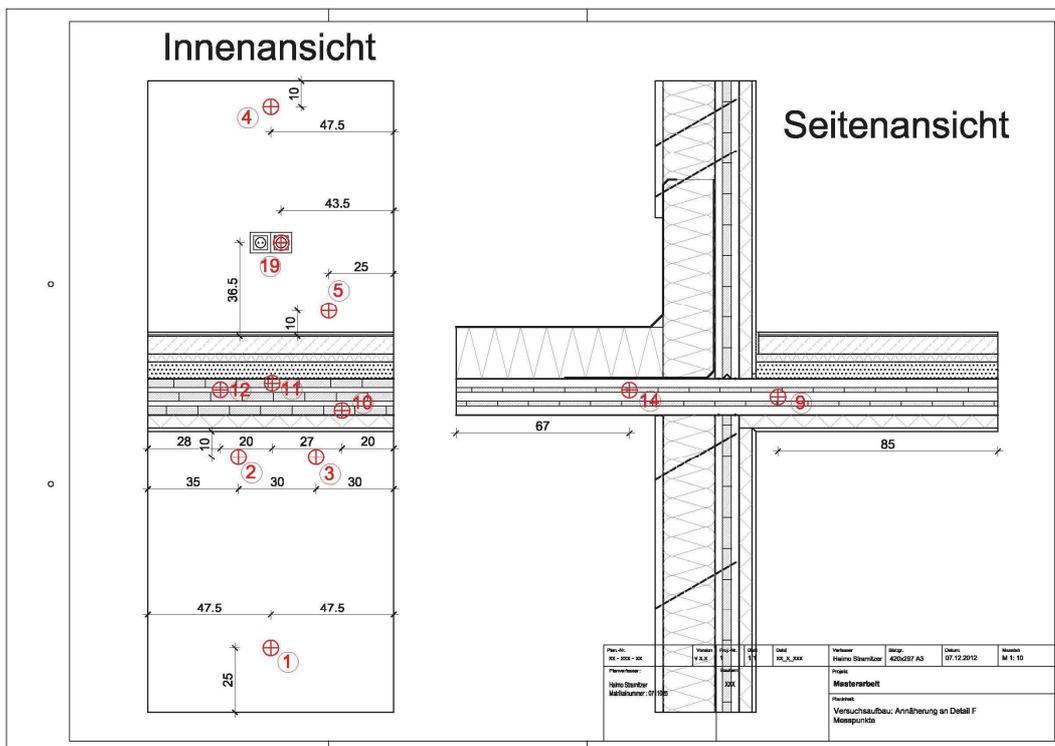


Abb. 7 Messpunktanordnung Plan 2

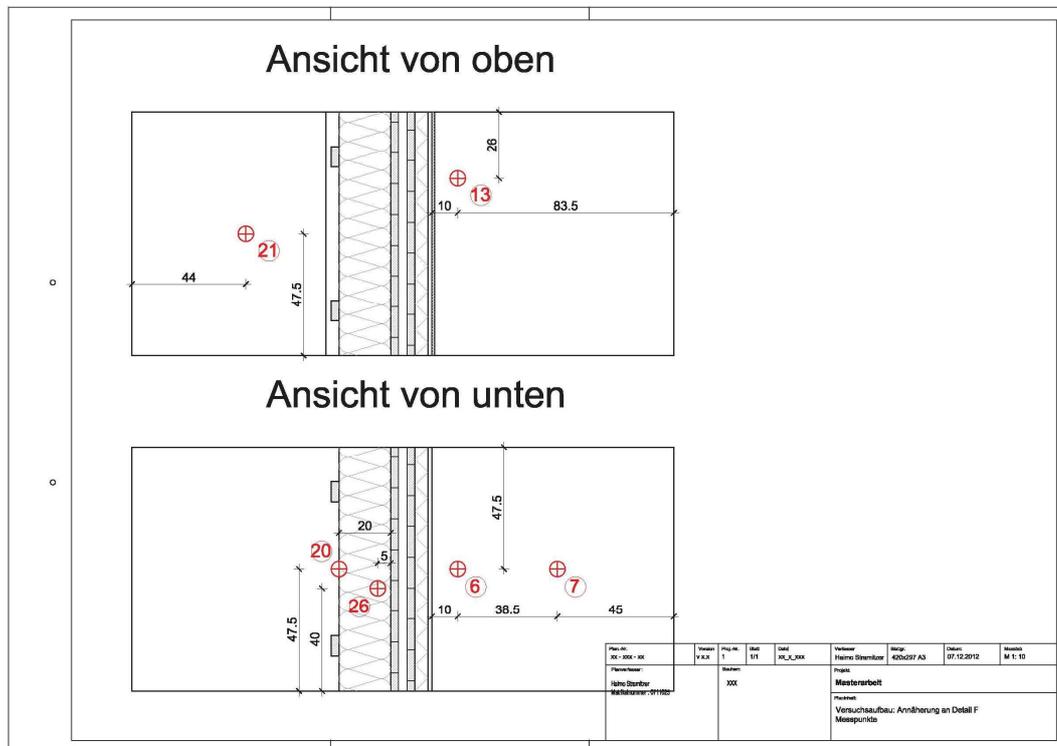


Abb. 8 Messpunktanordnung Plan 3

### 3.2 Fertigung

Die Fertigung bzw. Teilfertigung des Versuchsmodells wurde am 27.10.2012 im heimatischen Betrieb begonnen. Im Mittelpunkt standen dabei die BSP-Platten, die die tragende Struktur des Modelles bilden. Sie wurden am 04.10.2012 von der Firma KLH aus Katsch an der Mur in Judendorf-Straßengel angeliefert und dort übernommen. Die restlichen Materialien die zur Fertigung erforderlich waren wurden von Betriebslieferanten geliefert bzw. von mir an den Auslieferungsstellen abgeholt.

Die BSP-Platten wurden von der Firma KLH schon auf die genauen Maße aus der Detailplanung zugeschnitten. Vor dem Zusammenbau wurden die Platten ihrer späteren Zugehörigkeit nach beschriftet und per Fotodokumentation wurden sämtliche Fehlstellen aufgenommen, um in weiterer Folge an diesen Stellen noch zusätzliche Messpunkte zu definieren.



Abb. 9 Fehlstelle EG Innen

Die extremste Fehlstelle befand sich an der Innenseite der Außenwandplatte EG. In diesem Bereich wurde bei einer Lamelle durch die 4-seit Hobelmaschine ein Ast komplett herausgerissen, was bei einer 3-lagigen Platte den Verlust der Innenlage in diesem Bereich bedeutet, also nur mehr 2 Lagen wirksam sind. In der Praxis würde diese Fehlstelle mit einem geeigneten Material (z.B. PU-Weichzellschaum) aufgefüllt, oder besser noch mit einem Stoppelbohrer ausgebohrt und ein passender Holzstoppel eingeleimt werden. Bei dem Versuchsmodell wurde dieser Bereich bewusst unberührt gelassen, um die Auswirkungen einer solchen unbehandelten Fehlstelle festzustellen. Dieser Fehlstelle wurde der Messpunkt 2 zugeordnet.



Abb. 10 Nahaufnahme Fehlstelle EG Innen



Abb. 11 Anreißen der Deckenplatte

Um die BSP-Platten später genau zusammensetzen zu können, wurden die erforderlichen Maße auf die Platten übertragen. Für die Montageschiene, welche auf der Deckenplatte befestigt wurde, wurde auf der unteren Stirnseite der Obergeschossplatte eine Kerbe herausgeschnitten. In der Praxis wird dieser Arbeitsschritt schon vom Plattenhersteller gleich beim Zuschnitt erledigt. Die erforderliche Kerbe wird in der passenden Größe von der Zuschnittanlage mit einem Fräser herausgearbeitet.



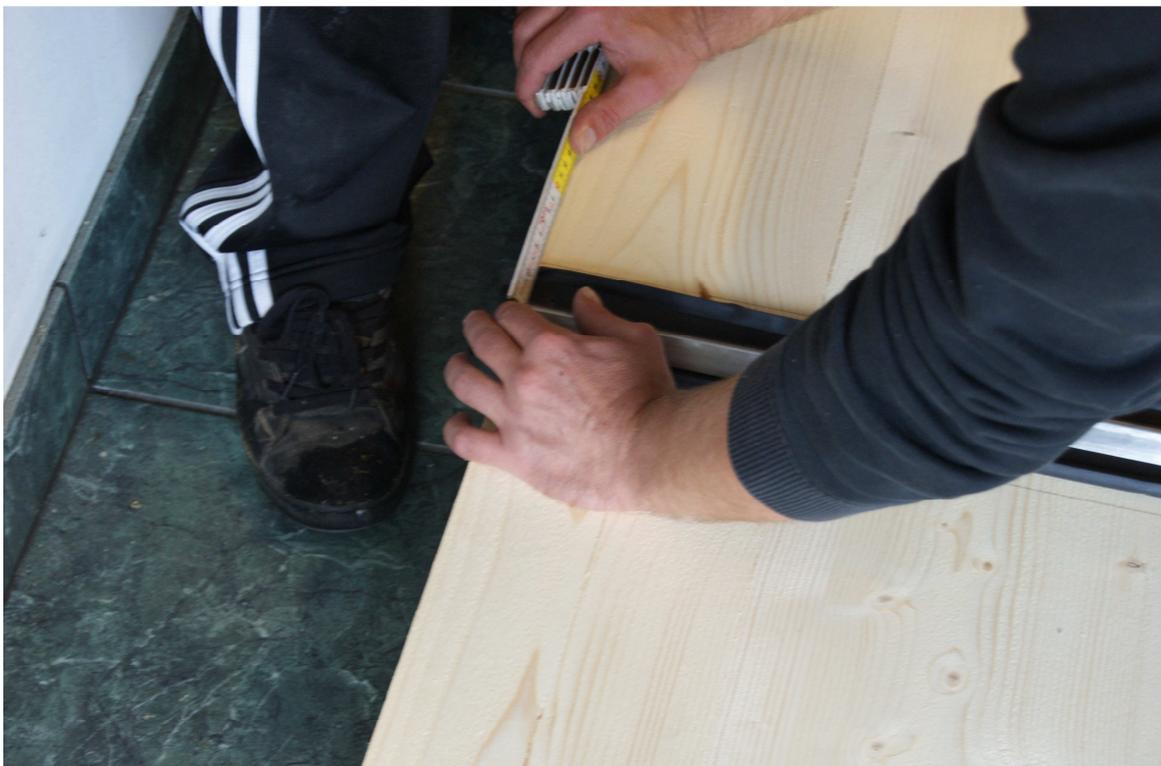
Abb. 12 Montagekerbe inklusive Montagewinkel

An der Oberseite der Deckenplatte wurde, um die Dichtheit des Stoßes zwischen Deckenplatte und Obergeschosswand zu gewährleisten, ein Dichtband befestigt. Die spezielle Form des Dichtbandes, mit den beiden außenliegenden Wülsten soll bei dieser Verbindung eine optimale Abdichtung gewährleisten



**Abb. 13 Montage des Dichtbandes an der Deckenoberseite**

Danach wurde der Montagewinkel, der in der Praxis auch gleich die Zentrierung der Wandplatte sicherstellen soll, eingemessen und mit der Deckenplatte verschraubt.

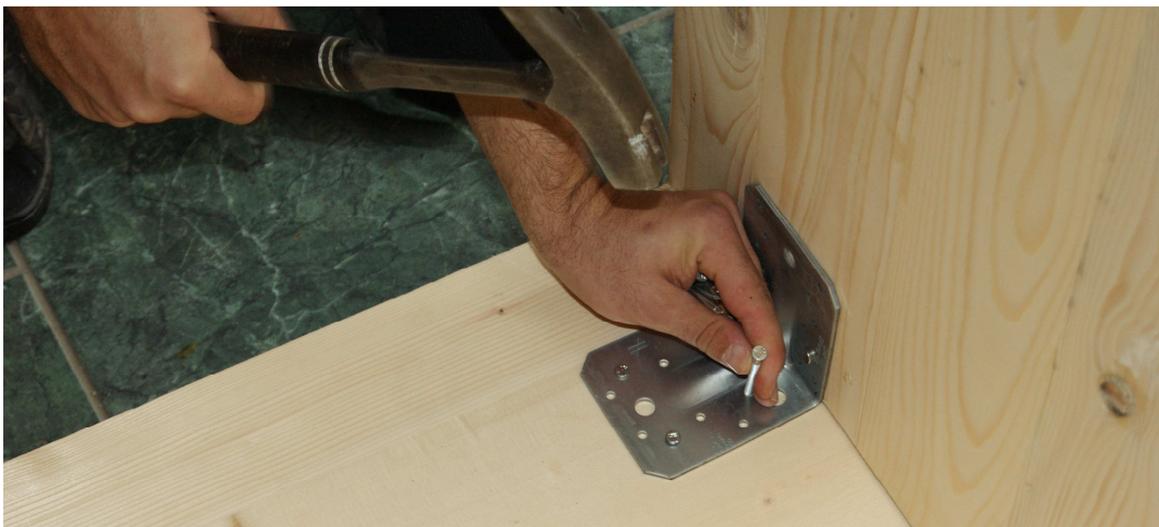


**Abb. 14 Einmessen und befestigen des Montagewinkels**

Anschließend wurde die Obergeschossplatte auf die Deckenplatte gestellt und unter Zuhilfenahme von zwei Metallwinkeln mit Steg und Kammnägeln (4x60) befestigt.



**Abb. 15** Zentrierte Obergeschossplatte inklusive Abdichtung



**Abb. 16** Befestigen der Obergeschossplatte

Um den Transport und den Einbau des Versuchsmodells sicherstellen zu können wurde es, wie vorab schon erwähnt, teilvorgefertigt. Das bedeutet im Speziellen, dass das Modell im Groben aus zwei Teilen bestand, einem unteren und einem oberen Teil.

Der untere Teil bestand aus der Erdgeschossplatte mit einem Abdichtungsband auf der Oberseite und der fertigen Außenseite, bestehend aus Fassadendämmung, Winddichtung und Längslattung. Die Innenseite der Erdgeschosswand mit Holzwolleleichtbauplatte und Innenputz wurde vor Ort fertiggestellt.

Der obere Teil mit der Deckenplatte und der Obergeschossplatte, dessen Fertigung hier schon in Teilschritten beschrieben wurde, wurde innenseitig fertiggestellt und auf der Außenseite wurde nur die bitumenkaschierte Aluflämmplatte aufgeflämmt, um die beiden Hälften vor Ort noch verbinden zu können.



**Abb. 17 Transportfertiger Unterteil, Erdgeschossplatte**



**Abb. 18 Bitumenkaschierte Auflämmplatte an der Außenseite des Oberteils**

Bei der Fertigung des oberen Teiles wurden auf der Innenseite der Obergeschossplatte zuerst die Holzwolleleichtbauplatten angebracht und diese danach verputzt.



**Abb. 19 Anbringen der HWLBP**

Anschließend wurde auf die Holzwolleleichtbauplatten ein Kalkzementputz in der Stärke von 1,50cm aufgebracht und nach etwa 4 Stunden, nachdem er schon ein wenig angezogen war, geglättet.



**Abb. 20 Putzvorbereitungsarbeiten**



**Abb. 21 Einbau der Doppelsteckdose**



Abb. 22 Anbringen des Innenputzes

Als letzter Arbeitsschritt am 27.10.2012 wurde noch der Polystyrolbeton als unterste Schicht des Fußbodenaufbaues eingebracht. Die weitere Fertigung des Modelles wurde dann am 31.10.2010 fortgesetzt, um die bis dato verarbeiteten Materialien etwas trocknen zu lassen.

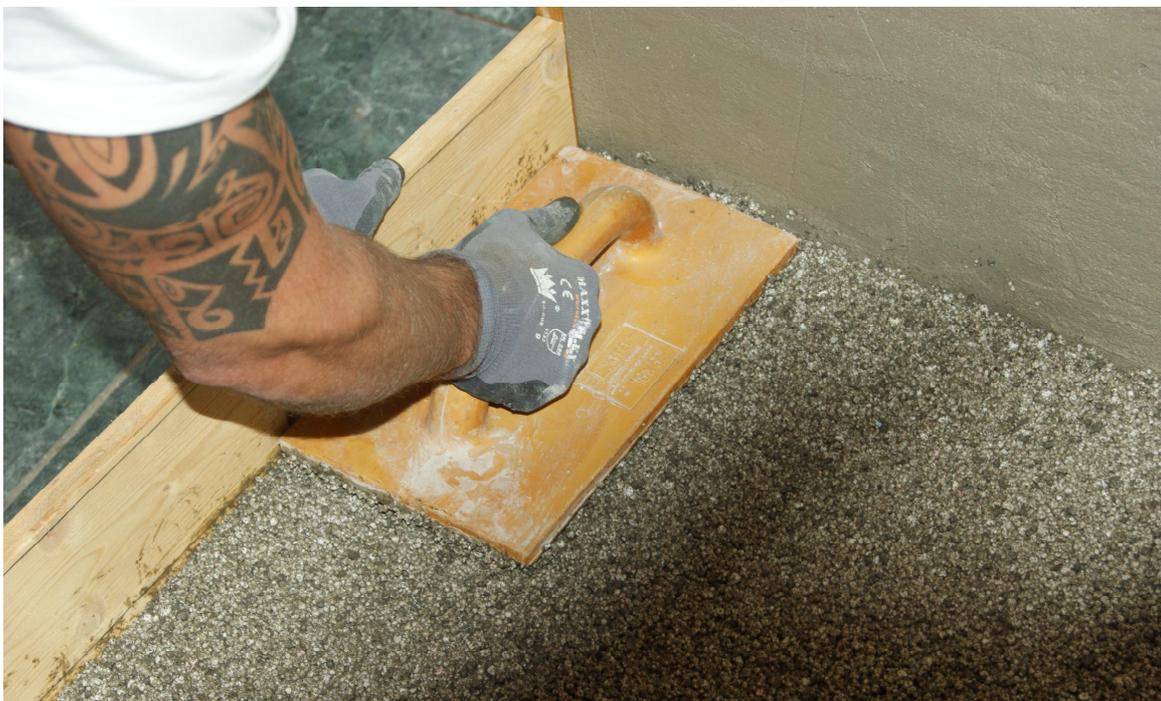


Abb. 23 Einbringen des Polystyrolbetons

Am 31.10.2012 wurde dann der Fußbodenaufbau auf der Innenseite der Deckenplatte komplettiert. Als erster Schritt wurde die Trittschalldämmung auf dem Polystyrolbeton verlegt.



Abb. 24 Verlegen der mineralischen Trittschalldämmung

Auf diese wurde dann anschließend eine Gleitschicht (PE-Folie) als Trennung zum Estrich aufgebracht.



Abb. 25 Verlegen der Gleitschicht

Als abschließender Schritt wurde dann noch der Estrich betoniert und somit der obere Teil des Versuchsmodelles für den Transport und den Einbau fertiggestellt.



**Abb. 26 Betonieren des Estrichs**



**Abb. 27 Abgezogener Estrich**

### 3.3 Einbau

Am Abend des 15.11.2012 wurden noch Kleinigkeiten, wie z.B. der Einbau der Doppelsteckdose, erledigt und das Versuchsmodell und die zum Einbau erforderlichen Zusatzmaterialien verladen und transportfertig gemacht.



Abb. 28 Verladenes Versuchsmodell

Am 16.11.2012 morgens um 0600 Uhr wurde das Modell zum Bautechnikzentrum der TU Graz transportiert und danach sofort mit dem Einbau, unter der Anleitung von Christian Zoller begonnen.

Nachdem das Versuchsmodell mit dem hauseigenen Elektrostapler abgeladen und zusammen mit allen anderen zum Einbau erforderlichen Materialien in die Räumlichkeiten transportiert worden war, wurde zuerst einmal die Trennwand sowie sämtliche Anschlussflächen der Differenzdruckklimakammer für den Einbau vorbereitet. Dazu wurden die Seiten der beheizten Trennwand und des Bodens mit einer Folie abgeklebt, um sie vor Verschmutzung durch den Einbaukleber zu schützen.

Während diese Arbeit von statten ging, wurden bereits sämtliche andere Vorarbeiten für den Einbau erledigt, um einen reibungslosen weiteren Ablauf zu gewährleisten. Als erstes wurde der untere Teil des Versuchsmodells in Position gebracht, um ihn mit dem oberen Teil verschrauben zu können. Dazu wurden die Staplergabeln nur im Bereich des inneren Deckenüberstandes angesetzt, damit sie beim Verbinden der beiden Teile nicht im Weg waren.

Dies war ohne weiteres möglich, da der Schwerpunkt des Versuchsmodells im Bereich des inneren Deckenüberstandes liegt. Die Schrauben wurden von oben durch die Deckenplatte in die Erdgeschossplatte eingedreht. Die Löcher in der bitumenkaschierten Aluflämmplatte wurden anschließend mit einem geeigneten Dichtstoff wieder abgedichtet. Diese Art der Verbindung ist natürlich versuchsmodellspezifisch und kommt in der Praxis so nicht vor.



Abb. 29 Abkleben der Seitenteile



Abb. 30 Positionieren des Ober- und Unterteiles



Abb. 31 Verschrauben der beiden Bauteile



Abb. 32 Verpressen der Einschraublöcher mit Dichtmasse

In weiterer Folge wurde das Versuchsmodell ausgerichtet und in dieser Position durch zwei Diagonalverstreben an der Außenseite fixiert. Währenddessen wurde auch schon an der Komplettierung der Innenseite und der Außenseite gearbeitet, das heißt die Holzwolleleichtbauplatten im Bereich der Innenseite Erdgeschossplatte montiert und an der Außenseite der Obergeschossplatte die Fassadendämmung angebracht.



Abb. 33 Ausrichten und Komplettieren des Versuchsmodells



Abb. 34 Anbringen der Fassadendämmung

Anschließend wurde das Versuchsmodell in die Öffnung der Klimakammer eingepasst. Die seitlichen Einsprünge wurden noch mit Ausgleichshölzern versehen, um die Abdichtungsmaßnahmen zu erleichtern. Die Anschlussränder des Modells wurden in weiterer Folge mit mineralischer Dämmung in Form von Klemmfilz ausgestopft. An den Deckenüberständen wurden seitlich noch Vertikalstützen befestigt, um die Standsicherheit des Versuchsmodells sicherzustellen.

Jetzt konnten die Holzwolleleichtbauplatten an der Deckenunterseite montiert und der Innenputz aufgebracht werden. Auch der Deckenaufbau auf der äußeren Oberseite wurde nun fertiggestellt. Um realistische Bedingungen zu schaffen und die seitliche Austrocknung zu verhindern, wurden die Seitenflächen des Deckenüberstandes an der Außen- sowie an der Innenseite verschlossen. An der Innenseite mit 27,00 mm starken Dreischichtplatten aus Fichtenholz und an der Außenseite mit XPS-Platten mit einer Stärke von 5,00 cm.

Das Modell wurde so eingebaut, dass die BSP-Wandplatten an der Außenseite bündig mit der Trennwand der Differenzdruckklimakammer abschlossen. Dies hatte zur Folge, dass die Innenseite der Trennwand also annähernd bündig mit den Holzwolleleichtbauplatten war. So konnte sichergestellt werden, dass die umschließenden Seitenflächen adiabatisches Verhalten aufweisen.

In weiterer Folge wurde nun, da die Fassadendämmung mit 20,00 cm Stärke vollständig über die Außenseite der Trennwand ragte, die Außenseite der Trennwand großflächig mit Mineralwolleplatten gedämmt, um auch hier adiabatisches Verhalten sicherzustellen.



Abb. 35 Einpassen des Versuchsmodells



Abb. 36 Anbringen der HWLBP an der Innenseite



**Abb. 37** Aufbringen des Innenputzes



**Abb. 38** Abdichten der Anschlussfugen



Abb. 39 Fertiggestellte Außenseite



Abb. 40 Fertiggestellte Innenseite

## 4 MESSUNG

### 4.1 Messpunkte

Nach der Aklimatisationszeit des Versuchsmodells vom 16.11.2012 bis zum 04.12.2012 wurden die Messpunkte, wie in der Detailplanung schon festgelegt, auf das Versuchsmodell übertragen.

Dazu wurden die Punkte zuerst eingemessen, gleichzeitig nummeriert und danach die darüber liegenden Materialien entfernt, um die Messungen an den Brettsperrholz-Platten durchführen zu können.

Dies wurde an der Außenseite dadurch erreicht, dass in den Bereichen, in denen es notwendig war, ein Würfel aus der Fassadendämmung genau herausgeschnitten wurde.



Abb. 41 Öffnung Messpunkt 22



**Abb. 42 Verschlossene Öffnung Messpunkt 25**

An der Innenseite wurde mit einem Kernbohrgerät gearbeitet, das eigentlich dazu verwendet wird, um Betonkerne zu Versuchszwecken aus Betonbauteilen zu entnehmen. Durch dieses Verfahren blieben die herausgebohrten Kerne unbeschädigt und konnten anschließend für den Verschluss des Bohrloches wiederverwendet werden. Außerdem mussten die Bohrlöcher einen entsprechenden Durchmesser aufweisen, um in späterer Folge die Messungen einwandfrei durchführen zu können. Zuerst wurde eine Zentrierbohrung gesetzt, die später als Führung für das Kernbohrgerät diente.



**Abb. 43 Kernbohrmaschine**

In die Führungslöcher der Bohrkern wurden Schrauben gesteckt und die Löcher mit Klebesilikon abgedichtet, um die Bohrkern wieder leicht aus den Bohrlöchern entfernen zu können.

Die Durchmesserdiffferenz zwischen Bohrkern und Bohrloch, die sich aus der Schnittbreite ergab, wurde durch die Ummantelung der Bohrkern mit PE-Randstreifen gelöst. Anschließend wurde der so abgedichtete Bohrkernrand noch mit derselben Dichtmasse, mit der die Ränder des Versuchsmodells versehen wurden, abgedichtet.

Die verwendete Dichtmasse hat den Vorteil, dass sie erst ungefähr in der Zeit von 14 Tagen auszuhärten beginnt und so innerhalb der Messintervalle leicht zu entfernen war. Durch diese Vorgehensweise konnte die Dichtheit der Messstellen sichergestellt werden.

Im Bereich des Messpunktes 19 (Doppelsteckdose, Wandplatte Obergeschoss Innen) reichte das Abnehmen der Steckdosenabdeckung aus, um die Feuchtemessung durchführen zu können. Eine Temperaturmessung konnte in diesem Bereich nicht durchgeführt werden, ohne die Steckdosenhalterung großflächig zu zerstören.



Abb. 44 Bohrloch Messstelle 2



Abb. 45 Bohrloch Messstelle 13



Abb. 46 Eingesetzter Bohrkern Messstelle 4



Abb. 47 Abgedichtete Bohrkern der Messstellen 2,3,6 und 7

## 4.2 Messverfahren

Um die Ergebnisse der Berechnungen aus dem Programm WUFI 2D-3 auszuwerten, wurden Messdaten genommen. Einerseits die Holzfeuchte in Prozent [%] und andererseits die Temperatur in Grad Celsius [°C], jedes Messpunktes in definierten Messintervallen. Dazu wurde sich bestimmter Messverfahren bedient, die in weiterer Folge näher beschrieben werden sollen. Die so gewonnen Daten wurden in Messprotokollen eingetragen, um sie später auswerten zu können. Bei der Durchführung solcher Messungen, sind die Messergebnisse sofort auf Plausibilität zu prüfen und gegebenenfalls das verwendete Messgerät zu überprüfen um Messfehler auszuschließen. Es ist stets zu bedenken, eine Messung zu einem gewissen Zeitpunkt kann meistens nur einmal durchgeführt werden.

### 4.2.1 Feuchtemessverfahren

Die Messung der Holzfeuchte wurde mit dem Gerät „HYDROMETTE HT 85 T“ der Firma GANN durchgeführt. Dabei wurde die Rammelektrode „M 18“ mit 60 mm langen, nicht isolierten Elektrodenspitzen verwendet. Damit konnte eine Messtiefe von maximal 54 mm erzielt werden.

Das Gerät misst nach dem so genannten Widerstandsmessverfahren. Dabei misst es den elektrischen Widerstand zwischen den beiden eingeschlagenen Elektroden. Durch den Wassergehalt des Holzes bzw. durch die elektrische Leitfähigkeit des im Holz enthaltenen Wassers, ändert sich der elektrische Widerstand, der dem fließenden Strom entgegengesetzt wird.

Die Messung erfolgt nur im Bereich der eingeschlagenen Elektroden und auch nur bis zu deren und über deren gesamte Einschlagtiefe, da die verwendeten Elektroden, wie oben schon erwähnt, nicht isoliert waren.

Bei dieser Art der Holzfeuchtemessung ist zu beachten, dass hier eine gewisse Holzfeuchte vorhanden sein muss. Das Widerstandsmessverfahren sollte nur ab einer Holzfeuchte von 6%, bis zu einer Holzfeuchte von 30% eingesetzt werden. Diese Grenzen sind natürlich abhängig vom verwendeten Messgerät und den vorherrschenden Umgebungsbedingungen.

Des Weiteren wird das Messergebnis noch von der Holztemperatur und der Holzart beeinflusst. Dazu sind im Fall der „HYDROMETTE HT 85 T“ Einstellungen laut Herstellerangabe vorzunehmen.

In unserem Fall wurde für die Holzart mitteleuropäische Fichte die Einstellung 3 gewählt und für die Holztemperatur auch die dementsprechende Einstellung in [°C] am Gerät selbst vorgenommen, da dieses Gerät über eine Temperaturkompensation verfügt. Dies ist eine Arbeitserleichterung, da der gemessene Wert nicht erst mit Korrekturtabellen umgerechnet werden muss, sondern direkt ablesbar ist.



Abb. 48 Holzfeuchtemessgerät Hydromette HT 85 T der Fa. Gann mit Rammelektrode

#### 4.2.2 Temperaturmessverfahren

Um die Temperatur der Messpunkte festzustellen, wurde ein Spannungsthermometer mit einem Nickel-Chrom-Nickel Messfühler benutzt. Das Gerät „GTH 1170“ der Firma Greisinger Elektronik ist ein Widerstandsthermometer und basiert auf dem Prinzip der Temperaturmessung mit Thermoelementen.

Bei diesem Prinzip wird der Wärmestrom in elektrische Energie umgewandelt. Bei Widerstandsthermometern kommen zwei unterschiedliche Metalle zum Einsatz, die an einem Ende verbunden und am anderen Ende frei sind.

Aufgrund der unterschiedlichen Leiteigenschaften der beiden Metalle entsteht bei einer Temperaturdifferenz an den Enden eine elektrische Spannung. Dabei kann von der Potentialdifferenz in Abhängigkeit der Leitermaterialien auf die Temperaturdifferenz geschlossen werden.



Abb. 49 Temperaturmessgerät GTH 1170 der Fa. Greisinger Elektronik

Bei der Messung ermittelt das Gerät die Temperaturdifferenz und die Absoluttemperatur und addiert die beiden Ergebnisse, um anschließend die Temperatur der Messstelle zu gewinnen. Die genaue Funktionsweise ist ein sehr komplexer Zusammenhang. An dieser Stelle wird auf weiterführende Literatur verwiesen, da der Schwerpunkt dieser Arbeit wo anders liegt.

## 5 BERECHNUNG

### 5.1 WUFI 2D-3

Die Berechnungen, wie schon in der Vorgehensweise erwähnt, wurden mit dem Programm WUFI 2D-3 durchgeführt. Für die Berechnungen wurden verschiedene spezifische und allgemeine Einstellungen vorgenommen bzw. Rahmenbedingungen festgelegt. Diese sollen in den Auswertungen der einzelnen Berechnungen erwähnt werden. Hier sollte vorab nur einmal auf die Programmstruktur von WUFI 2D-3, die Vorgehensweise bei der Berechnung und auf die allgemeinen Einstellungen eingegangen werden.

#### 5.1.1 Geometry

Nach dem Anlegen eines Projektes wählt man den Reiter „Geometry“ an, um das zu berechnende Detail graphisch darzustellen. Die einzelnen Schichten können im Programm nur als Rechtecke dargestellt werden. Schichten, die zum Beispiel um ein Eck, laufen werden also aus mehreren zusammengesetzten Rechtecken erzeugt.

Es gibt die Möglichkeit, die Rechtecke im Zeichenfenster zu zeichnen, was sich bei komplexeren Strukturen nicht empfiehlt. Besser ist es, die einzelnen Schichten bzw. Rechtecke in einem Graphikskript im Kommandofenster, das sich direkt unter dem Zeichenfenster befindet, zu programmieren.

Dabei sind gewisse Programmeinstellungen, das Koordinatensystem betreffend, zu beachten, welche in der der Programmbeschreibung näher beschrieben sind. Die Abmessungen der Rechtecke sind in Millimetern einzugeben. Die ersten beiden Zahlen betreffen die Abmessungen des Rechteckes in x- und in y-Richtung, wobei die x-Achse des Koordinatensystems die Horizontale und die y-Achse die Vertikale beschreibt. Die nächsten beiden Zahlen beschreiben die globale Lage des Rechteckes, ausgehend vom linken unteren Eckpunkt desselben.

Weiters empfiehlt es sich, dem Rechteck gleich eine Bezeichnung zu geben, die es beschreibt (z.B.: Innenputz OG), um die einzelnen Rechtecke später genau zuordnen zu können. Die vergebene Bezeichnung scheint im Zeichenfenster auf, wenn man mit dem Mauszeiger über das Rechteck fährt.

Dabei ist zu beachten, dass jedes Rechteck eine andere Bezeichnung haben muss. Wenn dies nicht der Fall ist und es zwei Rechtecke mit derselben Bezeichnung gibt, erscheint nur das erste programmierte Rechteck im Zeichenfenster, das zweite nicht. Dies kann zu Verwirrungen führen. Auch zu beachten ist, dass alle programmierten Rechtecke zusammenhängen müssen, da das Programm die eingegebene Struktur sonst nicht als solche erkennt.

Um später bei der Berechnung sinnvolle Ergebnisse zu erhalten ist es essentiell wichtig, sich vorab Gedanken über die verwendeten Materialien zu machen, da einige Materialien nur mit gewissen Schichtstärken berechnet werden können, die von den wahren Schichtstärken stark abweichen. In weiterer Folge bedeutet dies, dass die Rechtecke, denen diese Materialien später zugewiesen werden, genau diese Schichtstärken aufweisen müssen. Eine spätere Änderung der Schichtstärken bei komplexen Strukturen ist zeitaufwändig und stellt eine weitere mögliche Fehlerquelle dar.

### 5.1.2 Grid

Im nächsten Schritt legt das Programm selbstständig ein Rechengitter über die in der Geometry programmierte Struktur. Dieses Rechengitter kann im Kommandofenster auch wieder speziell auf das Detail bzw. auf den Schwerpunkt der Berechnung angepasst werden. Je feiner das Gitter ist, desto zuverlässiger sind die Ergebnisse. Dabei ist zu beachten, dass mit einem feineren Gitternetz auch die erforderliche Rechenzeit erheblich zunimmt. Hier gilt es, eine geeignete Feinheit in Abhängigkeit brauchbarer Ergebnisse und akzeptabler Rechenzeit festzulegen.

In unserem speziellen Fall wurde die minimale Anzahl der Elemente in x- und in y-Richtung mit 1 Element und die maximale Anzahl mit 150 Elementen gewählt. Da in dieser Arbeit vordergründig die Brettsperrholzplatten von Interesse sind, wurde die Anzahl der vom Programm den einzelnen Schichten automatisch zugeteilten Elemente in den jeweiligen Plattenhälften von 6 auf 10 erhöht und der „expansion factor“ so eingestellt, dass die Konzentration der einzelnen Elemente in den Randbereichen der Brettsperrholzplatten erhöht wurde, um speziell in diesen Bereichen möglichst genaue Berechnungsergebnisse zu erhalten.

ID	Width [mm]	No. El.	Exp. Fac.	First El.	Last El.
X-6a	47	10	2,2019	0,0211	25,6644
X-6b	47	10	0,4541	25,6669	0,0211
Y-4a	70	10	2,2019	0,0314	38,2235
Y-4b	70	10	0,4541	38,2273	0,0314

Tab. 4 Einstellungen aus dem Kommandofenster „Grid“ die BSP-Platten betreffend

### 5.1.3 Materials

In dem Reiter „Materials“ wurden nun im Anschluss den einzelnen Rechtecken Materialien zugewiesen. Die bei den Details verwendeten Materialien wurden aus der Datenbank „Material Database“ des Programmes herausgesucht. Fallweise wurden die Materialien etwas modifiziert.

Zu beachten ist dabei, dass dies mit Bedacht vorgenommen werden muss, da im Programmhintergrund in Bezug auf die Materialien der Datenbank Parameter eingestellt worden sind, die für die Berechnung wichtig sind und nicht verändert werden dürfen.

Vorsicht ist bei der Zuweisung des Materials geboten, da das Programm zwischen x- und y-Richtung unterscheidet. Es besteht die Möglichkeit, der x- und der y-Richtung unterschiedliche Materialeigenschaften zu verleihen. So kann nicht nur isotropes (x- und y-Richtung gleiche Materialeigenschaften), sondern auch anisotropes Material dargestellt werden. Kontrollieren kann man dies recht einfach, indem man im Zeichenfenster mit dem Mauszeiger über ein Rechteck fährt, zeigt das Programm das zugewiesene Material in x- und in y-Richtung an.

Wenn man unterschiedlichen Bauteilen dasselbe Material zuweist empfiehlt es sich, das bereits zugewiesene Material im Dialogfenster „Allocation of properties“ zu kopieren und ihm eine andere Bezeichnung zuzuweisen (z.B.: Sperrholz: Wand OG). Damit ist sichergestellt, dass man den Bauteilen unterschiedliche Anfangsbedingungen im Reiter „Initial Conditions“ zuweisen kann.

### 5.1.4 Initial Conditions

Wie schon im Abschnitt „Materials“ zum Abschluss erwähnt, wurde nun im nächsten Schritt den Brettsperrholzplatten und dem Polystyrolbeton, in der Berechnung Bimsbeton, ein anfänglicher Wassergehalt zugewiesen.

Bei der Temperatur wurde die Standardeinstellung von 20,00°C beibehalten, da sich in den meisten Fällen die Temperatur im Bauteil schon nach wenigen Stunden einstellt. Weitere Einstellungen werden in den Auswertungen der Details genauer behandelt.

### 5.1.5 Surface/Climate

Unter dem Reiter „Surface/Climate“ sind allen Bauteilrändern in der xy-Ebene Randbedingungen zuzuweisen. Lediglich in der z-Richtung ist die Struktur theoretisch unendlich lang.

Dabei wird zwischen Außenbereichen, Innenbereichen und adiabatischen Rändern unterschieden. Je nachdem welche Bedingungen für die Berechnung erforderlich sind, werden hier die verschiedensten Einstellungen, das Außen- und Innenklima betreffend, getroffen.

Es besteht zum Beispiel die Möglichkeit, aus einem Klimakatalog Klimadateien mit gemessenen Außenklimadaten auszuwählen und diese dann für die Instationäre Berechnung heranzuziehen, sofern diese regionalen Daten mit dem vorherrschenden Außenklima übereinstimmen. Es können auch unveränderliche Einstellungen, bezogen auf Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit, vorgenommen werden, um stationäre Bedingungen berechnen zu können.

Für das Versuchsmodell wurde zum Beispiel eine Außentemperatur von  $-15,00^{\circ}\text{C}$  bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60,00% und eine Innentemperatur von  $23,00^{\circ}\text{C}$  bei 45,00% relativer Luftfeuchtigkeit angesetzt.

### 5.1.6 Computational Parameters

Im letzten Arbeitsschritt vor der Berechnung werden noch die Berechnungsparameter festgelegt. Unter dem Button „Simple“ kann unter anderem die Anzahl der Zeitschritte in Stunden, das Datum des Berechnungsstartes und die Angabe, was alles ausgegeben werden soll, eingestellt werden.

Unter dem Button „Enhanced“ können noch weitere Feineinstellungen vorgenommen werden, diese Möglichkeit ist aber mit Vorsicht zu genießen. Eine bestimmte Einstellung sollte hier bei den „Solver Settings“ (Löser) kontrolliert und gegebenenfalls geändert werden. Als URF-Wert [-] (Unterrelaxationsfaktor) der Rel. Humidity wird in unserem speziellen Fall 0,2 gewählt. Dieser Faktor bestimmt die Überlagerung der errechneten Lösung, mit der Lösung aus der vorhergehenden Iteration. 1,0 wäre dabei die Verwendung der aktuell errechneten Lösung und 0,0 die aus der vorigen Iteration. Bei großen Sprüngen im Feuchtefeld, resultierend aus hohen Feuchteströmen, empfiehlt es sich, diesen Faktor zu reduzieren, um eine Verbesserung des Feuchtefeldes in der Berechnung zu erreichen. Weitere Spezialeinstellungen im Löser, sind der Programmbeschreibung zu entnehmen.

Bevor dann mit dem Reiter „Processing“ die Berechnung gestartet wird, sollten alle vorher getroffenen Einstellungen gespeichert werden. Danach kann mit dem Startbutton die Berechnung gestartet werden. In den meisten Fällen reicht eine Berechnung mit geringer Priorität aus, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten.

Die Ergebnisse können anschließend mit den Ansätzen **WUFI2DMotion** und **WUFIgraph** ausgewertet werden.

## 5.2 Therm

Zusätzlich zu dem Programm WUFI2D-3, respektive um eine aussagekräftigere Darstellung des Temperaturverlaufes im Versuchsmodell zu erhalten und als Plausibilitätskontrolle, wurde das Programm Therm 5.2 der Firma LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) mit Sitz in den USA verwendet.

Das Programm ist nach einer Registrierung frei am Markt erhältlich und liefert in Bezug auf den Temperaturverlauf in Bauteilen gute Ergebnisse. Therm 5.2 basiert auf Windows und bedient sich der Methode der finiten Elemente, um 2-dimensionale Wärmeströme in Bauteilen zu berechnen und anschließend darzustellen. Für die Berechnung wurden dieselben Temperaturbedingungen wie für den Versuch angesetzt, um einen Vergleich der Ergebnisse möglich zu machen.

Als erster Schritt wurde ein .dxf-file des Versuchsmodelles erstellt. Dieses wurde dann als „Underlay“ in das Programm importiert. Danach wurden den Rechtecken Materialien zugewiesen, indem über die .dxf-Vorlage Polygonzüge gelegt wurden. Diesen Flächen wurden im Anschluss Materialien aus der Materialdatenbank zugewiesen, bzw. jene die nicht vorhanden waren in der Materialdatenbank neu erstellt.

In weiterer Folge wurden nun, unter dem Reiter „Boundary Conditions“, den umschließenden Kanten Randbedingungen zugewiesen. Die Vorgehensweise ist annähernd analog zu WUFI2D-3. Um die eingegeben Daten vor der Berechnung zu sichern, wurde das Modell gespeichert. Nun konnte die Berechnung unter dem Reiter „Calculation“ gestartet werden.

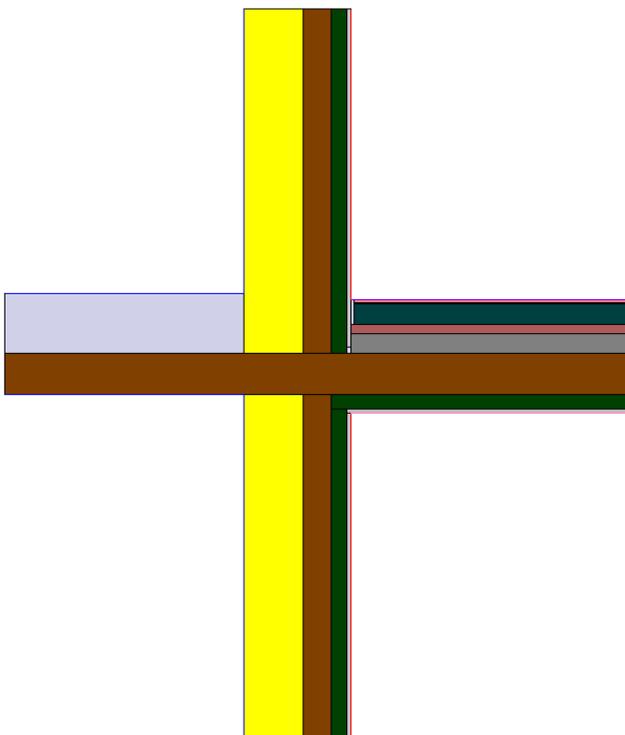


Abb. 50 Eingabe des Versuchsmodells in Therm 5.2

## 6 AUSWERTUNG

### 6.1 Aklimatisation

Für die Aklimatisationsberechnung wurde als Startwert der Mittelwert aus der ersten Messung vom 16.11.2012 mit  $59,29\text{kg/m}^3$  ermittelt, auf  $60,00\text{kg/m}^3$  aufgerundet und allen drei Platten zugeordnet. Für den Polystyrolbeton wurde ein Wassergehalt von  $50,00\text{kg/m}^3$  angenommen, der aus der Fertigung abgeleitet wurde.

Die Berechnung wurde am 16.11.2012 über eine Dauer von 550 Stunden gestartet. Die Klimabedingungen wurden am 16.11.2012 im Zuge der ersten Messung ermittelt und über die Aklimatisationszeit als konstant angenommen.

Unter dem Reiter „Surface/Climate“ wurden die Einbauränder des Versuchsmodelles als adiabatisch definiert, allen anderen bzw. freien Rändern wurde ein Innenklima mit einer konstanten Temperatur von  $23,00^\circ\text{C}$  und einer konstanten relativen Luftfeuchtigkeit von  $45,00\%$  zugewiesen.

Für die Aklimatisationsberechnung wurden zwei Messungen durchgeführt, die Erste am Tag des Einbaues des Versuchsmodelles, am 16.11.2012 und die Zweite am 04.12.2012. Für den Vergleich der Funktionen aus dem Wassergehalt, wurde die Funktion der Messung vereinfacht als linear angenommen, da in erster Linie der Zielwert von Interesse war.

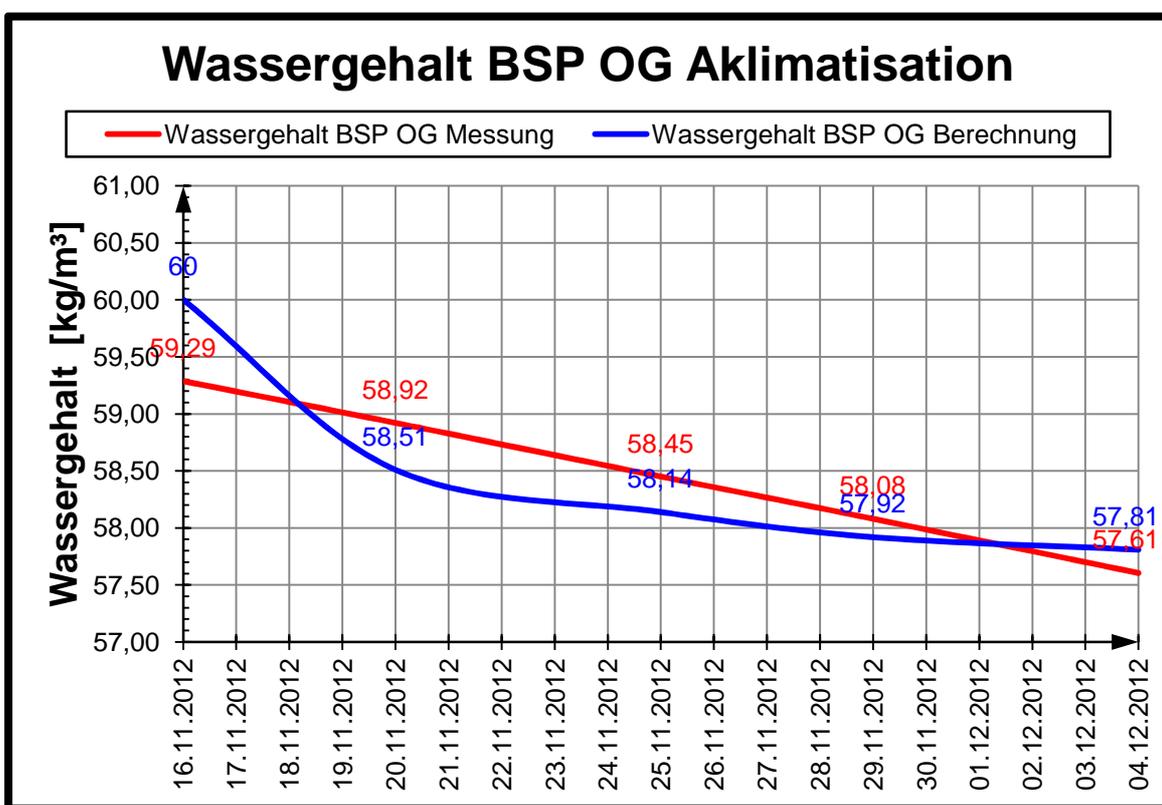


Abb. 51 Auswertung BSP OG Aklimatisation

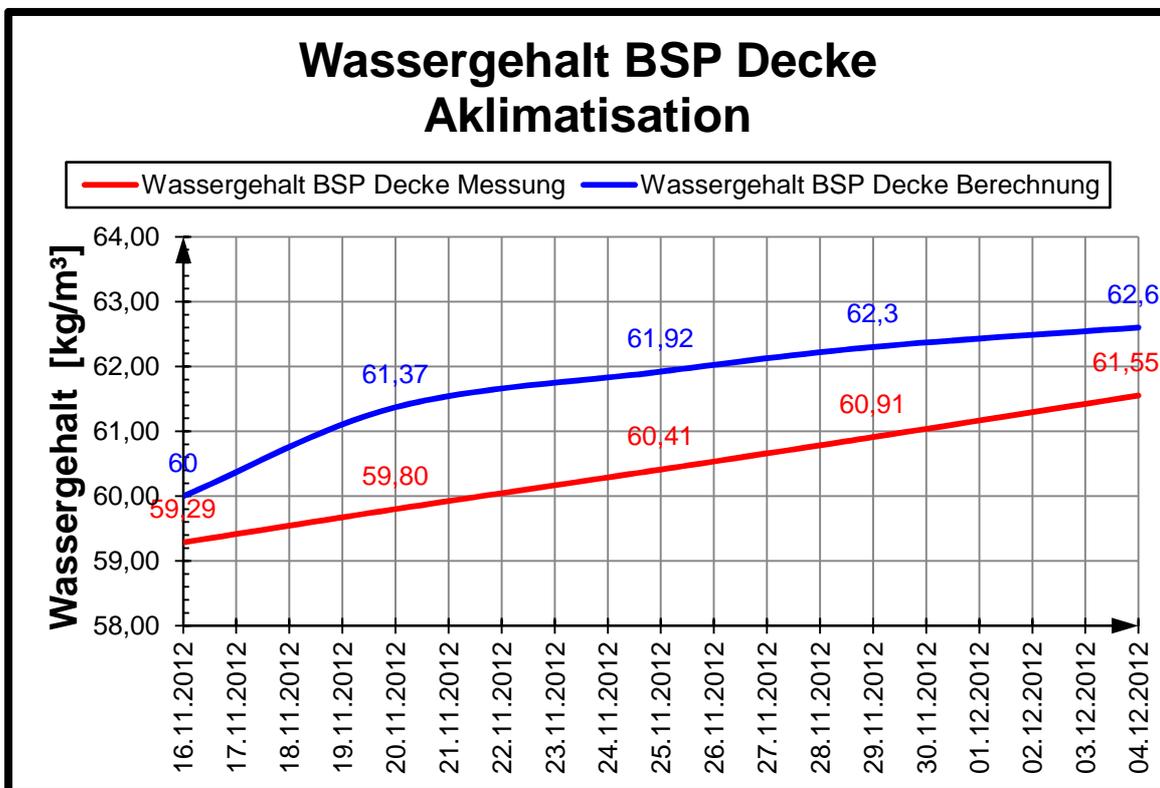


Abb. 52 Auswertung BSP Decke Aklimatisation

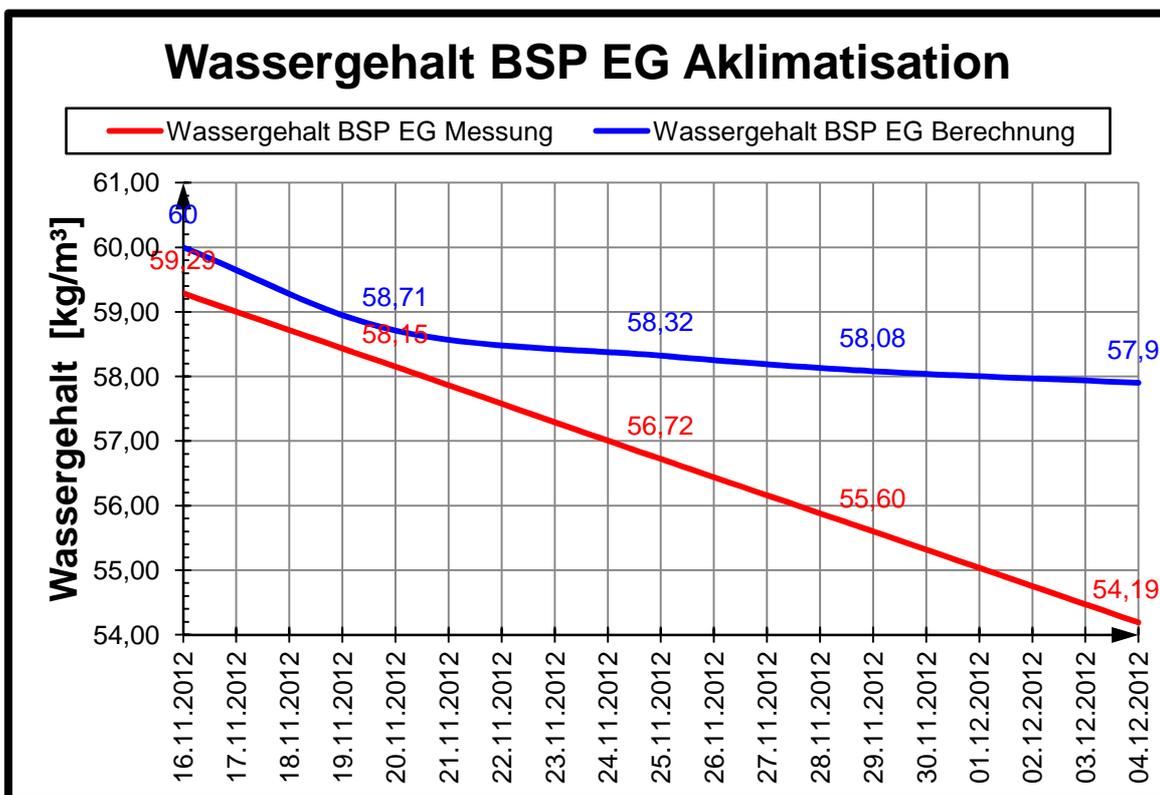


Abb. 53 Auswertung BSP EG Aklimatisation

Die Umrechnung der prozentuellen Holzfeuchte in den Wassergehalt in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  erfolgt mit folgender Formel, unter der Verwendung des Darrgewichtes von mitteleuropäischem Fichtenholz von ca.  $410,00\text{kg}/\text{m}^3$ .

$$\frac{\text{Holzfeuchte} [\%] * \text{Darrgewicht des Holzes} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]}{100} = \text{Wassergehalt} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$$

Die Auswertungsdiagramme zeigen den gemittelten Wassergehalt der einzelnen Brettsperrholzplatten. Aus ihnen ist ersichtlich, dass die größte Abweichung von 0,90% Holzfeuchte, bezogen auf den 04.12.2012, im Bereich der Erdgeschossplatte auftritt. Bei der Decke beträgt die Holzfeuchtedifferenz aus der Messung und der Berechnung 0,26% und bei der Obergeschossplatte sogar nur 0,05%. Abweichungen dieser Größe können ruhigen Gewissens vernachlässigt werden.

Auch ist deutlich zu erkennen, dass bei der Obergeschoss- und der Erdgeschossplatte der Wassergehalt über die Zeit abnimmt, während er bei der Deckenplatte steigt. Der Grund dafür ist das Anmachwasser im Polystyrolbeton. Dieser wurde im Zuge der Fertigung als erste Schichte des Fußbodenaufbaues auf die Deckenplatte aufgebracht, was zur Folge hatte, dass ein Teil des Wassergehaltes des Polystyrolbetons von der Deckenplatte aufgenommen wurde.

Um diesen Effekt abzuschwächen, könnte man vor dem Betonieren des Polystyrolbetons zum Beispiel auf der Brettsperrholzplatte eine diffusionsoffene Unterdachbahn verlegen. Damit könnte man mit geringen Mehrkosten eine anfängliche, übermäßige Wasseraufnahme der Brettsperrholzplatte unterbinden.

## 6.2 Differenzdruckklimakammer

Für die Klimakammerberechnung wurden diesmal aus der zweiten Messung vom 04.12.2012 die Mittelwerte der einzelnen Brettsperrholzplatten berechnet und unter dem Reiter „Initial Conditions“ wie folgt angesetzt.

**Hier soll allgemein noch erwähnt werden, dass alle Berechnungen auf zwei Dezimalstellen durchgeführt wurden, aber aufgrund der getroffenen Annahmen und der Komplexität der Berechnungen das Runden auf ganze Zahlen eine ausreichende Genauigkeit darstellt.**

- Wassergehalt BSP OG 57,61kg/m<sup>3</sup>
- Wassergehalt BSP Decke 61,55kg/m<sup>3</sup>
- Wassergehalt BSP EG 54,19kg/m<sup>3</sup>

Der Wassergehalt für den Polystyrolbeton wurde, wie auch schon bei der Aklimatisationsberechnung, mit  $50,00\text{kg}/\text{m}^3$  angenommen.

Unter dem Reiter „Surface/Climate“ wurden 4 Randbedingungen wie folgt definiert:

- Adiabat
- Außenklima
- Innenklima
- Innenklima Wärmestrom horizontal

Wie schon bei der Aklimatisationsberechnung, wurden die Einbauränder des Versuchsmodelles als **adiabatisch** definiert.

An den vertikalen und horizontalen Rändern des Deckenüberstandes auf der Innenseite, wurde ein **Innenklima** mit einer konstanten Temperatur von 23,00°C und einer konstanten relativen Luftfeuchtigkeit von 45,00% angesetzt. Der Wärmeübergangskoeffizient in [W/m<sup>2</sup>K] wurde in diesem Bereich auf 0,00 gesetzt, da hier nur in einem sehr begrenzten Maß ein gerichteter Wärmestrom vorhanden sein kann.

Im Bereich der beiden Wandplatten wurde das **Innenklima Wärmestrom horizontal**, mit einem Wärmeübergangskoeffizient von 7,69W/m<sup>2</sup>K angesetzt, da hier von einem horizontal gerichteten Wärmestrom gesprochen werden kann. Die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit entsprechen den Werten des Innenklimas.

Den dachabdichtungsfreien Außenrändern wurde das **Außenklima** mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von 25,00W/m<sup>2</sup>K zugeteilt. An den Außenrändern, die mit einer Dachabdichtungsbahn laut Detailplanung versehen wurden (**Außenklima PVC Dachbahn**), wurden ebenfalls 25,00W/m<sup>2</sup>K als Wärmeübergangskoeffizienten angesetzt und den Rändern zusätzlich ein sd-Wert von 270m zugeteilt, der sich aus einem  $\mu$ -Wert der Dachabdichtungsbahn von 150000[-] und einer Materialdicke von 0,0018m ergab. In diesem speziellen Fall wurden die programmierten Rechtecke für die Dachabdichtungsbahn gelöscht und stattdessen der eben erwähnte sd-Wert bei den Randbedingungen berücksichtigt.

Alle anderen Feineinstellungen, wie der Faktor zur Berücksichtigung des Niederschlages, der Faktor zur Berücksichtigung des Bruchteiles der kurzwelligen Sonnenstrahlung, welcher von der Oberfläche absorbiert wird (kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl) und der Faktor für die langwellige Sonnenstrahlung, also der Emissionsgrad der Oberfläche für thermische Abstrahlung (langwellige Strahlungsemissionszahl) wurden auf 0,00 gesetzt, da diese Einflüsse für die Versuchsbedingungen irrelevant sind.

Die Berechnung wurde am 05.12.2012 über eine Dauer von 2920 Stunden, was ungefähr 4 Monaten entspricht, gestartet. Die Klimabedingungen wurden wie folgt und als konstant über die gesamte Versuchsdauer angenommen:

Bezeichnung	<b>Außenklima</b>	<b>Innenklima</b>
<b>Temperatur [°C]</b>	-15,00	23,00
<b>Relative Luftfeuchtigkeit [%]</b>	60,00	45,00

Tab. 5 Randbedingungen des Versuches

### 6.2.1 Differenzdruckklimakammerausfall

Irgendwo im Zeitraum zwischen dem 23.12.2012 und dem 07.01.2013 fiel die Kühlung der Differenzdruckklimakammer durch ein technisches Gebrechen aus. Der Ausfall der Kammer ist in den Auswertungsdiagrammen ersichtlich.

Durch ein Leck im Kühlmittelkreislauf des Klimagerätes traten ca. 30,00kg Kühlmittel aus, was zur Folge hatte, dass die definierten Klimabedingungen nicht eingehalten werden konnten. Bei der Messung am 07.01.2013 wurden folgende Randbedingungen aufgenommen:

Bezeichnung	Außenklima	Innenklima
<b>Temperatur [°C]</b>	19,40	21,70
<b>Relative Luftfeuchtigkeit [%]</b>	61,10	44,50

Tab. 6 Randbedingungen am 07.01.2013

Im Zeitraum vom 07.01.2013 bis zum 10.01.2013 wurde der Schaden lokalisiert und behoben, sodass die Kammer am 11.01.2013 neu gestartet werden konnte. Aus den Auswertungsdiagrammen ist die Störung der Kammer klar zu erkennen. Aus den Funktionen der Messung kann erkannt werden, dass man im Falle eines ungestörten Versuchsablaufes viel gleichmäßigere Messfunktionen erhalten hätte. Mit dem Wissen, dass es am Nachmittag um 15:30 Uhr des 04.01.2013 auf der Außenseite der Kammer 19,40°C hatte, wurde beim Abschalten der Kammer am Ende des Versuches darauf geachtet, wie schnell die Temperatur an der Außenseite steigt, wenn an der Innenseite das Klimagerät in Betrieb bleibt. Somit konnte der Ausfallszeitpunkt der Kammer annähernd bestimmt werden. Mit Hilfe von ein paar Messungen, konnte der Trend der Funktion des Anstieges der Außentemperatur angenähert werden. Die Auswertung ergab einen Zeitraum von ca. 350,00 Stunden, was in etwa 15 Tagen entspricht. Daraus kann grob geschlossen werden, dass die Kammer um den 22.12.2012 ausfiel.

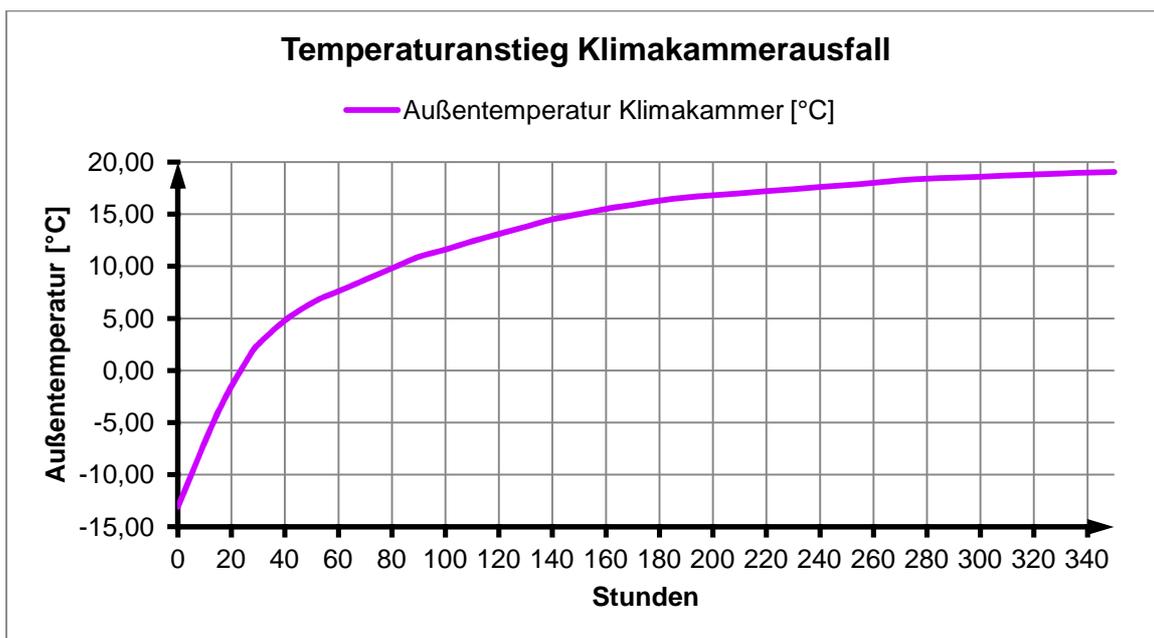


Abb. 54 Grob geschätzte Dauer des Klimakammerausfalles

### 6.2.2 Analyse und Vergleich Wandplatten

Man kann aus den Auswertungsdiagrammen von Messung und Berechnung der beiden BSP-Platten sehr gut erkennen, dass sich die Funktionen aus Berechnung und Messung im Bereich um den 02.01. bis 04.01.2013 schneiden. Zu diesem Zeitpunkt ist die Berechnung schon konservativ.

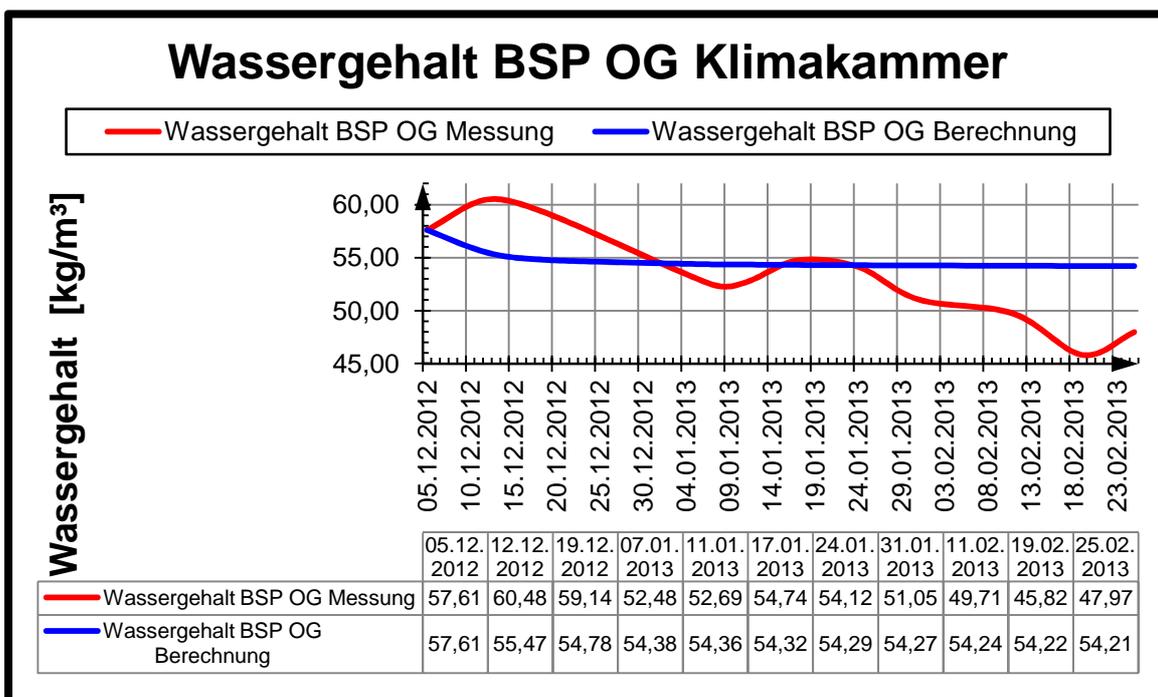


Abb. 55 Gemittelter Wassergehalt BSP OG Klimakammer

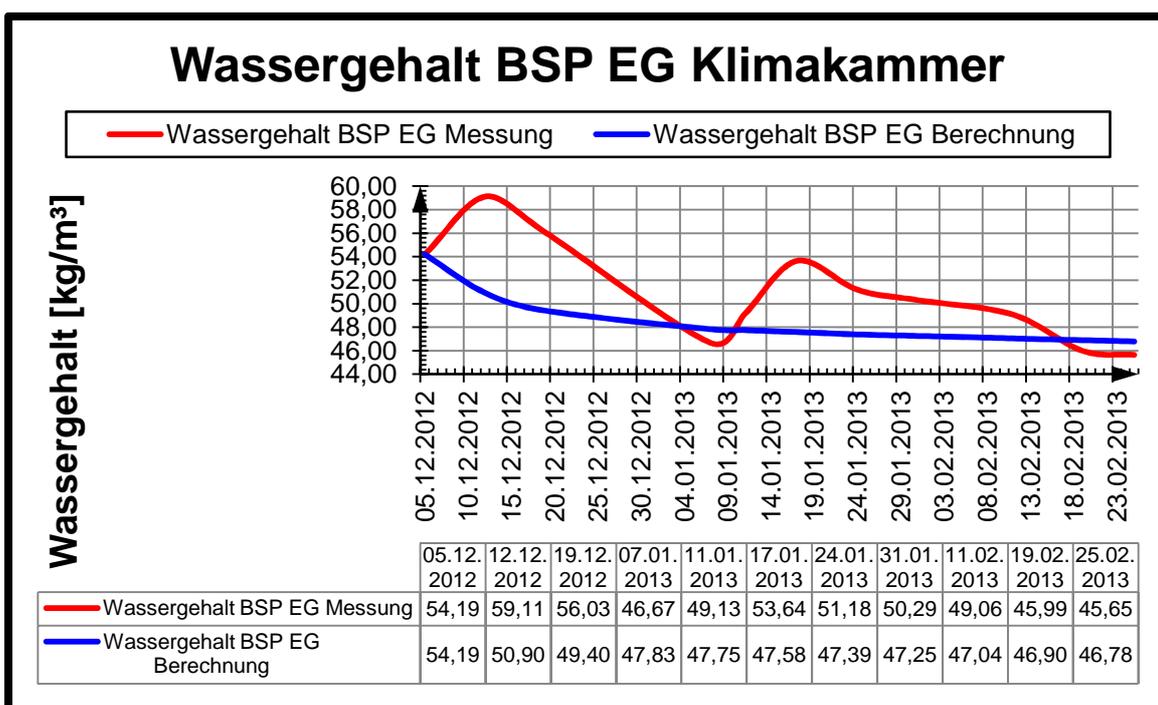


Abb. 56 Gemittelter Wassergehalt BSP EG Klimakammer

Bei der Obergeschossplatte ist eine größere Abweichung zwischen der Berechnung und der Messung zu erkennen, als bei der Erdgeschossplatte. Des Weiteren ist die Feuchtigkeitsabnahme der Erdgeschossplatte etwas stärker ausgeprägt.

Aus dem Vergleich der Auswertungsdiagramme geht weiters hervor, dass die gemessenen Werte der Wandplatten sich nur geringfügig voneinander unterscheiden, und sich bei der 11. Messung am 19.02.2013 ein annähernd gleicher Wert einstellt.

Auch geht aus der Messung hervor, dass in beiden BSP-Platten eine Reduktion des Wassergehaltes stattfindet. Somit kann die Berechnung als konservativ und auf der sicheren Seite liegend angesehen werden.

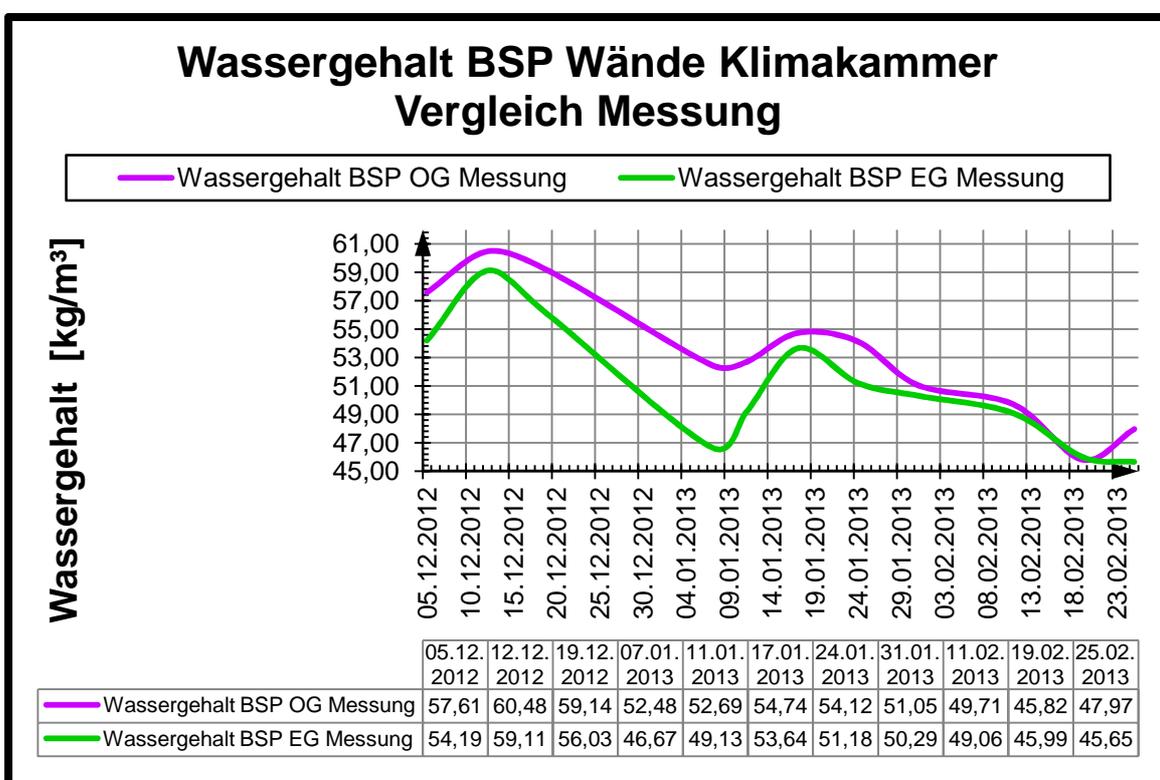


Abb. 57 Vergleich gemittelter Wassergehalt BSP Wände Klimakammer aus Messung

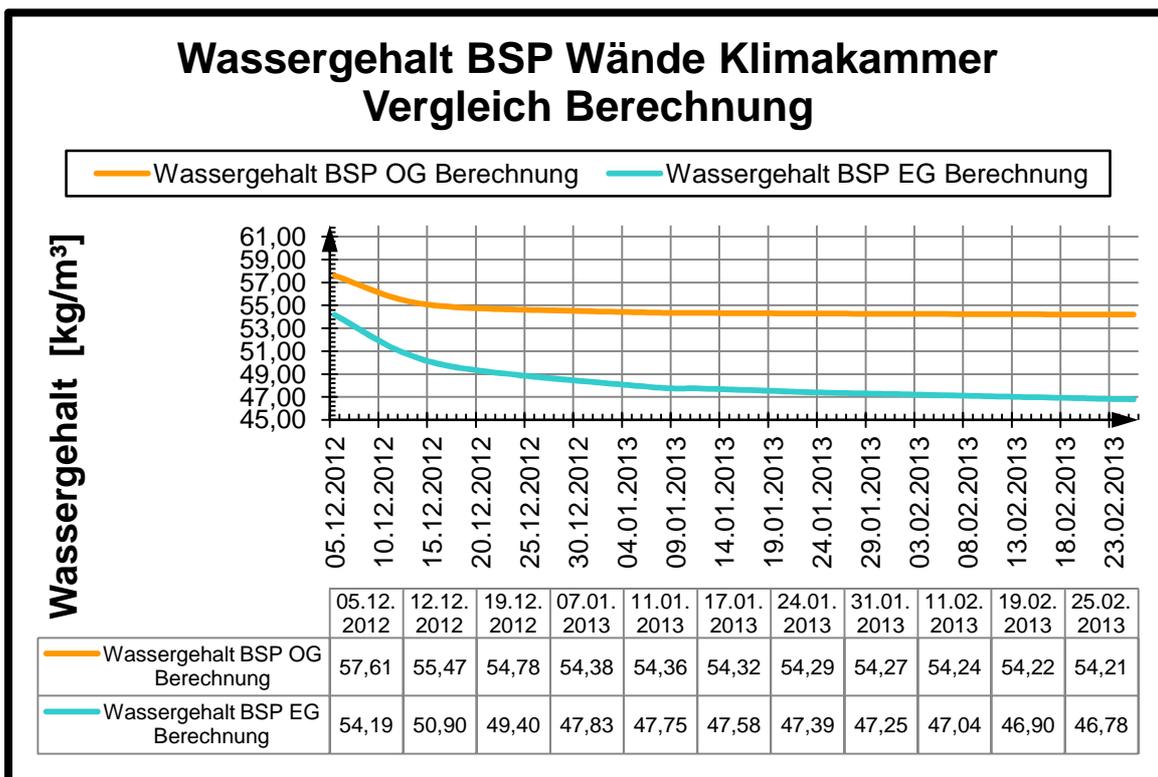


Abb. 58 Vergleich gemittelter Wassergehalt BSP Wände Klimakammer aus Berechnung

Die Ergebnisse aus der Berechnung hingegen variieren trotz eines annähernd gleichen Startwertes bei der Messung am 25.02.2013 maßgeblich. So ergibt sich aus der Berechnung am 25.02.2013 für die Obergeschossplatte ein Wassergehalt von 54,21kg/m<sup>3</sup> (13,22%) und für die Erdgeschossplatte ein Wert von 46,78 kg/m<sup>3</sup> (11,41%). Daraus ergibt sich eine Differenz von etwa 7kg/m<sup>3</sup>.

Die Erklärung für all das vorher erwähnte könnte die PVC-Dachabdichtungsbahn, welche etwa die Hälfte der Obergeschossplatte bedeckt, sein. In der Berechnung geht die Ausdehnung dieser Dachabdichtungsbahn in z-Richtung gegen unendlich und sie liegt perfekt an der Außenseite der Wand an, während sie im Versuchsaufbau begrenzt ist und trotz Klemmung sicher nicht an jeder Stelle vollständig anliegt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Abweichung zwischen der Berechnung und der Messung der Obergeschossplatte eigentlich etwas geringer ist.

Sehr gut zu erkennen ist auch die erneute Feuchtezunahme infolge des Klimakammerausfalles im Bereich zwischen dem 09.01. und dem 19.01.2013. Sie fällt bei der Erdgeschossplatte etwas stärker aus.

Eine mögliche Erklärung dafür wäre das Kondenswasser, welches sich nach dem Ausfall der Kühlanlage am Boden der Kammeraußenseite gesammelt und die Erdgeschossplatte einer stärkeren Feuchtebelastung ausgesetzt hat.

Bei der Auswertung der gemittelten Temperatur der Wandplatten ist der Ausfall der Klimakammer am deutlichsten zu erkennen. Wenn man nun die Auswertungen vom Wassergehalt und der Temperatur vergleicht erkennt man, dass sich bei der Temperatur die Auswirkungen sofort bemerkbar machen, nämlich im Zeitraum vom 25.12.2012 bis zum 14.01.2013 und beim Wassergehalt erst etwas verspätet im Bereich vom 09.01. bis zum 29.01.2013. Beide Störbereiche haben in etwa die gleiche Dauer, sind aber um ca. 15,00 Tage zeitversetzt.

Die Ermittlung der gemittelten Temperaturen der Wandplatten wurde aufgrund konstanter Klimaverhältnisse des Versuches wie folgt ermittelt. Es wurde der Mittelwert der gemessenen Temperaturen an der Außenseite und er Mittelwert der gemessenen Temperaturen an der Innenseite ermittelt und aus den beiden Ergebnissen erneut der Mittelwert errechnet, da der Temperaturverlauf durch die Plattenebene theoretisch linear ist.

Als Ausgangstemperatur für die Funktionen der Messungen wurden die gemittelten Temperaturen der einzelnen Bauteile aus der 2. Messung vom 04.12.2012 herangezogen. Aus den Auswertungsdiagrammen geht hervor, dass die Temperatur aus der Berechnung immer etwas höher ist als die gemessene Temperatur. Bei der Obergeschossplatte beträgt der Unterschied mit 25.02.2013 etwa 2°C und bei der Erdgeschossplatte etwa 5°C.

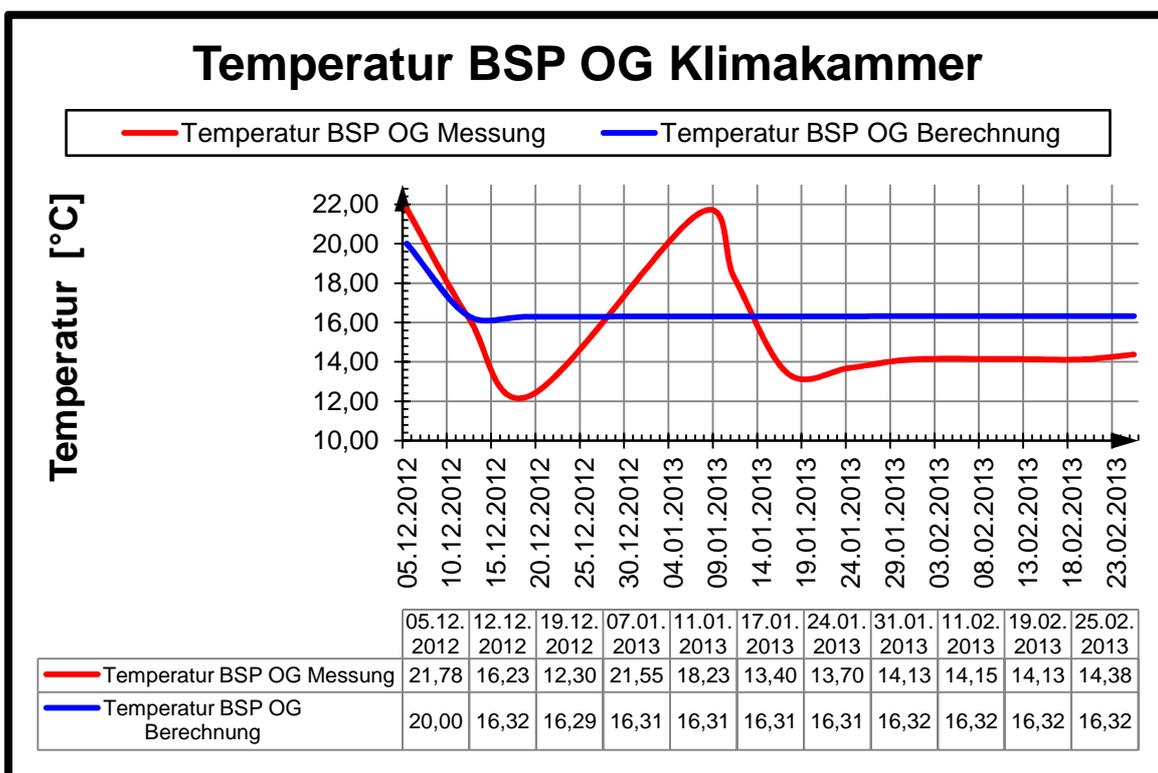


Abb. 59 Gemittelte Temperatur BSP OG Klimakammer

Das die Temperaturdifferenz der Obergeschossplatte etwas geringer ist liegt mit Sicherheit auch an der Anzahl und Anordnung der Messpunkte. So gibt es im Bereich der Obergeschossplatte 3 Messstellen, an denen die Temperatur gemessen wurde, Nummer 4 und 5 an der Innenseite und Nummer 22 an der Außenseite. Bei der Erdgeschossplatte sind es doppelt so viele, nämlich 6. Nummer 1, 2 und 3 an der Innenseite und Nummer 23, 24 und 25 an der Außenseite.

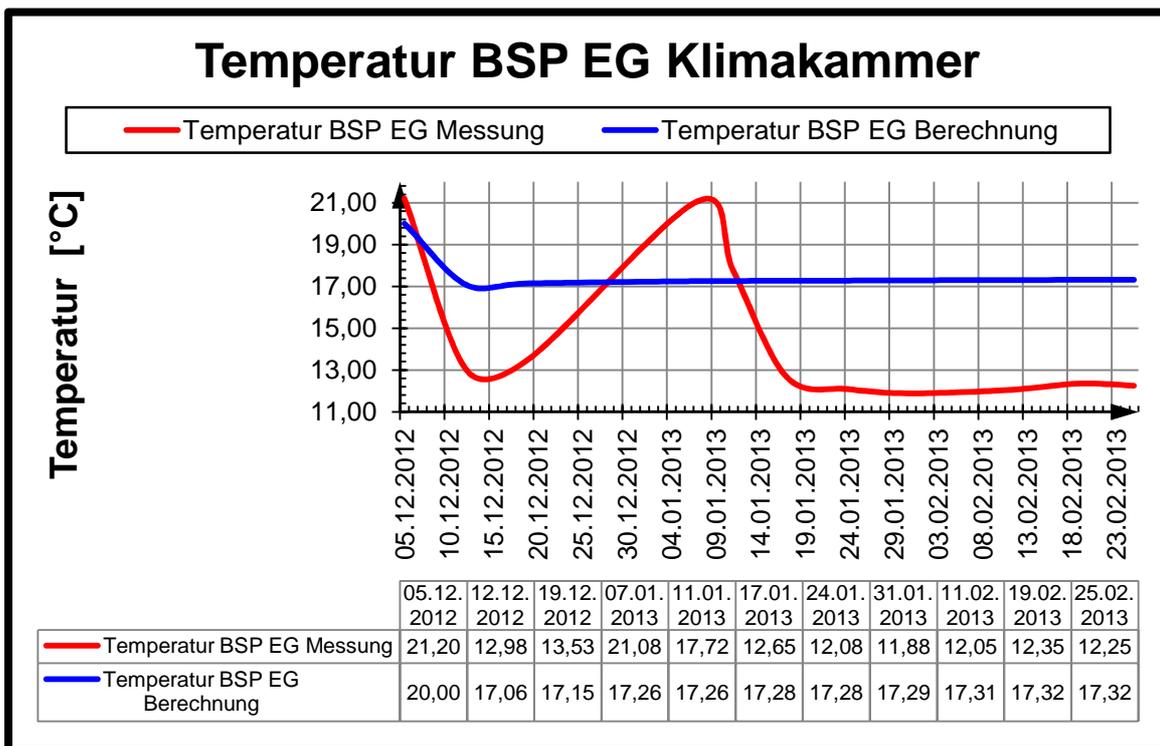


Abb. 60 Gemittelte Temperatur BSP EG Klimakammer

Die Obergeschossplatte besitzt an der Außenseite nur eine Messstelle (Nr. 22), die mittig im oberen Drittel der Platte angeordnet ist und wie aus den Messprotokollen hervorgeht im Schnitt eine Temperatur von ca. 6,50°C aufweist (Kammerausfall ausgenommen). wenn man diese Messstelle nun in der Berechnung betrachtet, so weist sie hier eine Temperatur von ca. 16,00°C auf. Die Temperatur an der Außenseite wird also in der Berechnung überschätzt. Die gemittelte Temperatur der Messstellen 4 und 5 ergab aus der Messung ca. 21,70°C und in der Berechnung ca. 19,20°C. Hier wird die Temperatur also unterschätzt. Aus diesem Zusammenhang resultiert die Abweichung aus der Temperaturmessung und der Temperaturberechnung. Die Erdgeschossplatte weist den gleichen Zusammenhang auf, nur mit dem Unterschied, dass hier gleich viele Messpunkte an der Innen- und der Außenseite vorhanden sind und die Werte der Temperaturabweichung zwischen Messung und Berechnung etwas andere sind. Die Anordnung der Messpunkte ist aus dem Kapitel Detailplanung sowie aus dem Plananhang zu entnehmen. Einen Einfluss auf die Temperaturdifferenz, aus der Berechnung und der Messung der Oberflächentemperatur, haben mit Sicherheit auch die tatsächlichen Luftgeschwindigkeiten, am Versuchsmodell auf der Kammeraußen- bzw. Kammerinnenseite. Diese werden durch die Klimageräte der Kammerseiten bestimmt und sind an der Außenseite in diesem speziellen Fall stärker.

### 6.2.3 Analyse Deckenplatte

Auch im Wassergehaltsauswertungsdiagramm der Deckenplatte kann man sehr schön den Ausfall der Klimakammer erkennen. Was hier noch besonders ins Auge springt ist die Gegenläufigkeit der Messungs- und Berechnungsfunktion. Bei einem anfänglich gleichen Wassergehalt von  $61,55\text{kg/m}^3$  aus der Messung vom 04.12.2012, prognostiziert die Berechnung einen Wassergehalt von  $64,65\text{kg/m}^3$ , also eine Zunahme von  $3,10\text{kg/m}^3$  und die Messung ergibt einen Wassergehalt von  $54,66\text{kg/m}^3$ , was einer Abnahme von  $6,89\text{kg/m}^3$  entspricht. Die Differenz beträgt also  $9,99\text{kg/m}^3$  Wasser.

Diese Entwicklung der Funktionen ist teilweise dem Polystyrolbeton, respektive dem Wassergehalt desselben zuzuschreiben. Durch den gleichen Startwert von  $50,00\text{kg/m}^3$  wie bei der Aklimatisationsberechnung wurde dieser mit Sicherheit überschätzt.

Um diese spezielle Situation des Versuchsaufbaues besser abbilden zu können, wäre es von Vorteil gewesen, den Wassergehalt des Polystyrolbetons bei der 2. Messung am 04.12.2012 zu bestimmen und mit dem so gewonnenen Wert in die Berechnung zu gehen.

Eine zusätzliche Berechnung mit einem Startwert von  $25\text{kg/m}^3$  ergab einen etwas geringeren Wassergehalt der BSP-Deckenplatte, aber auch eine Feuchtigkeitszunahme derselben.

Des Weiteren ist aus der Berechnung zu erkennen, dass sich der Wassergehalt einpendelt und mit  $64,65\text{kg/m}^3$ , was einer relativen Holzfeuchte von  $15,77\%$  entspricht, keine Werte erreicht, die dem Bauteil dauerhaft schaden. Die Funktion der Messungsauswertung zeigt sogar eine Feuchtigkeitsabnahme der BSP-Deckenplatte.

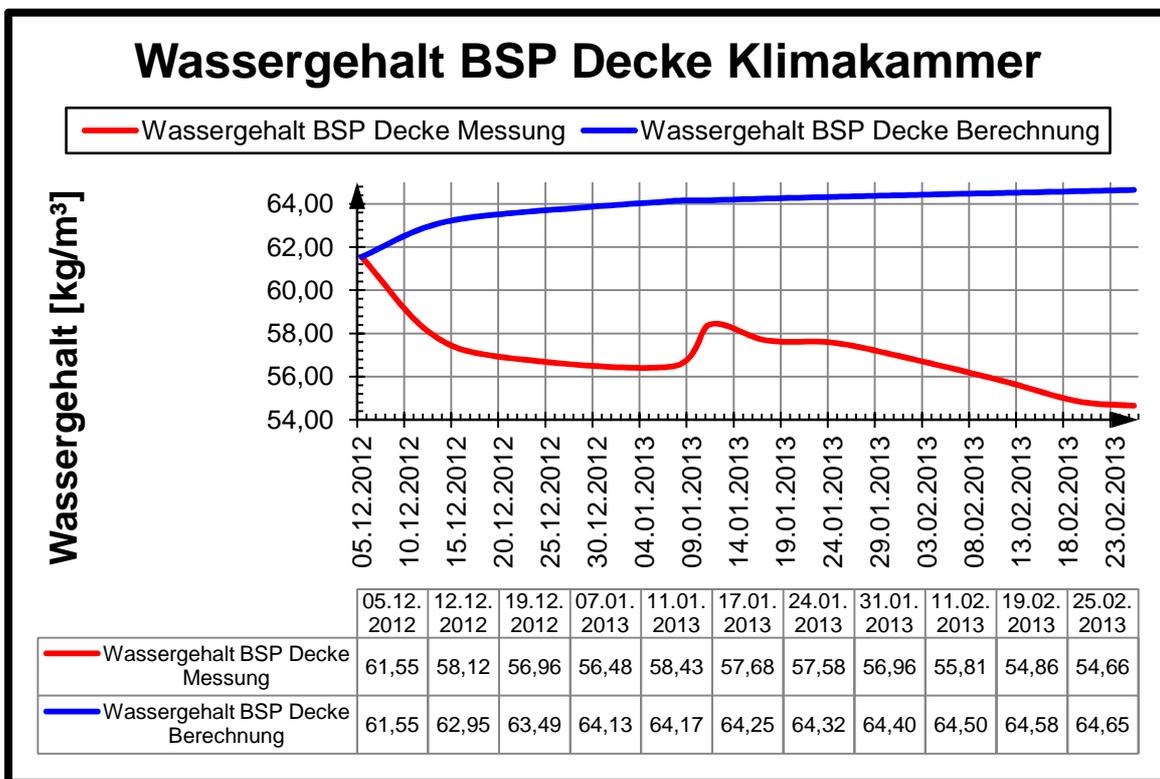


Abb. 61 Gemittelter Wassergehalt BSP Decke Klimakammer

Der Mittelwert aus den Temperaturmessungen bezogen auf die Deckenplatte, wurde auf demselben Weg wie die Mittelwerte der Wandplatten ermittelt. Im Auswertungsdiagramm ist auch wieder der Kammerausfall deutlich zu erkennen. Die Berechnung passt mit den Messungen erstaunlich gut überein und weist mit 25.02.2013 eine Abweichung von nur 1,79°C auf, wobei hier im Gegensatz zu den Wandplatten die Temperatur unterschätzt wird. Abweichungen dieser Größenordnung wird keine Bedeutung zugeschrieben und sie dürfen auf jeden Fall vernachlässigt werden.

Aus der Berechnung der Wandplatten geht hervor, dass diese wärmer sind als die Messung ergab. Bei der Deckenplatte ist dies umgekehrt. Die Berechnung ergibt eine geringfügig niedrigere Temperatur.

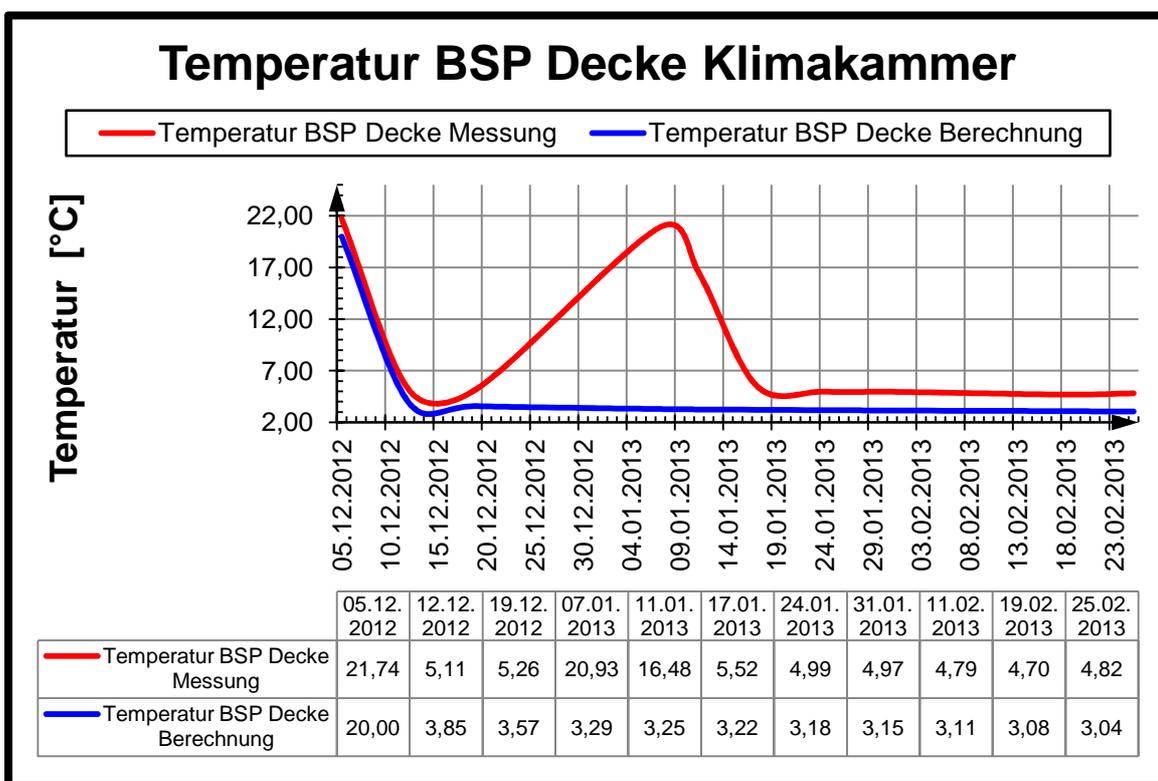


Abb. 62 Gemittelte Temperatur BSP Decke Klimakammer

### 6.2.4 Analyse Messpunkte

In weiterer Folge werden aus der durchgeführten Berechnung des Versuchsmodells noch 4 Messpunkte genauer betrachtet. Dies geschieht wiederum mit dem Programmaufsatz **WUFIGraph**.

Dabei wurden zur Bestimmung des Wassergehaltes jene Bereiche des Berechnungsnetzes markiert, die den jeweiligen Messpunkten zugeordnet werden konnten und über diese wurde vom Programm der gemittelte Wassergehalt bestimmt. Bei der Auswahl der Berechnungsnetzbereiche wurde weiters beachtet, dass die Messung der Holzfeuchte mit nicht isolierten Elektrodenspitzen bis zu einer maximalen Tiefe von 54mm durchgeführt wurde. So konnte die Anzahl der auszuwählenden Elemente in x- und in y-Richtung bestimmt werden.

Bei der Bestimmung der Oberflächentemperatur wurde gleich vorgegangen, mit dem Unterschied, dass für die Temperatur nur sehr oberflächennahe Netzbereiche zur Bestimmung der Temperatur herangezogen wurden, da das verwendete Temperaturmessgerät nur in der Lage ist, die Oberflächentemperatur des jeweiligen Messpunktes zu erfassen.

#### 6.2.4.1 Messpunkt 13

Der Messpunkt 13 befindet sich im Bereich der Innenseite des Versuchsmodelles unter dem Fußbodenaufbau.

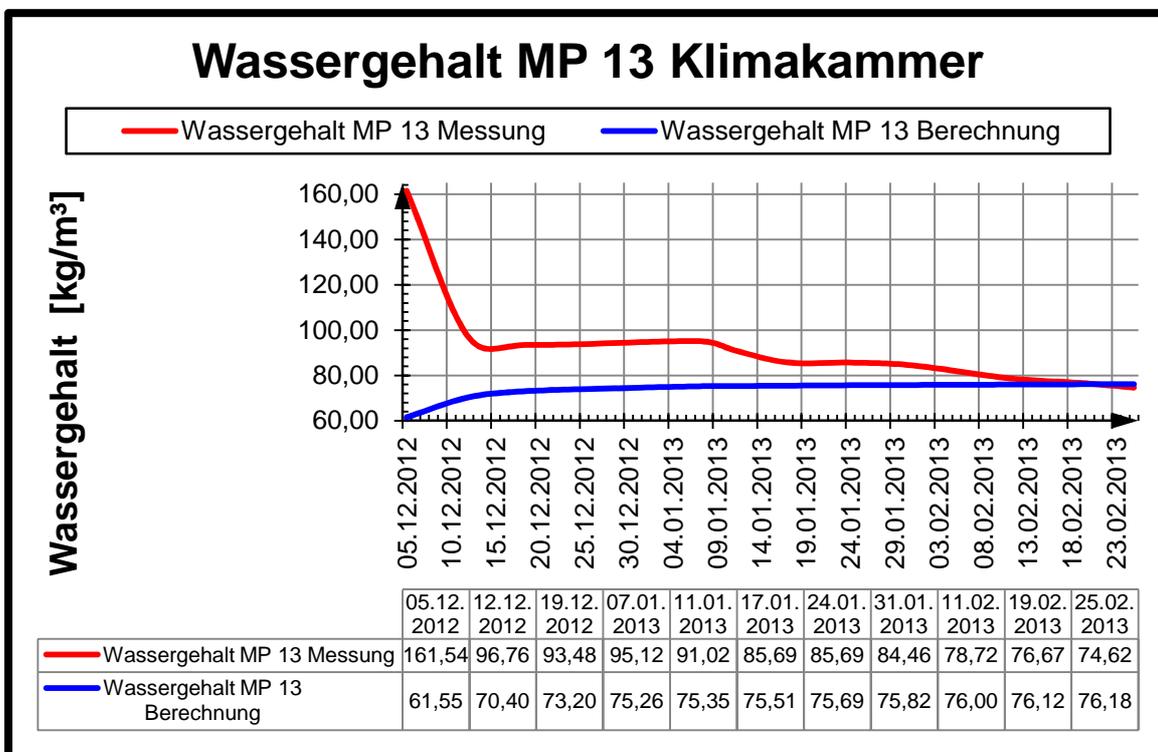


Abb. 63 Gemittelter Wassergehalt Messpunkt 13 Klimakammer

Als Startwert der Messung wurde der Wassergehalt der Messstelle 13 aus der 2. Messung vom 04.12.2012 mit 161,54kg/m<sup>3</sup> (39,40%) festgelegt. Für die Berechnung gilt der vorab im Kapitel Differenzdruckklimakammer gemittelte Wassergehalt der Brettsperrholzdeckenplatte, der sich ebenfalls aus der zweiten Messung berechnet.

Im Auswertungsdiagramm des Wassergehaltes kann man wieder schön den Ausfall der Klimakammer erkennen. Des Weiteren erkennt man die anfänglich starke Abnahme des Wassergehaltes der BSP-Platte in der Funktion aus den Messwerten. Am 25.02.2013 liegt der Wassergehalt der Messung mit 74,62kg/m<sup>3</sup> (18,69%) unter jenem der Berechnung mit 76,19kg/m<sup>3</sup>(18,58%). Damit unterscheidet sich die Berechnung von der Messung um nur 1,57kg/m<sup>3</sup>.

Ausgangspunkt der Temperaturmessungsfunktion war die Oberflächentemperatur der Messstelle 13 aus der 2. Messung am 04.12.2012 mit 22,10°C. Wie bei der Auswertung der Deckenplatte, wird auch hier die Temperatur in der Berechnung unterschätzt. Am 25.02.2013 betrug die errechnete Oberflächentemperatur 16,28°C, wohingegen die gemessene Temperatur bei 21,30°C lag. Dies entspricht einer Temperaturdifferenz von 5,02°C.

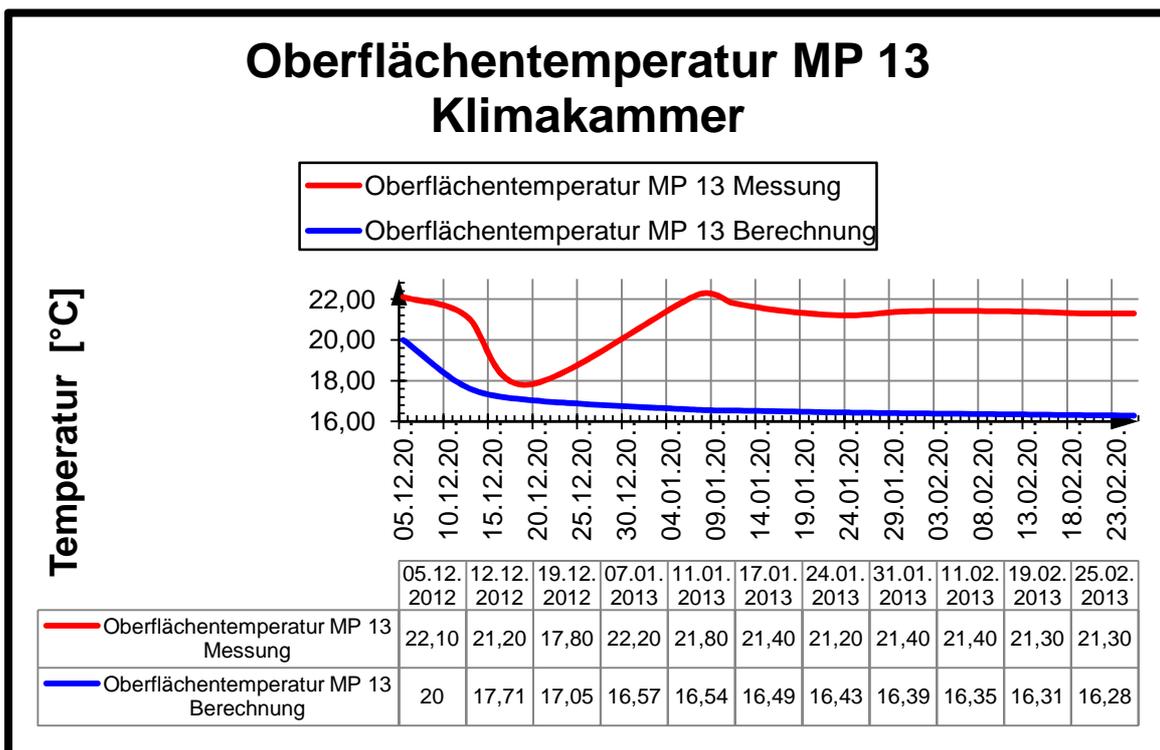


Abb. 64 Gemittelte Oberflächentemperatur Messpunkt 13 Klimakammer

### 6.2.4.2 Messpunkt 20

Der Messpunkt 20 befindet sich im Bereich der Außenseite des Versuchsmodells an der Deckenplattenunterseite direkt vor der Fassadendämmung der Erdgeschossplatte.

Als Startwert der Messung wurde der Wassergehalt der Messstelle 20 aus der 2. Messung vom 04.12.2012 mit 45,51kg/m<sup>3</sup> (11,10%) festgelegt. Für die Berechnung gilt der vorab im Kapitel Differenzdruckklimakammer gemittelte Wassergehalt der Brettsperrholzdeckenplatte, der sich ebenfalls aus der zweiten Messung berechnet.

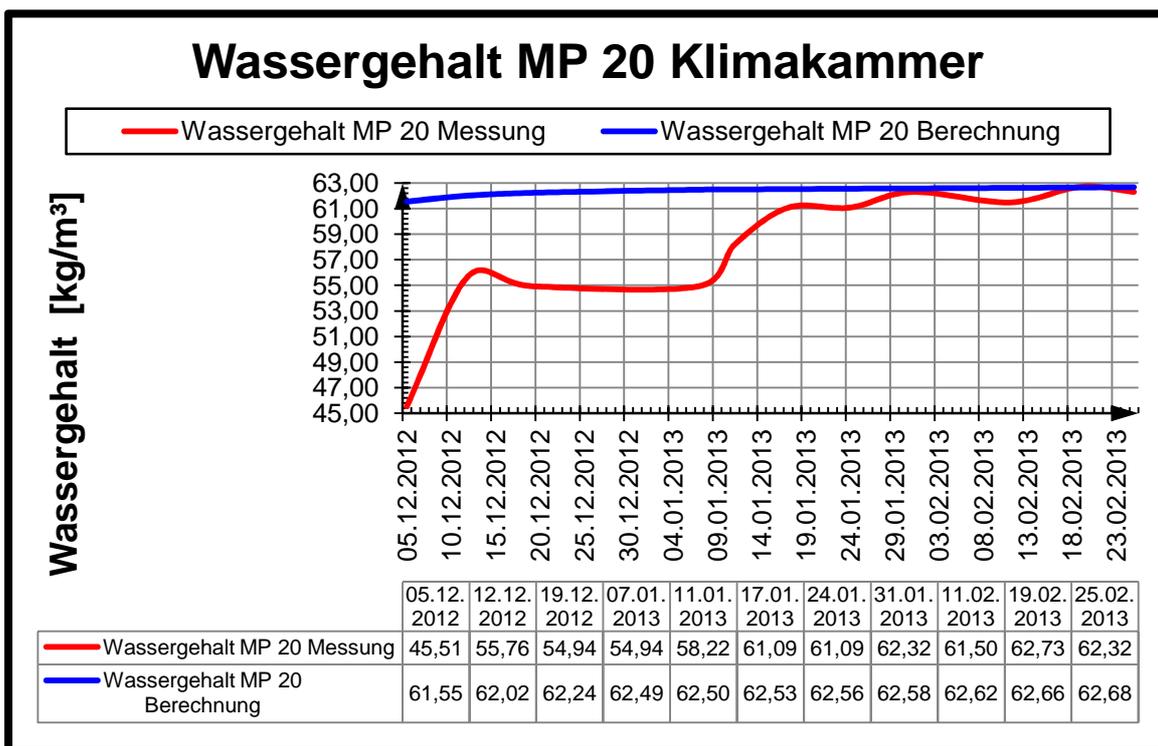


Abb. 65 Gemittelter Wassergehalt Messpunkt 20 Klimakammer

Anhand der Auswertungsdiagramme sieht man sehr schön, dass sowohl der Wassergehalt, als auch die Temperatur mit 25.02.2013 fast ident sind. Der Wassergehalt wird in der Berechnung leicht überschätzt und hat eine Abweichung von 0,36kg/m<sup>3</sup>. Die Temperaturabweichung von der Berechnung zu den Messergebnissen wird unterschätzt und beträgt gerade einmal 0,03°C. Im Auswertungsdiagramm für den Wassergehalt ist der Ausfall der Klimakammer durch einen waagrechten Verlauf der Funktion aus den Messergebnissen zu erkennen. Der Wassergehalt laut Messung beträgt mit 25.02.2013 62,32kg/m<sup>3</sup>, was einer relativen Holzfeuchte von 15,20% entspricht.

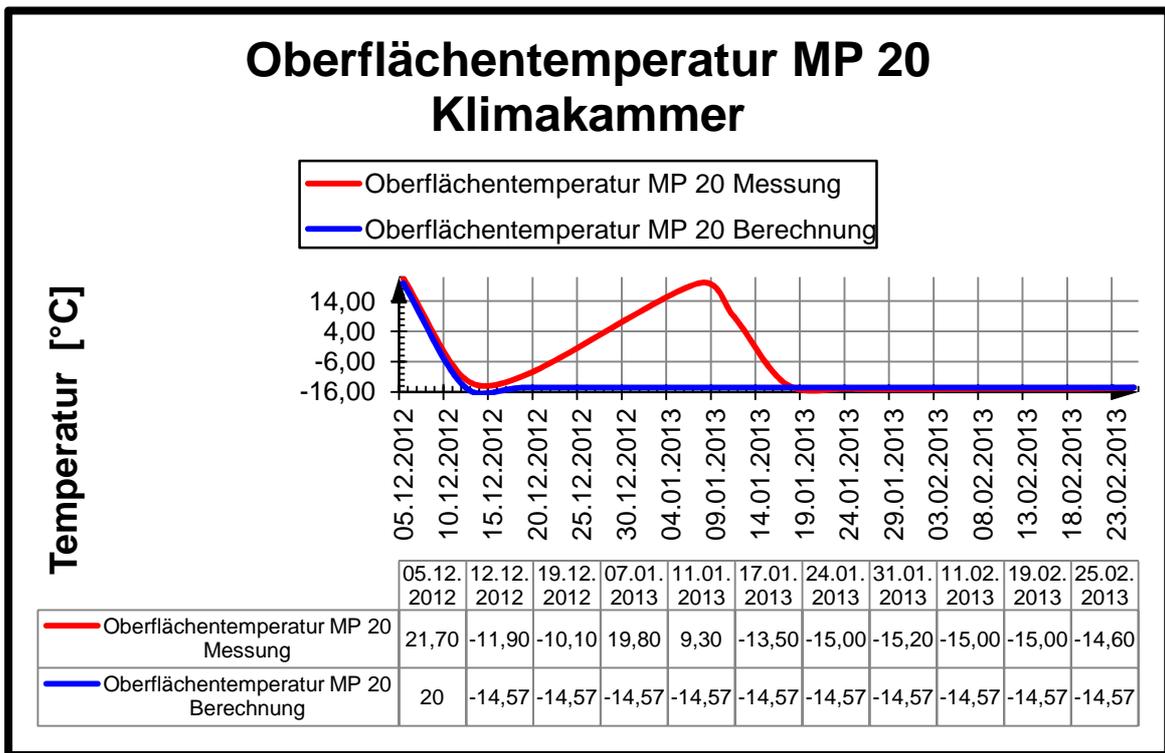


Abb. 66 Gemittelte Oberflächentemperatur Messpunkt 20 Klimakammer

Ausgangspunkt der Temperaturmessungsfunktion war die Oberflächentemperatur der Messstelle 20 aus der 2. Messung am 04.12.2012 mit 21,70°C. Wie bei allen Temperatúrauswertungsdiagrammen schlägt sich auch hier der Klimakammerausfall zu Buche und verursacht am 07.01.2013 einen Knick in der Funktion der Temperaturmessergebnisse. Mit einer Temperaturspanne von fast 35,00°C gehört diese Messstelle sowie einige andere in ähnlicher Lage zu jenen Punkten, bei denen die Auswirkung von der plötzlichen Temperaturzunahme am deutlichsten zu sehen war.

### 6.2.4.3 Messpunkt 3

Der Messpunkt 3 befindet sich im oberen Viertel an der Innenseite der Erdgeschossplatte des Versuchsmodells. Die Funktion aus der Berechnung für den Messpunkt 2 ist ident der des Messpunktes 2.

Als Startwert der Messung wurde der Wassergehalt der Messstelle 3 aus der 2. Messung vom 04.12.2012 mit 59,45kg/m<sup>3</sup> (11,10%) festgelegt. Für die Berechnung gilt der vorab im Kapitel Differenzdruckklimakammer gemittelte Wassergehalt der Brettsperrholzwandplatte, der sich ebenfalls aus der zweiten Messung berechnet.

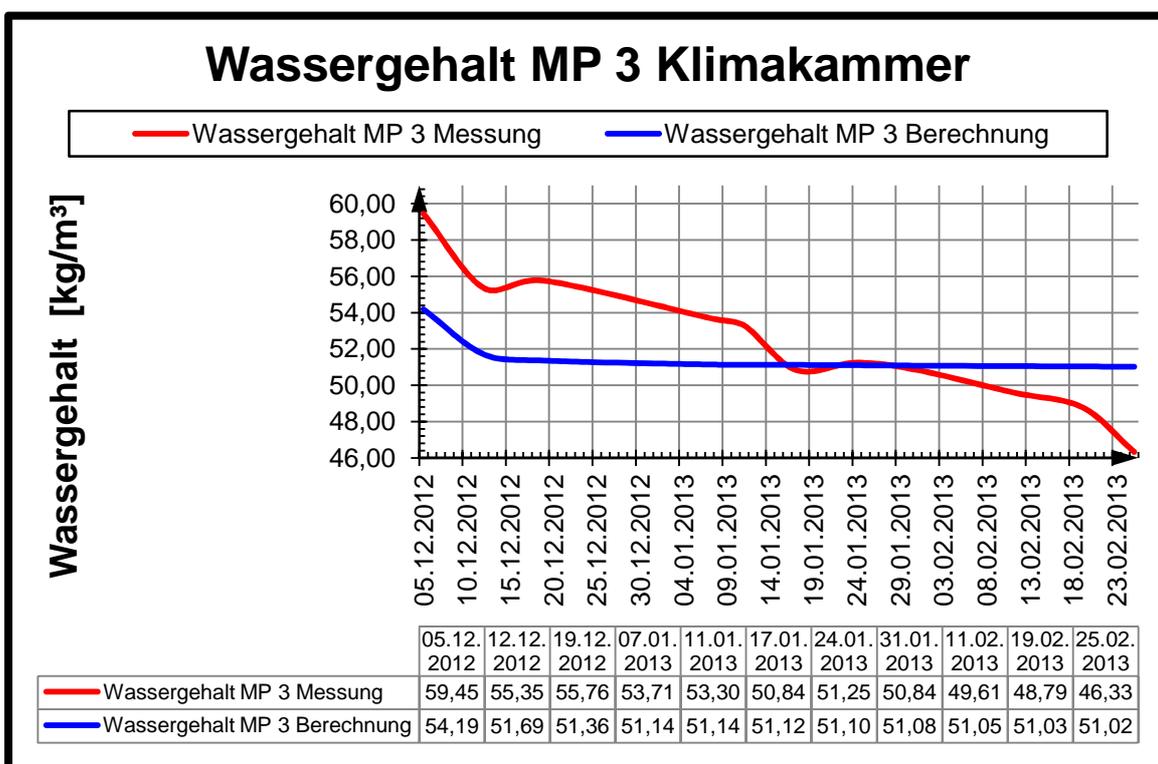


Abb. 67 Gemittelter Wassergehalt Messpunkt 3 Klimakammer

Das Auswertungsdiagramm des Wassergehaltes zeigt, dass die BSP-Wandplatte an dieser Stelle von dem Ausfall der Klimakammer nur etwas beeinflusst wurde. Sehr schön ist auch zu erkennen, dass die Werte aus der Messung und der Berechnung am 24.01.2013 annähernd ident sind. Nach diesem Datum ist die Berechnung schon als konservativ anzusehen.

Sowohl die Funktion aus den Berechnungsergebnissen, als auch die Funktion aus den Messergebnissen ist fallend. Der Wassergehalt laut Messung beträgt mit 25.02.2013 46,33kg/m<sup>3</sup>, was einer relativen Holzfeuchte von 11,30% entspricht. Dagegen beträgt der Wassergehalt laut Berechnung 51,02kg/m<sup>3</sup> (12,44%). Daraus folgt, dass dieser in der Berechnung um 4,69kg/m<sup>3</sup> überschätzt wird.

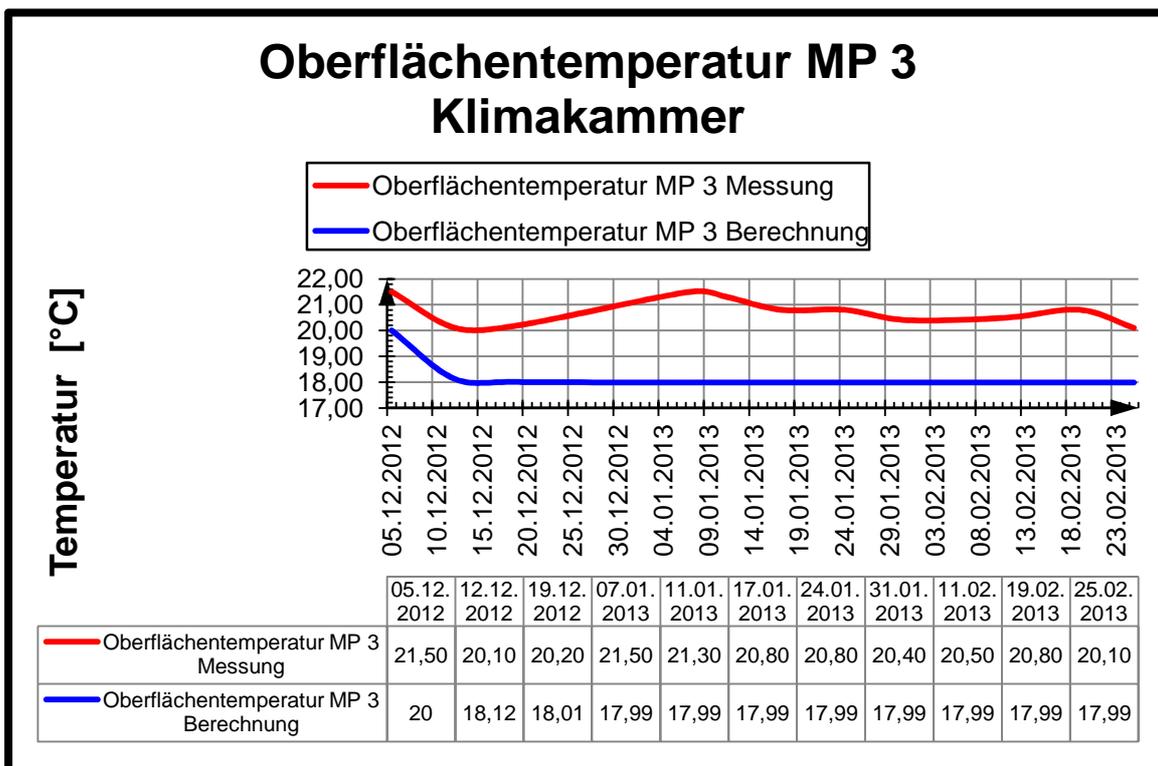


Abb. 68 Gemittelte Oberflächentemperatur Messpunkt 3 Klimakammer

Ausgangspunkt der Temperaturmessungsfunktion war die Oberflächentemperatur der Messstelle 3 aus der 2. Messung am 04.12.2012 mit 21,50°C.

Wie bei der Auswertung der gemittelten Temperatur der Wandplatten (siehe Kapitel Analyse und Vergleich Wandplatten) wird auch hier die Oberflächentemperatur der BSP-Wandplatte an der Innenseite unterschätzt.

Die Oberfläche der Brettsperrholzplatte wird also in der Berechnung kälter dargestellt als sie in Wirklichkeit ist. Dies stellt keinen Nachteil für die Konstruktion dar. Mit 25.02.2013 ergibt die Berechnung eine Oberflächentemperatur von 17,99°C, während die Messung 20,10°C ergab. Daraus ergibt sich eine Temperaturdifferenz von 2,11°C.

### 6.2.4.4 Messpunkt 24

Der Messpunkt 24 befindet sich in der oberen Hälfte an der Außenseite der Erdgeschossplatte des Versuchsmodells.

Als Startwert der Messung wurde der Wassergehalt der Messstelle 24 aus der 2. Messung vom 04.12.2012 mit 48,38kg/m<sup>3</sup> (11,80%) festgelegt. Für die Berechnung gilt der vorab im Kapitel Differenzdruckklimakammer gemittelte Wassergehalt der Brettsperrholzwandplatte, der sich ebenfalls aus der zweiten Messung berechnet.

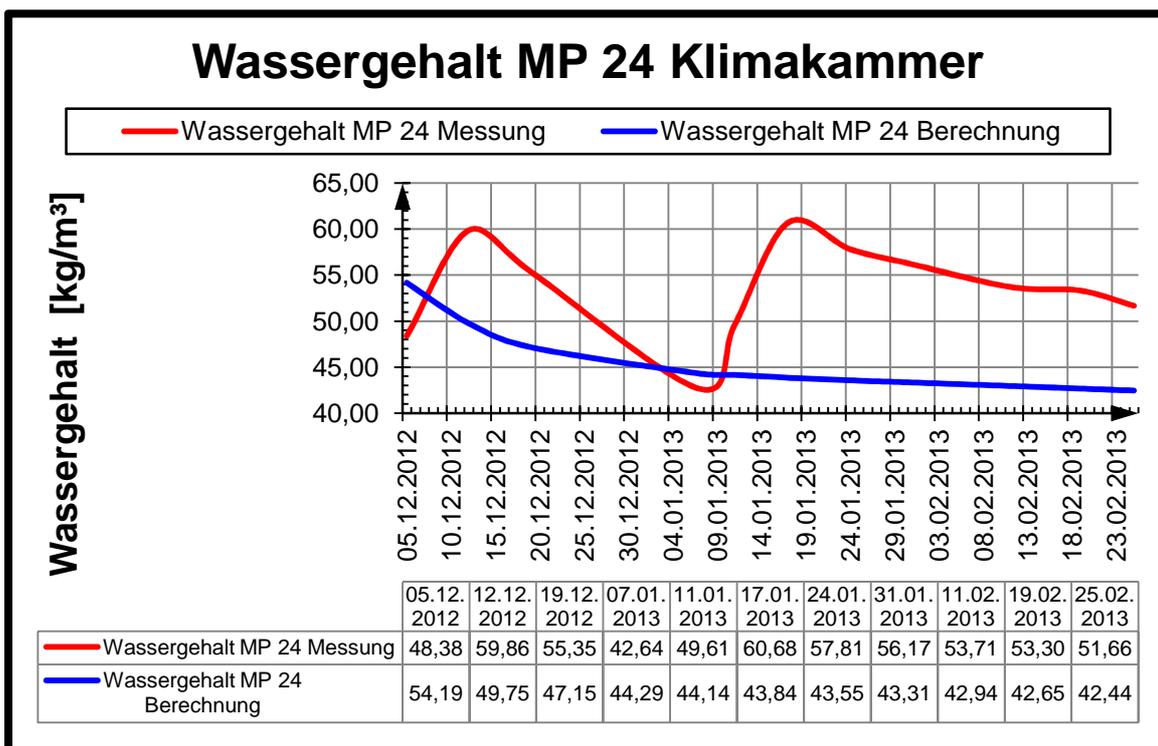


Abb. 69 Gemittelter Wassergehalt Messpunkt 24 Klimakammer

Sowohl die Funktion aus den Berechnungsergebnissen, als auch die Funktion aus den Messergebnissen ist fallend. Der Wassergehalt laut Messung beträgt mit 25.02.2013 51,66kg/m<sup>3</sup>, was einer relativen Holzfeuchte von 12,60% entspricht. Dagegen beträgt der Wassergehalt laut Berechnung 42,44kg/m<sup>3</sup> (10,35%).

Daraus folgt, dass der Wassergehalt bei der 12. Messung am 25.02.2013 um 9,22kg/m<sup>3</sup> höher ist als der der Berechnung, was aber in erster Linie mit dem Klimakammerausfall im Zusammenhang steht. Zu erkennen ist, dass der Wassergehalt in Wirklichkeit schneller abnimmt, als dies die Berechnung prognostiziert.

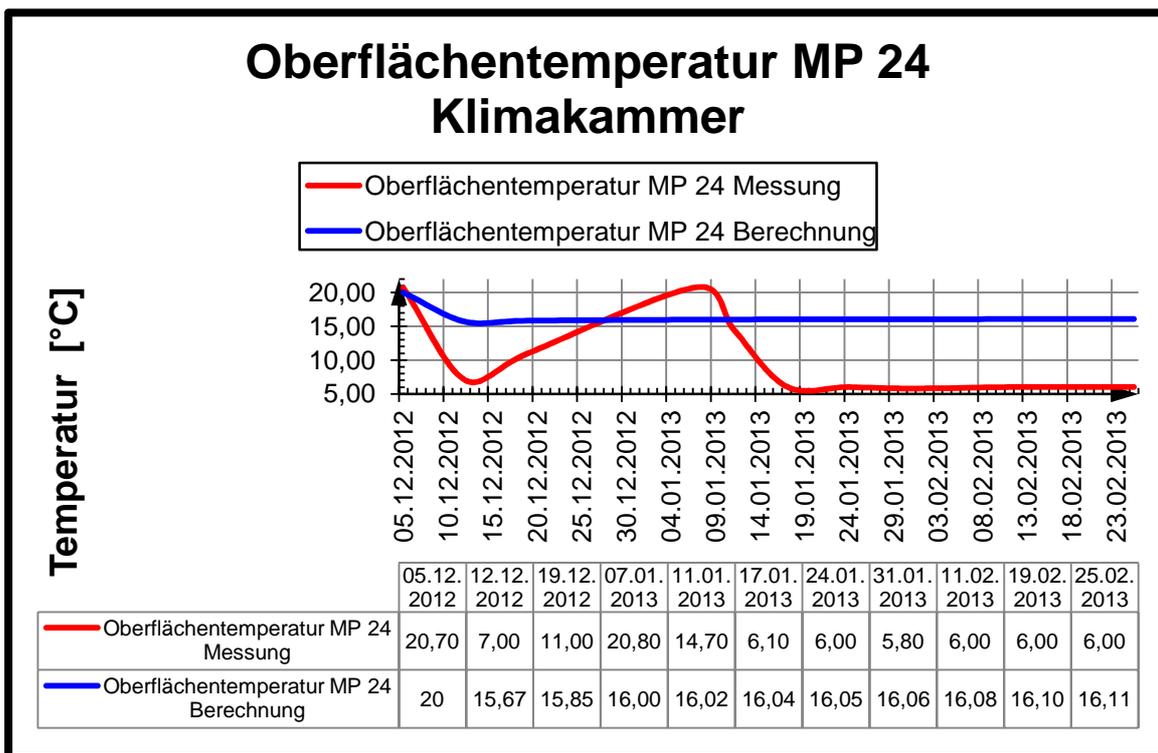


Abb. 70 Gemittelte Oberflächentemperatur Messpunkt 24 Klimakammer

Ausgangspunkt der Temperaturmessungsfunktion war die Oberflächentemperatur der Messstelle 24 aus der 2. Messung am 04.12.2012 mit 20,70°C.

Wie bei der Auswertung der gemittelten Temperatur der Wandplatten (siehe Kapitel Analyse und Vergleich Wandplatten) wird auch hier die Oberflächentemperatur der BSP-Wandplatte an der Außenseite überschätzt.

Die Oberfläche der Brettsperrholzplatte wird also in der Berechnung wärmer dargestellt, als sie in Wirklichkeit ist. Daraus folgt, dass das Wärmegefälle, welches in direktem Zusammenhang mit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK] der Baustoffschichte steht steiler ist und somit dem Wärmefluss in der BSP-Schichte weniger Widerstand entgegen gebracht wird. Mit 25.02.2013 ergibt die Berechnung eine Oberflächentemperatur von 16,11°C, während die Messung 6,00°C ergab. Daraus ergibt sich eine Temperaturdifferenz von 10,11°C.

### 6.3 Berechnungsergebnisse aus Therm 5.2

Aus der Darstellung der Isothermen ist gut zu erkennen, dass auch hier die Oberflächentemperatur der BSP-Platte im Bereich des Messpunktes 24 etwa  $15,00^{\circ}\text{C}$  erreicht. Alle anderen Ergebnisse passen auch sehr gut mit den Temperaturentwertungen aus den Berechnungen mit WUFI2D-3 zusammen.

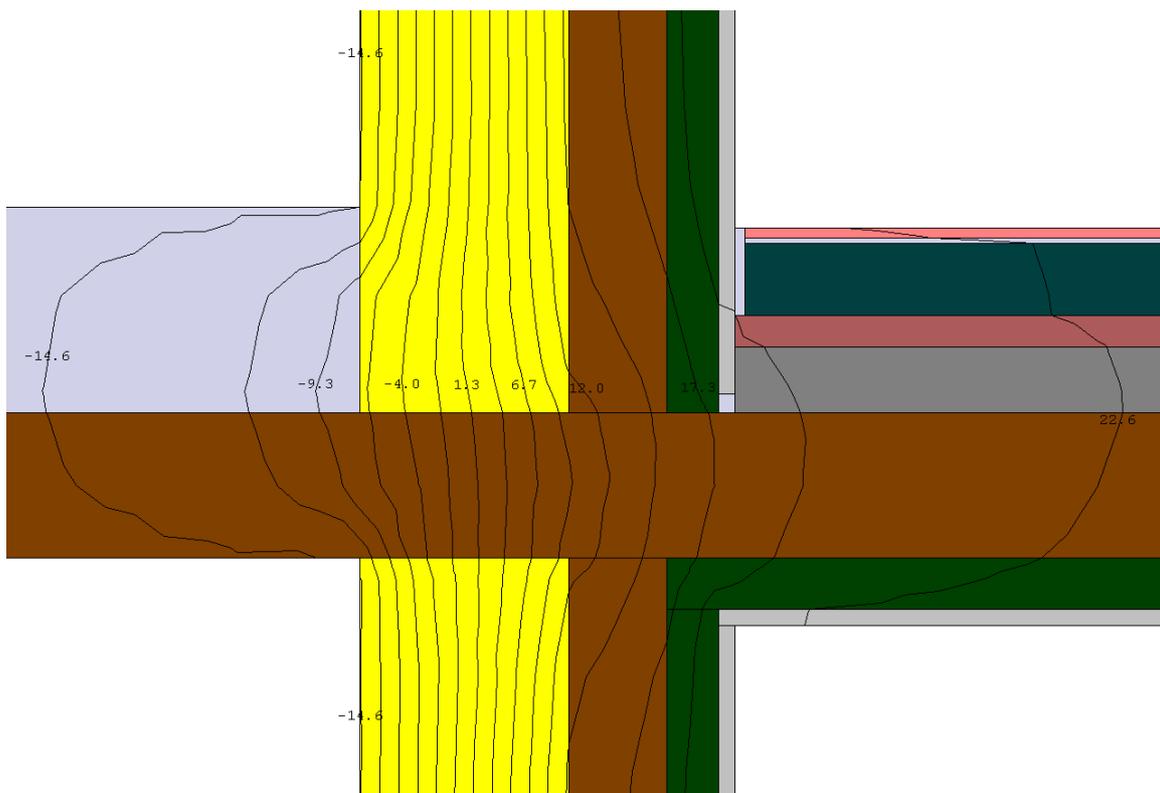


Abb. 71 Isothermen im Deckenbereich des Versuchsmodells

Auch kann man erkennen, dass die Ergebnisse streuen. Exakte Aussagen über Temperaturen an gewissen Stellen in Bauteilen sind nicht möglich. Im Übergangsbereich Erdgeschossplatte-Deckenplatte an der Außenseite des Versuchsmodelles zum Beispiel, ergibt die Berechnung eine Oberflächentemperatur von etwa  $10,00^{\circ}\text{C}$ . Aus den Messprotokollen geht hervor, dass die Messstellen 23 und 26, die in diesem Bereich situiert sind, im Schnitt Oberflächentemperaturen von etwa  $-1,00^{\circ}\text{C}$  aufweisen.

Grund für diese Abweichung kann sein, dass die Fassadendämmung in diesem Bereich nicht dicht an der Deckenplatte anliegt und somit die Modellierung nicht exakt mit dem Berechnungsmodell übereinstimmt. In der Praxis müsste daher darauf geachtet werden, dass die Dämmung vollständig an der Brettsperrholzdeckenplatte anliegt, um eine Hinterlüftung der Dämmung in diesem Bereich zu vermeiden.

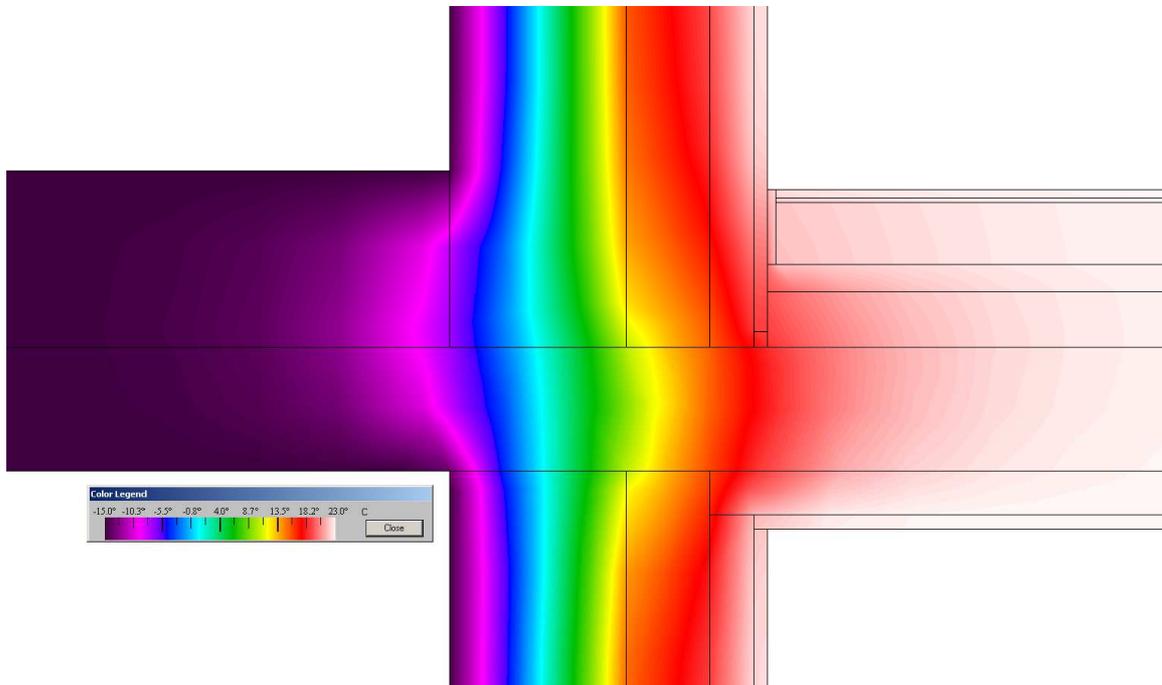


Abb. 72 Temperaturverlauf im Deckenbereich des Versuchsmodells

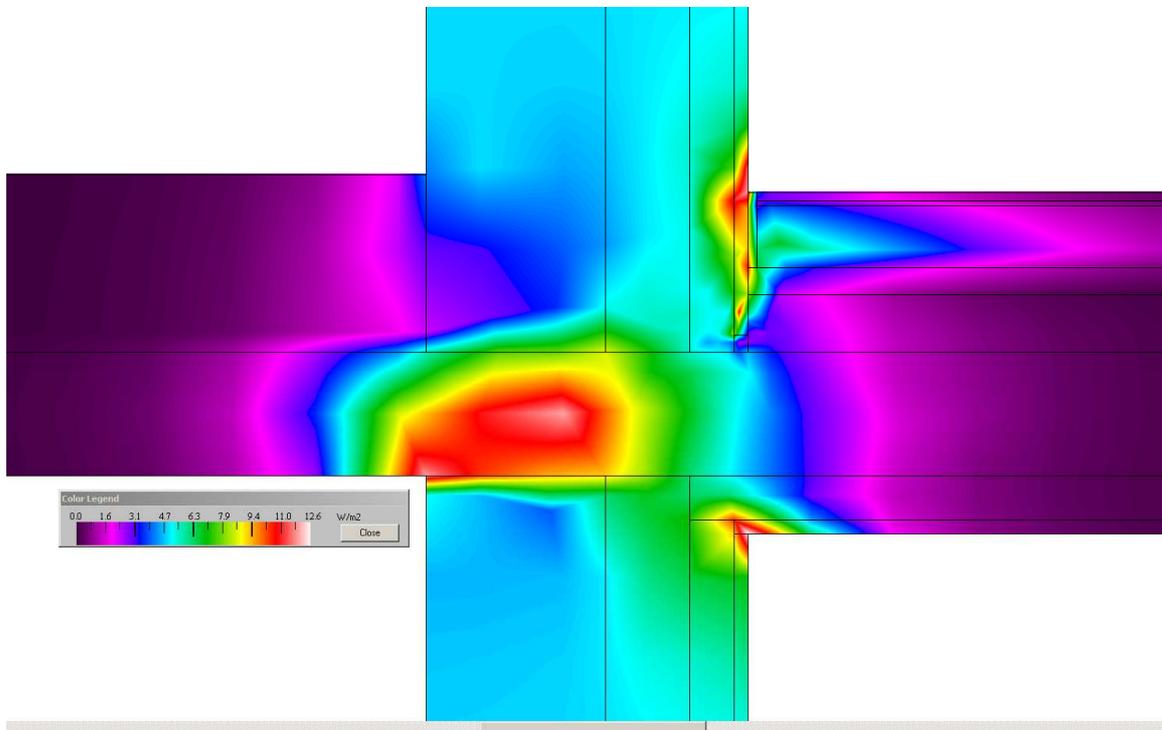


Abb. 73 Wärmefluss im Deckenbereich des Versuchsmodells

## 7 DETAILBERECHNUNGEN

### 7.1 Allgemeines

Für die Berechnungen der Details, wurde für die Brettsperrholzelemente ein anfänglicher Wassergehalt von  $60,00\text{kg/m}^3$  und für den Polystyrolbeton  $50,00\text{kg/m}^3$  angesetzt. Die Anfangstemperatur wurde mit  $20,00^\circ\text{C}$  gewählt. Das Innenklima wurde mit einer mittleren Temperatur von  $21,00^\circ\text{C}$  und einer Amplitude von einem Grad Celsius und die relative Luftfeuchte mit einem Mittelwert von  $50,00\%$  und einer Amplitude von  $10,00\%$  gewählt. Dies entspricht in etwa einer mittleren Feuchtebelastung eines Innenklimas im Wohnbereich. Als Außenklima wurden die Klimadaten der Stadt Graz (Steiermark, Österreich) aus dem Klimadatenkatalog des Programmes WUFI2D-3 ausgewählt. Für die Angabe der Orientierung der Details wurde für eine Nordwest- sowie für eine Nordost-Ausrichtung ein Winkel von  $135,00^\circ$  und für eine Südwest- bzw. Südost-Ausrichtung ein Winkel von  $45,00^\circ$  angenommen. Die Berechnung der Details wurde für die Dauer von 26280 Stunden, was in etwa 3 Jahren entspricht, durchgeführt, um die Feuchteentwicklung der Brettsperrholzelemente über einen etwas längeren Zeitraum abzubilden. Genauere Betrachtungen sind in jenen Gebäudebereichen sinnvoll, an denen sowohl von der Innen- als auch von der Außenseite, mit einem erhöhten Feuchteeintrag zu rechnen ist. Des Weiteren spielt der Konstruktionsaufbau, im speziellen die Verwendung von dampfdichten Materialien an der Außenseite von Brettsperrholzelementen, eine Rolle, da diese das Austrocknen der Materialien nach außen verhindern. Die Detailpläne sind dem Anhang zu entnehmen.

#### 7.1.1 Detail-F

Das Versuchsmodell wurde an das Detail-F Carportanschluss angenähert und so modifiziert, dass ein Einbau in die Klimakammer möglich war und trotzdem noch vergleichbare Ergebnisse erzielt werden konnten.

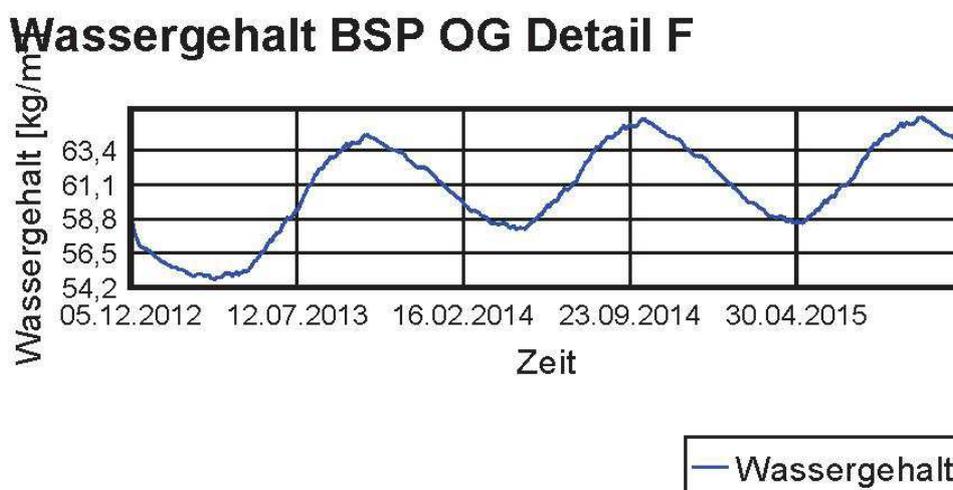


Abb. 74 Gemittelter Wassergehalt BSP OG Detail-F

### Temperatur BSP OG Detail F

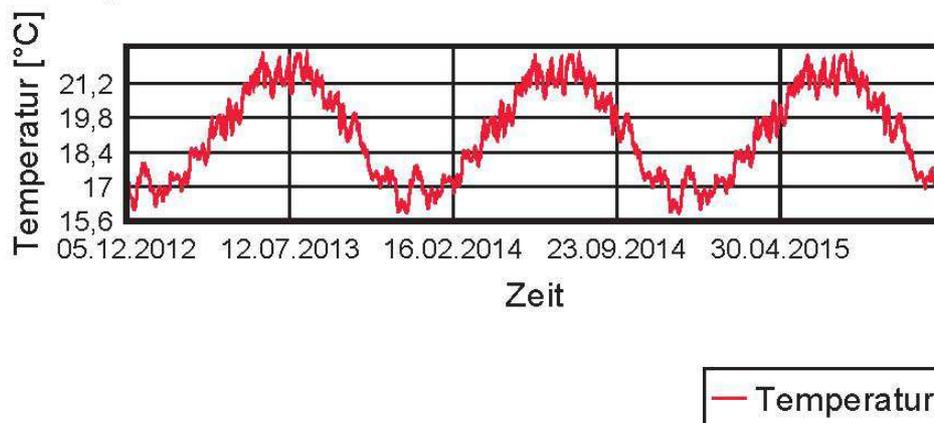


Abb. 75 Gemittelte Temperatur BSP OG Detail-F

Aus dem Auswertungsdiagramm geht hervor, dass sich der Wassergehalt der Obergeschosswand einschwingt. Die anfängliche, leichte Feuchtigkeitszunahme lässt sich durch die einlagige Abdichtung der Wand an der Plattenaußenseite mit einer bitumenkaschierten Aluflämmplatte erklären.

### Wassergehalt BSP Decke Detail F

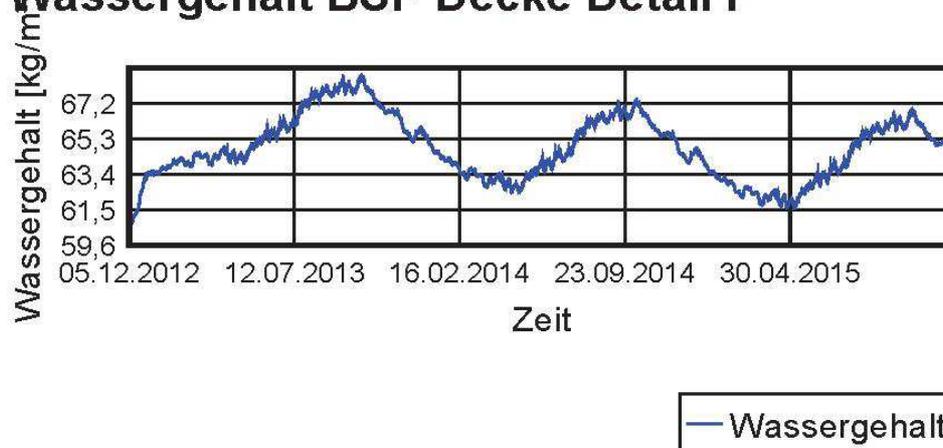


Abb. 76 Gemittelter Wassergehalt BSP Decke Detail-F

Wie oben ersichtlich, nimmt der Wassergehalt der Deckenplatte über die Zeit ab. Damit ist sichergestellt, dass die Konstruktion funktioniert und das Brettsperrholzelement keinen Schaden nimmt, da die Werte im Rahmen liegen und die Berechnung mit WUFI2D-3, wie im Kapitel 5 diskutiert wurde, konservativ ist.

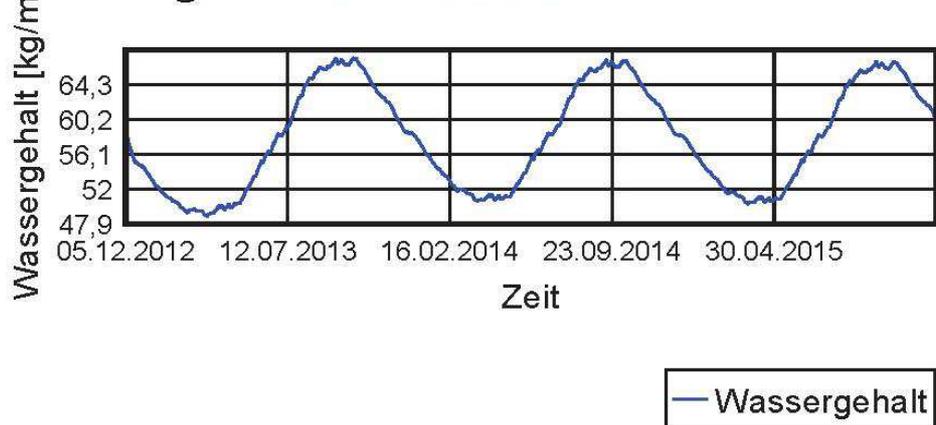
Die Erdgeschossplatte weist im Gegensatz zur Obergeschossplatte in einem kürzeren Zeitraum einen eingeschwungenen Zustand auf, da hier an der Außenseite keine Abdichtung aufgeflämmt ist.

### Temperatur BSP Decke Detail F



Abb. 77 Gemittelte Temperatur BSP Decke Detail-F

### Wassergehalt BSP EG Detail F



### Temperatur BSP EG Detail F

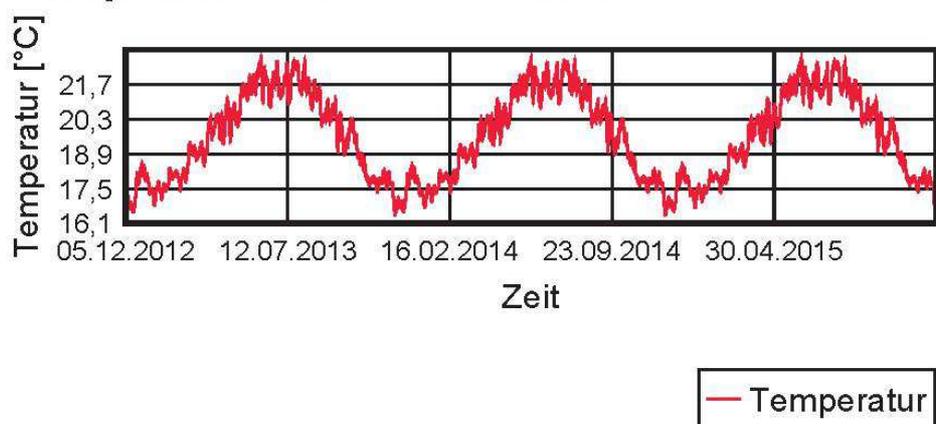


Abb. 78 Gemittelter Wassergehalt und gemittelte Temperatur BSP EG Detail-F

7.1.1.1 Detail-E

Das Detail-E Geschossüberstand ist dem Detail-F sehr ähnlich, nur mit dem Unterschied, dass hier die Deckenplatte nicht als Carportdach weiterläuft, sondern abschließt und vollständig mit der Außendämmung eingepackt ist. Alle Auswertungsdiagramme bescheinigen der Konstruktion eine einwandfreie Funktionstüchtigkeit.

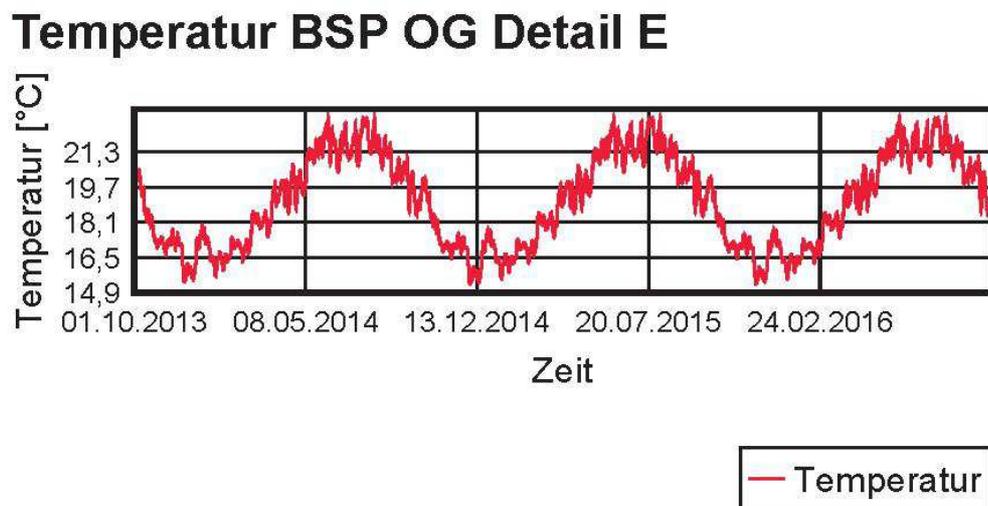
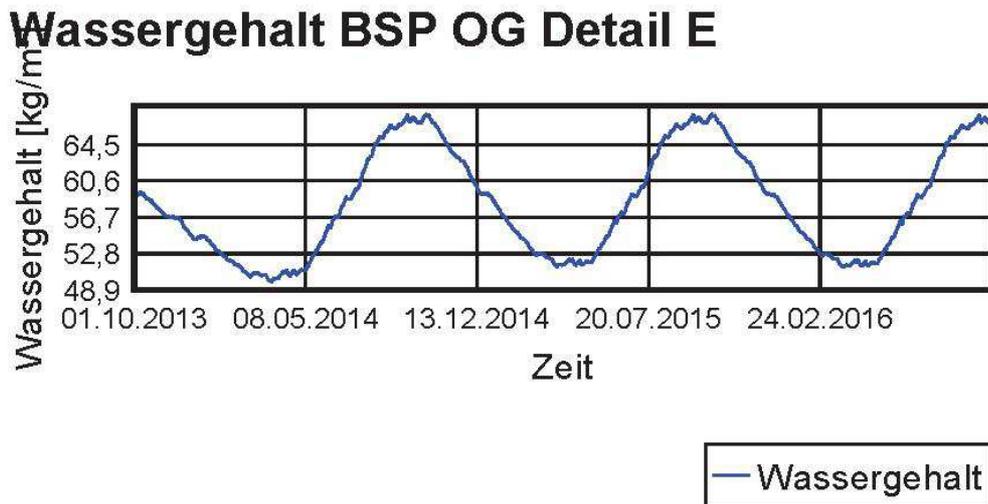
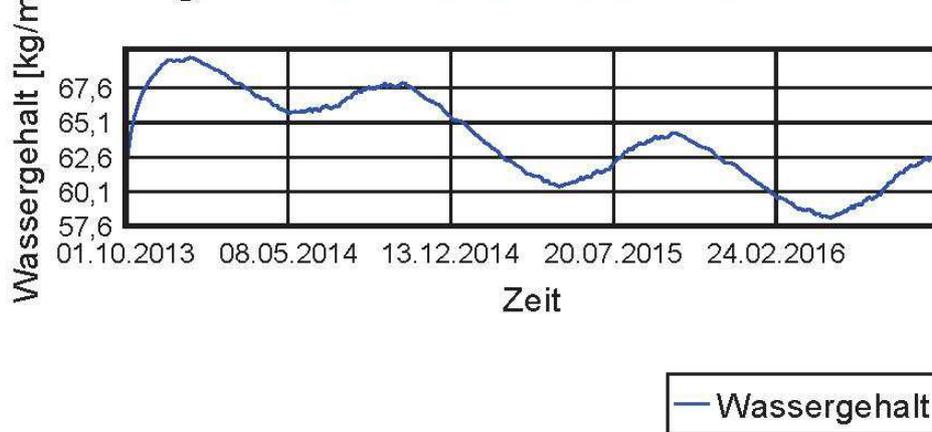


Abb. 79 Gemittelter Wassergehalt und gemittelte Temperatur BSP OG Detail-E

Die Auswertungsergebnisse des Wassergehaltes der Wandplatten, zeigen sowohl im Ober-, als auch im Erdgeschoss, einen eingeschwungenen Zustand, der im Rahmen der erlaubten Parameter liegt.

### Wassergehalt BSP Decke Detail E



### Temperatur BSP Decke Detail E

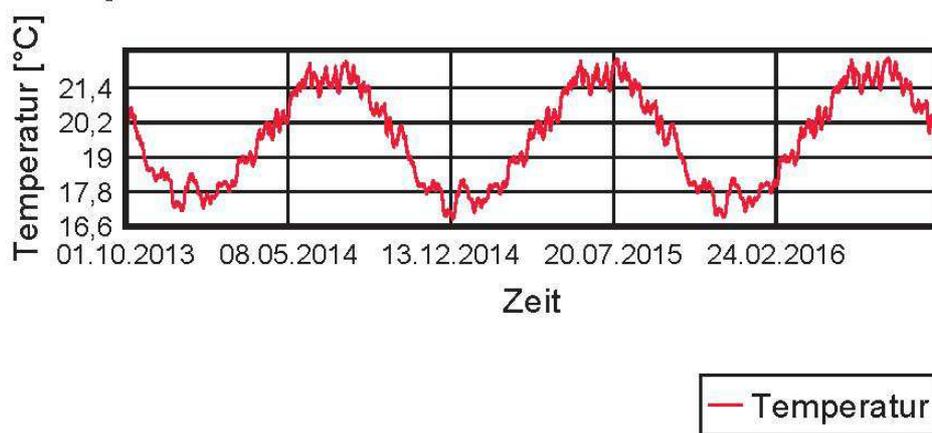


Abb. 80 Gemittelter Wassergehalt und gemittelte Temperatur BSP Decke Detail-E

### Wassergehalt BSP EG Detail E

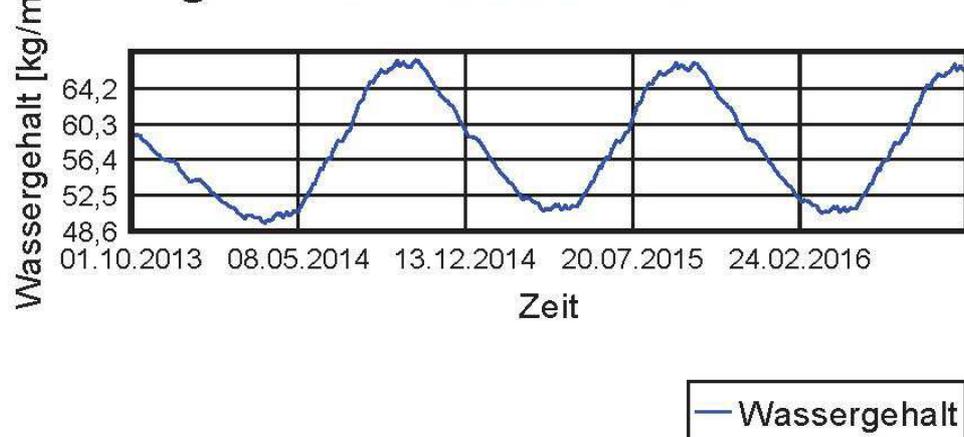


Abb. 81 Gemittelter Wassergehalt BSP EG Detail-E

### Temperatur BSP EG Detail E

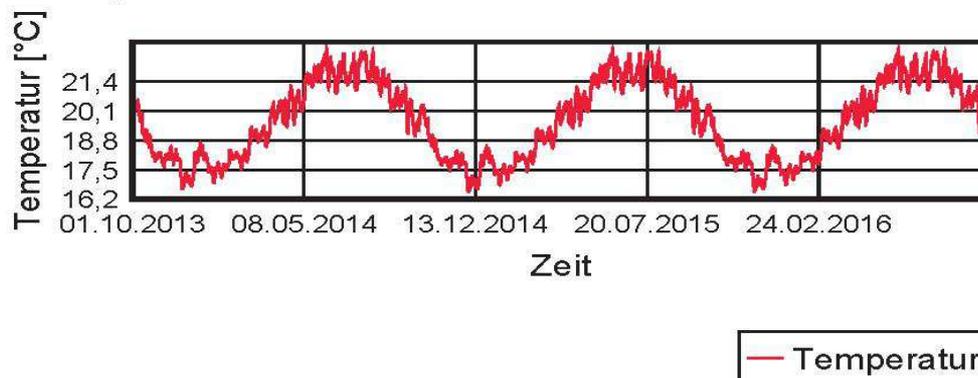


Abb. 82 Gemittelte Temperatur BSP EG Detail-E

Die Deckenplatte weist anfangs eine Feuchtigkeitszunahme auf, die mit großer Wahrscheinlichkeit, aus dem Anmachwasser des Polystyrolbetons herrührt. In weiterer Folge nimmt der Wassergehalt kontinuierlich ab, bis er sich schließlich auch im Rahmen der erlaubten Parameter einschwingt.

#### 7.1.1.2 Detail-C

Detail-C Dachanschluss beschreibt den Anschluss der Obergeschosswand an die Dachplatte in Verbindung mit der Attika und der Gefälledämmung. Das Detail ist insofern von Interesse, da die BSP-Dachplatte wiederum außenseitig mit einer bitumenkaschierten Auflämplappe einlagig abgeflämmt ist. Aus der Berechnung geht hervor, dass auch dieses Konstruktionsdetail einwandfrei funktioniert. Das Auswertungsdiagramm des Wassergehaltes der Obergeschosplatte, ähnelt dem der Obergeschosplatte aus dem Detail E. Bei der Dachplatte ist eine leichte Zunahme des Wassergehaltes durch die Abdichtung an der Oberseite zu erkennen, die aber das Einstellen der Gleichgewichtsfeuchte nicht behindert.

### Wassergehalt BSP Dach Detail C

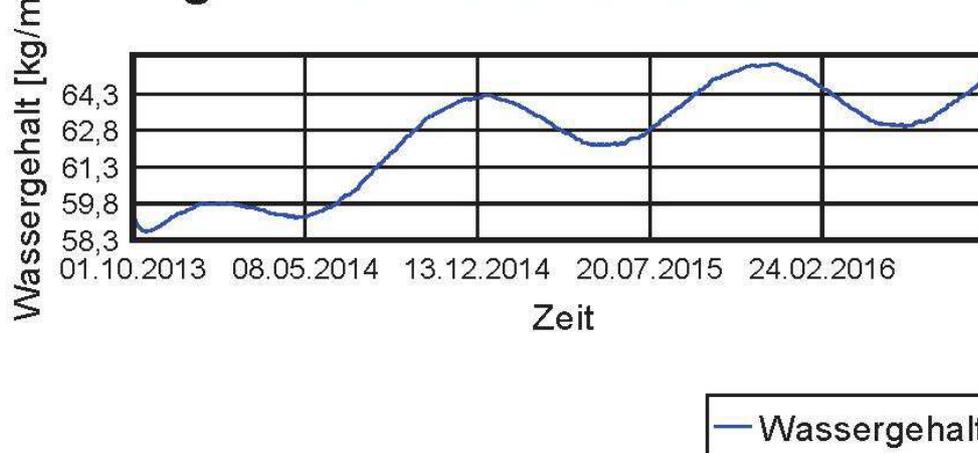


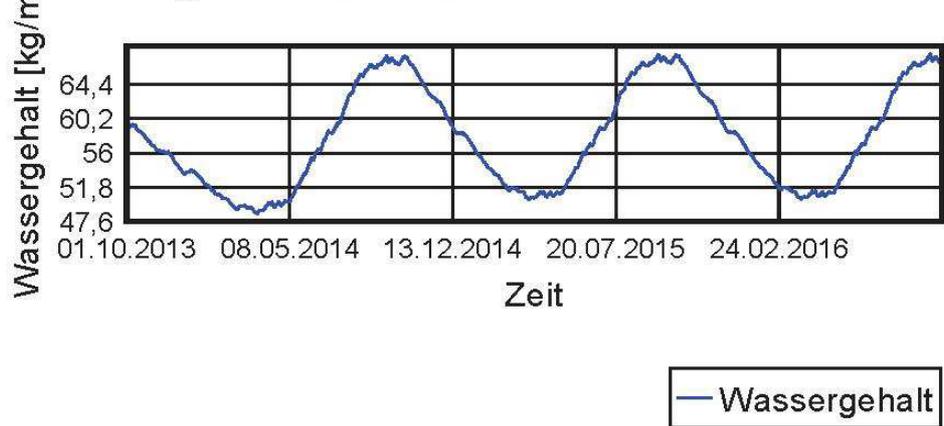
Abb. 83 Gemittelter Wassergehalt BSP Dach Detail-C

### Temperatur BSP Dach Detail C



Abb. 84 Gemittelte Temperatur BSP Dach Detail-C

### Wassergehalt BSP OG Detail C



### Temperatur BSP OG Detail C

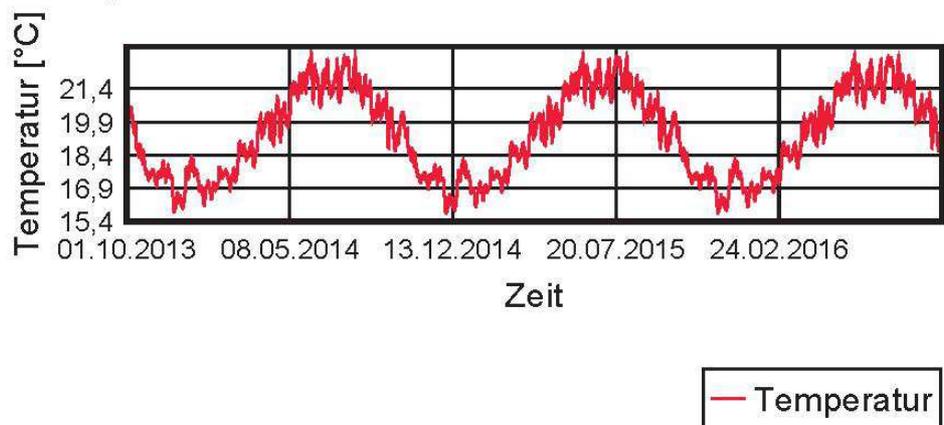


Abb. 85 Gemittelter Wassergehalt und gemittelte Temperatur BSP OG Detail-C

## 8 BEURTEILUNG

### 8.1 Erforderlichkeit von Dampfsperren bzw. Dampfbremsen

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse im Zuge dieser Arbeit kann davon ausgegangen werden, dass in unseren Breiten, respektive in Klimaregionen mit ähnlichen Verhältnissen, der Einsatz von Dampfsperren und Dampfbremsen, selbst bei dreischichtigen Brettsperrholzplatten ohne Seitenverklebung, im Allgemeinen nicht erforderlich ist. Trotzdem muss bei gewissen Detaillösungen dem Material bzw. dem Baustoff der nötige Respekt und die erforderliche Aufmerksamkeit entgegengebracht werden, um zukünftige Bauschäden schon in der Planungsphase zu verhindern.

Des Weiteren können die im Versuch verwendeten Brettsperrholzplatten mit 3 oder mehr Lagen in Bezug auf die mindesterforderliche Luftdurchlässigkeit des Gebäudes als luftdichte Schichten angenommen werden, sofern Materialfehler, Bauteilstöße sowie Bauteilanschlüsse und Durchdringungen dementsprechend ausgebessert bzw. abgedichtet werden. Diese Aufgabe fällt dem Plattenhersteller im Zuge der Fertigung und dem ausführenden Unternehmen, genauer gesagt den Monteuren auf der Baustelle, zu.

### 8.2 Vergleich stationäre- und instationäre Berechnungsergebnisse

Bezogen auf die Temperatur ist bei der Auswertung der instationären Berechnung schön der Jahreszyklus, aber auch der Unterschied zwischen Tag und Nacht zu erkennen. Bei der stationären Berechnung sind, wie aufgrund der Rahmenbedingungen unschwer zu erraten ist, die Auswertungsfunktionen der Temperaturen eher unspektakulär. Sehr schön zu erkennen ist bei der stationären Berechnung, dass sich die Temperatur im Bauteil sehr rasch einstellt, was nur bei zeitlich sehr kurzen Berechnungen eine spezielle Eingabe der Anfangstemperatur im Simulationsprogramm erfordert.

Beim Vergleich der Auswertungsdiagramme, bezogen auf den Wassergehalt im Anfangszeitraum aus der stationären und der instationären Berechnungen geht hervor, dass der Wassergehalt der Erdgeschossplatte bei den stationären Klimaverhältnissen des Versuches deutlich stärker abnimmt, als bei der instationären Berechnung, mit den Standortklimadaten von Graz aus dem Programm. Im Gegensatz dazu, unterscheidet sich der Wassergehalt der Obergeschossplatte nur leicht. Hier ist die Abnahme unter den stationären Klimaverhältnissen des Versuches nur ein wenig geringer, als bei der instationären Berechnung. Grund dafür ist wahrscheinlich die teilweise Abdichtung der Obergeschossplatte an der Außenseite mit einer bitumenkaschierten Aluflämbahn, welche die Austrocknung behindert. Bei der Deckenplatte unterscheidet sich der Wassergehalt aus den beiden Berechnungen kaum. Dies liegt mit großer Wahrscheinlichkeit an der teilweisen Aufnahme des Anmachwassers aus dem Polystyrolbeton.

### 8.3 Arbeitsverlauf

Im Verlauf dieses Versuches wurden einige Erkenntnisse, nicht nur im Bezug auf das Material Brettsper Holz, sondern auch über den Ablauf und die Planung einer solchen Arbeit, gewonnen.

Angefangen von der Ablaufplanung einer solchen Arbeit mit angeschlossenen Versuch, über die verwendeten Materialien und deren Kennwerte und Kenndaten, über die Randbedingungen, die entweder angenommen oder erfasst und möglichst genau in der Modellbildung berücksichtigt bzw. wiedergegeben werden müssen.

Nicht zu vergessen die Durchführung der Messungen in Bezug auf die Messstellen und die optimale Wahl der erforderlichen Messgeräte, um die Daten bestmöglich und mit den geringstmöglichen Abweichungen zu erfassen. Hier wären natürlich Messfühler zur Erfassung der Holzfeuchte und der Temperatur von Vorteil, da diese den Versuchsablauf weniger stören und Messdaten kontinuierlich zu Verfügung stehen und ausgelesen werden können.

Weiters ist ein fundiertes Wissen über die Grundkenntnisse unerlässlich, um sich überhaupt einmal Gedanken über verschiedene Problemstellungen machen zu können. Alles in allem ist die Bauphysik ein sehr komplexer Themenbereich der Bauingenieurwissenschaften, der keinesfalls unterschätzt werden darf. Mit dem Wissen, dass man in diesem Teilgebiet der Physik bzw. der Physik allgemein, sehr viel nur mit vereinfachten Modellen beschreiben und erfassen kann, welche sich über einige Zeit bewährt haben und die daraus gewonnenen Ergebnisse immer Näherungen sind, hat man schon sehr viel begriffen.

## 9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABB. 1	DICHTEDIFFERENZ IN ABHÄNGIGKEIT VON LUFTDRUCK UND TEMPERATUR .....	30
ABB. 2	DIFFUSION IN ABHÄNGIGKEIT VON TEMPERATUR UND PARTIALDRUCKGEFÄLLE .....	34
ABB. 3	PLANUNG SEITENANSICHT DES VERSUCHSMODELLS .....	37
ABB. 4	PLANUNG INNENANSICHT DES VERSUCHSMODELLS .....	38
ABB. 5	PLANUNG AUßENANSICHT DES VERSUCHSMODELLS .....	39
ABB. 6	MESSPUNKTANORDNUNG PLAN 1 .....	40
ABB. 7	MESSPUNKTANORDNUNG PLAN 2 .....	40
ABB. 8	MESSPUNKTANORDNUNG PLAN 3 .....	41
ABB. 9	FEHLSTELLE EG INNEN .....	42
ABB. 10	NAHAUFNAHME FEHLSTELLE EG INNEN .....	42
ABB. 11	ANREIßEN DER DECKENPLATTE .....	43
ABB. 12	MONTAGEKERVE INKLUSIVE MONTAGEWINKEL.....	43
ABB. 13	MONTAGE DES DICHTBANDES AN DER DECKENOBERSEITE .....	44
ABB. 14	EINMESSEN UND BEFESTIGEN DES MONTAGEWINKELS .....	44
ABB. 15	ZENTRIERTE OBERGESCHOSSPLATTE INKLUSIVE ABDICHTUNG.....	45
ABB. 16	BEFESTIGEN DER OBERGESCHOSSPLATTE .....	45
ABB. 17	TRANSPORTFERTIGER UNTERTEIL, ERDGESCHOSSPLATTE.....	46
ABB. 18	BITUMENKASCHIERTE ALUFLÄMMPAPPE AN DER AUßENSEITE DES OBERTEILS .....	46
ABB. 19	ANBRINGEN DER HWLBP .....	47
ABB. 20	PUTZVORBEREITUNGSARBEITEN .....	47
ABB. 21	EINBAU DER DOPPELSTECKDOSE.....	47
ABB. 22	ANBRINGEN DES INNENPUTZES .....	48
ABB. 23	EINBRINGEN DES POLYSTYROLBETONS .....	48
ABB. 24	VERLEGEN DER MINERALISCHEN TRITTSCHALLDÄMMUNG .....	49
ABB. 25	VERLEGEN DER GLEITSCHICHT .....	49
ABB. 26	BETONIEREN DES ESTRICHS.....	50
ABB. 27	ABGEZOGENER ESTRICH.....	50
ABB. 28	VERLADENES VERSUCHSMODELL .....	51
ABB. 29	ABKLEBEN DER SEITENTEILE .....	52
ABB. 30	POSITIONIEREN DES OBER- UND UNTERTEILES.....	52
ABB. 31	VERSCHRAUBEN DER BEIDEN BAUTEILE .....	52
ABB. 32	VERPRESSEN DER EINSCHRAUBLÖCHER MIT DICHTMASSE .....	53
ABB. 33	AUSRICHTEN UND KOMPLETTIEREN DES VERSUCHSMODELLS.....	53
ABB. 34	ANBRINGEN DER FASSADENDÄMMUNG .....	54
ABB. 35	EINPASSEN DES VERSUCHSMODELLS.....	55
ABB. 36	ANBRINGEN DER HWLBP AN DER INNENSEITE .....	55
ABB. 37	AUFBRINGEN DES INNENPUTZES .....	56
ABB. 38	ABDICHTEN DER ANSCHLUSSFUGEN .....	56
ABB. 39	FERTIGGESTELLTE AUßENSEITE .....	57
ABB. 40	FERTIGGESTELLTE INNENSEITE.....	57
ABB. 41	ÖFFNUNG MESSPUNKT 22.....	58
ABB. 42	VERSCHLOSSENE ÖFFNUNG MESSPUNKT 25 .....	59
ABB. 43	KERNBOHRMASCHINE.....	59
ABB. 44	BOHRLOCH MESSSTELLE 2.....	60

ABB. 45	BOHRLOCH MESSSTELLE 13.....	60
ABB. 46	EINGESETZTER BOHRKERN MESSSTELLE 4.....	61
ABB. 47	ABGEDICHTETE BOHRKERNE DER MESSSTELLEN 2,3,6 UND 7.....	61
ABB. 48	HOLZFEUCHTEMESSGERÄT HYDROMETTE HT 85 T DER FA. GANN MIT RAMMELEKTRODE ....	63
ABB. 49	TEMPERATURMESSGERÄT GTH 1170 DER FA. GREISINGER ELEKTRONIK.....	64
ABB. 50	EINGABE DES VERSUCHSMODELLS IN THERM 5.2.....	69
ABB. 51	AUSWERTUNG BSP OG AKLIMATISATION.....	70
ABB. 52	AUSWERTUNG BSP DECKE AKLIMATISATION.....	71
ABB. 53	AUSWERTUNG BSP EG AKLIMATISATION.....	71
ABB. 54	GROB GESCHÄTZTE DAUER DES KLIMAKAMMERAUSFALLES.....	74
ABB. 55	GEMITTELTER WASSERGEHALT BSP OG KLIMAKAMMER.....	75
ABB. 56	GEMITTELTER WASSERGEHALT BSP EG KLIMAKAMMER.....	75
ABB. 57	VERGLEICH GEMITTELTER WASSERGEHALT BSP WÄNDE KLIMAKAMMER AUS MESSUNG.....	76
ABB. 58	VERGLEICH GEMITTELTER WASSERGEHALT BSP WÄNDE KLIMAKAMMER AUS BERECHNUNG.....	77
ABB. 59	GEMITTELTE TEMPERATUR BSP OG KLIMAKAMMER.....	78
ABB. 60	GEMITTELTE TEMPERATUR BSP EG KLIMAKAMMER.....	79
ABB. 61	GEMITTELTER WASSERGEHALT BSP DECKE KLIMAKAMMER.....	80
ABB. 62	GEMITTELTE TEMPERATUR BSP DECKE KLIMAKAMMER.....	81
ABB. 63	GEMITTELTER WASSERGEHALT MESSPUNKT 13 KLIMAKAMMER.....	82
ABB. 64	GEMITTELTE OBERFLÄCHENTEMPERATUR MESSPUNKT 13 KLIMAKAMMER.....	83
ABB. 65	GEMITTELTER WASSERGEHALT MESSPUNKT 20 KLIMAKAMMER.....	84
ABB. 66	GEMITTELTE OBERFLÄCHENTEMPERATUR MESSPUNKT 20 KLIMAKAMMER.....	85
ABB. 67	GEMITTELTER WASSERGEHALT MESSPUNKT 3 KLIMAKAMMER.....	86
ABB. 68	GEMITTELTE OBERFLÄCHENTEMPERATUR MESSPUNKT 3 KLIMAKAMMER.....	87
ABB. 69	GEMITTELTER WASSERGEHALT MESSPUNKT 24 KLIMAKAMMER.....	88
ABB. 70	GEMITTELTE OBERFLÄCHENTEMPERATUR MESSPUNKT 24 KLIMAKAMMER.....	89
ABB. 71	ISOTHERMEN IM DECKENBEREICH DES VERSUCHSMODELLS.....	90
ABB. 72	TEMPERATURVERLAUF IM DECKENBEREICH DES VERSUCHSMODELLS.....	91
ABB. 73	WÄRMEFLUSS IM DECKENBEREICH DES VERSUCHSMODELLS.....	91
ABB. 74	GEMITTELTER WASSERGEHALT BSP OG DETAIL-F.....	92
ABB. 75	GEMITTELTE TEMPERATUR BSP OG DETAIL-F.....	93
ABB. 76	GEMITTELTER WASSERGEHALT BSP DECKE DETAIL-F.....	93
ABB. 77	GEMITTELTE TEMPERATUR BSP DECKE DETAIL-F.....	94
ABB. 78	GEMITTELTER WASSERGEHALT UND GEMITTELTE TEMPERATUR BSP EG DETAIL-F.....	94
ABB. 79	GEMITTELTER WASSERGEHALT UND GEMITTELTE TEMPERATUR BSP OG DETAIL-E.....	95
ABB. 80	GEMITTELTER WASSERGEHALT UND GEMITTELTE TEMPERATUR BSP DECKE DETAIL-E.....	96
ABB. 81	GEMITTELTER WASSERGEHALT BSP EG DETAIL-E.....	96
ABB. 82	GEMITTELTE TEMPERATUR BSP EG DETAIL-E.....	97
ABB. 83	GEMITTELTER WASSERGEHALT BSP DACH DETAIL-C.....	97
ABB. 84	GEMITTELTE TEMPERATUR BSP DACH DETAIL-C.....	98
ABB. 85	GEMITTELTER WASSERGEHALT UND GEMITTELTE TEMPERATUR BSP OG DETAIL-C.....	98

## 10 TABELLENVERZEICHNIS

TAB. 1	WÄRMEÜBERGANGSWIDERSTÄNDE NACH ÖNORM EN ISO 6946/A1 .....	22
TAB. 2	PHYSIKALISCHE KENNGRÖßEN VON WASSER IN SEINEN AGGREGATZUSTÄNDEN.....	28
TAB. 3	LUFTDICHTHE IN ABHÄNGIGKEIT VON TEMPERATUR UND DRUCK.....	29
TAB. 4	EINSTELLUNGEN AUS DEM KOMMANDOFENSTER „GRID“ DIE BSP-PLATTEN BETREFFEND .....	66
TAB. 5	RANDBEDINGUNGEN DES VERSUCHES .....	73
TAB. 6	RANDBEDINGUNGEN AM 07.01.2013 .....	74



## 11 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Technische Universität Graz; *BSPHandbuch Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz*; Univ.-Prof. DI Dr. techn. Gerhard Schickhofer, DI Dr. techn. Thomas Bogensperger; DDI Thomas Moosbrugger; 2. Auflage 2010
- [2] Institut für Hochbau mit angeschlossenen Labor für Bauphysik; *Vorlesungsunterlage Bauphysik 1 TU-Graz*; Univ.-Prof. DDr. Peter Kautsch; 10/2011
- [3] ÖNORM EN 385; *Keilzinkenverbindungen im Bauholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung*; 01.05.2002
- [4] [www.klh.at](http://www.klh.at) ; 17.07.2012
- [5] ÖNORM EN 386; *Brettschichtholz – Leistungs- und Mindestanforderungen an die Herstellung*; 01.06.1995
- [6] ÖNORM EN 301; *Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Phenoplaste und Aminoplaste – Klassifizierungs- und Leistungsanforderungen*; 01.11.1992
- [7] ÖNORM EN 15425; *Klebstoffe – Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis für tragende Holzbauteile - Klassifizierungs- und Leistungsanforderungen*; 01.05.2008
- [8] ÖNORM EN 12524; *Baustoffe- und -produkte – Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte*; 01.09.2000
- [9] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) ; 17.07.2012
- [10] OIB – Richtlinie 6; *Energieeinsparung und Wärmeschutz*; 01.10.2011
- [11] ÖNORM EN 13829; *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972: 1996, modifiziert)*; 01.05.2001
- [12] ÖNORM EN ISO 6946/A1; *Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren*; 01.02.2000
- [13] ÖNORM B 8110-3; *Wärmeschutz im Hochbau – Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse*; 01.12.1999
- [14] ÖNORM B 8110-2; *Wärmeschutz im Hochbau – Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz*; 01.07.2003
- [15] ÖNORM EN ISO 13788; *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren (ISO 13788: 2001)*; 01.01.2002
- [16] Hochschulverlag AG, ETH Zürich, *Bauphysik, Bau und Energie, Leitfaden für Planung und Praxis*, Univ.-Prof. DI Dr. Christoph Zürcher, DI Thomas Frank, 2. Auflage 2004
- [17] ÖNORM EN 1991-1-4; *Allgemeine Einwirkungen – Windlasten*; 15.06.2012

- [18] Technische Universität Graz Institut für Baumechanik; *Hydromechanik*; Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn. Peter Dietmaier; 3. Auflage 2008
- [19] Fachbeitrag Lüftungstechnik 52072 Aachen; *Natürliche Lüftung großer Gebäude, Die Auslegung unter Berücksichtigung von Wettereinflüssen*; Dr.-Ing. Eckehard Fiedler; 07.08.2010
- [20] <http://www.gann.de> ; 19.02.2013
- [21] <http://www.greisinger.de/> ; 19.02.2013
- [22] <http://www.holzbauphysik.de> ; 01.03.2013
- [23] Technische Universität Graz; *Holzbau Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz*; Univ.-Prof. DI Dr. techn. Gerhard Schickhofer; S-4-01B / 2009
- [24] <http://www.tab.de> ; 20.07.2012
- [25] [http://www.htw-dresden.de/fileadmin/userfiles/biw\\_arch/bauing/baumech/Slavik/a21\\_7\\_43.pdf](http://www.htw-dresden.de/fileadmin/userfiles/biw_arch/bauing/baumech/Slavik/a21_7_43.pdf) ; 17.07.2012

## 12 ANHANG

### 12.1 Datenblätter

#### 12.1.1 U-Wert Berechnung Außenwand, Aufbau 6



INSTITUT FÜR HOCH- UND INDUSTRIEBAU ADRESSE: LESSIGSTR. 25 A-8010 GRAZ VORSTAND: PROFESSOR HORST GAMERITH

### WÄRMESCHUTZ IM HOCHBAU

Skizze/Temperaturverteilung:

Bearbeiter:	Haimo Stramitzer 0711025
Datum:	11.08.2012
Projekt:	Masterprojekt
Bauteil:	Detail A, Außenwand Aufbau 6
Anmerk.:	Außen stark belüftete Luftschicht => $R_{se}=R_{si}$

Bauteil: Aussenwände allgemein		Dicke	Dichte	Wärmeleitfähigkeit	Flächenbez. Masse	Wärmedurchlaßwiderstand	Temperaturdifferenz	Temperatur in der Schichtgrenze
Baustoff		d [cm]	$\rho$ [kg/m³]	$\lambda$ [W/mK]	$d \cdot \rho$ [kg/m²]	$d/\lambda$ [m²K/W]	$\Delta t$ [°C]	t [°C]
Wärmeübergang außen						0,13		-10,0
1	Fixrock 035 VS	20,00	50	0,035	10,0	5,714	0,536	-9,5
2	KLH DQ 94	9,40	500	0,13	47,0	0,723	23,582	14,1
3	Heraklith BM	5,00	370	0,09	18,5	0,556	2,984	17,1
4	Kalk/Zementputz	1,50	1450	0,9	21,8	0,017	2,293	19,4
5							0,069	19,5
6								19,5
7								19,5
8								19,5
9								19,5
10								19,5
Wärmeübergang innen						0,13	0,536	20,0
		35,90				97,25		
				$R_t = \sum d/\lambda =$		7,0096		Km²/W
				$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} =$		7,270		Km²/W
				$U_{vorh} = 1/R_T =$		0,14		W/m²K
Erforderlicher Wärmeschutz nach OIB Richtlinie 6				$U_{erf} =$		0,35		W/m²K

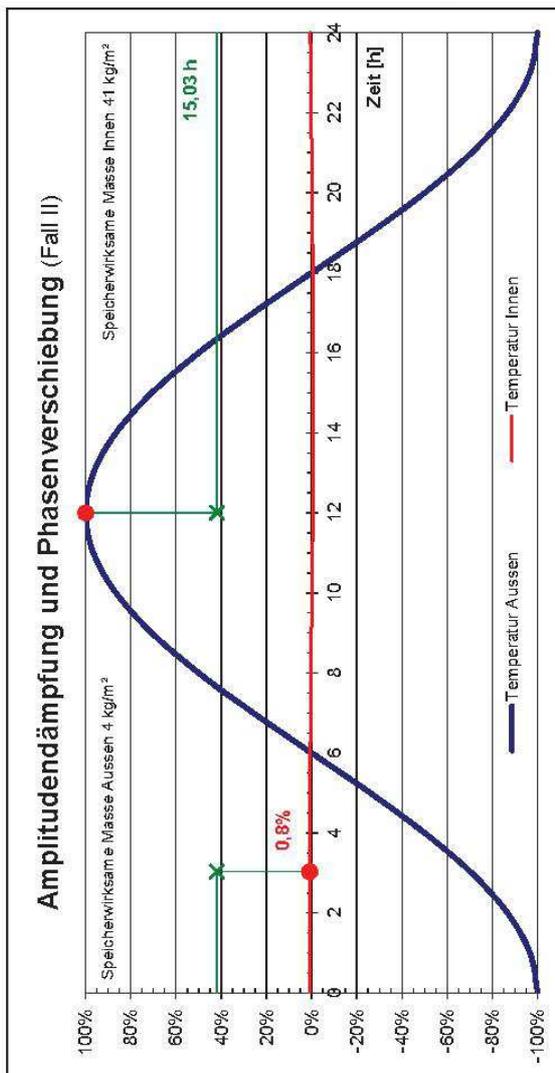
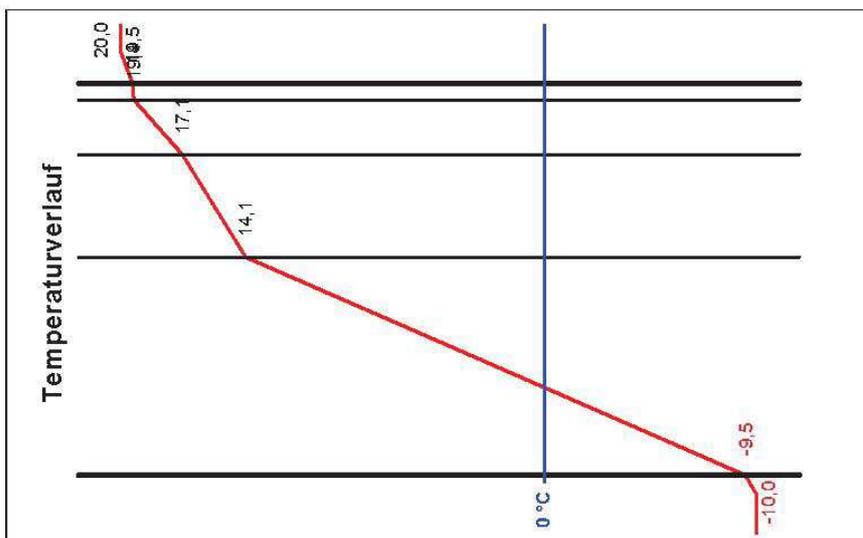
Wärmeschutz im Hochbau - vom 1. Okt. 1999; aufbereitet von DI. Hannes Ebner

12.1.2 Temperatur-Amplitudendämpfung Außenwand, Aufbau 6

**Amplitudendämpfung - Phasenverschiebung - Speicherwirksame Masse**

Baustoff	d [cm]	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [kJ/kgK]	d/ $\lambda$ [m <sup>2</sup> K/W]
Wärmeübergang $\alpha$					
1	20,00	50,00	7,69	-10	0,130
2	9,40	500,00	0,035	0,840	5,714
3	5,00	370,00	0,130	1,600	0,723
4	1,50	1450,00	0,090	2,000	0,556
5			0,900	0,840	0,017
6					
7					
8					
9					
Wärmeübergang $\alpha_i$					
$\Sigma d$ [cm]					35,9
$\Sigma d/\lambda + \Sigma 1/\alpha = 1/U$ [m <sup>2</sup> K/W]					7,270
$R_t = \Sigma d/\lambda$ [m <sup>2</sup> K/W]					7,010
$U$ [W/m <sup>2</sup> K]					0,138

	Amplitudendämpfung	Phasenverschiebung
Fall I	379,89	12,22 h
Fall II	123,09	15,03 h
Innen	Normspeichervermögen	Speicherwirksame Masse
	3,15 W/m <sup>2</sup> K	41,4 kg/m <sup>2</sup>
Aussen	0,30 W/m <sup>2</sup> K	3,9 kg/m <sup>2</sup>



12.1.3 Glaserdiagramm Außenwand, Aufbau 6

Wärmeschutz						
Baustoff	d [cm]	λ [W/mK]	μ-H	d/λ [m²K/W]	s <sub>d</sub> [m²d/ja]	
Wärmeübergang α <sub>i</sub>				20	0,050	
1	Zierack 053 VS	20,00	0,035	1	5,714	0,200
2	KUH 00 94	9,40	0,130	25	0,723	2,390
3	HEBANKUTH-SM 90	5,00	0,090	5	0,556	0,290
4	Kaltdämm-Einlinsenputz	1,50	0,900	15	0,017	0,225
5						
6						
7						
8						
9						
Wärmeübergang α <sub>e</sub>				6	0,167	
Σd [cm]		35,9	Σd/λ + Σ(μ/λ) · V/U [m²K/W]		7,226	3,025
R <sub>i</sub> = Σd/λ [m²K/W]		7,010	U [W/m²K]		0,138	

Kondensation in Folge Dampfdiffusion				
			Innen	Außen
Temperatur	t	°C	20	-10
relative Luftfeuchtigkeit	φ	%	55	90
tatsächlicher Dampfdruck	P <sub>a</sub>	Pa	1296	209
Sättigungsdampfdruck	P	Pa	2338	260
Σ Diffusionswiderstände	Σs <sub>d</sub> /s <sub>a</sub>	m	-	-

Tangenten im Diffusionsdiagramm anlegen

Keine Bauteilkondensation  
Keine Bauteilkondensation

Berechnung der Kondensationsmenge

Formel:  
 $G_K = 1000 \cdot \text{Diagrammwert} / \Sigma s_d$  [g/m²a]

Diagrammwert: 0,3

Kondensationsmenge:  
 $G_K = 1000 \cdot 0,3 / 3,025 = 0$  [g/m²a]

Austrückung in Folge Dampfdiffusion

Temperatur	t	°C	15
relative Luftfeuchtigkeit	φ	%	70
Sättigungsdampfdruck	P <sub>s</sub> = P <sub>K</sub>	Pa	1706
tatsächlicher Dampfdruck	P	Pa	1194

Formel:  
 $g_1 = \frac{P_i - P_K}{1500 \cdot \Sigma s_{d1}}$      $g_2 = \frac{P_K - P_a}{1500 \cdot \Sigma s_{d2}}$   
 $g = g_1 - g_2$      $G_A = g \cdot T_A = g \cdot 2880$

Berechnung der Austrückungsmenge

g <sub>1</sub> =	[g/m²]
g <sub>2</sub> =	[g/m²]
g =	[g/m²]
G <sub>A</sub> =	[g/m²a]

BEWERTUNG nach ÖN B8110/2, Abs. 4.4		Bedingung erfüllt
Bilanzbedingung	$G_A = 0$ [g/m²a] > $G_K = 0$ [g/m²a]	<input type="checkbox"/>
Grenzbedingung	Zwischen nicht und wenig wasser aufnehmenfähigen Schichten G <sub>K</sub> < 500 g/m²a	<input type="checkbox"/>
	Erhöhung des Wärmedurchlasswiderstandes < 10 %	<input type="checkbox"/>
	Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes bei Holz und Holzwerkstoffen < 3 %	<input type="checkbox"/>
<b>Bauteil geeignet</b>		<input checked="" type="checkbox"/>

INSTITUT FÜR HOCH- UND NIEDRIGDRUCK  
ADRESSE: LEIBNIZSTR. 25 A-8002 GRAZ  
FON: +43 (0) 316240211 FAX: +43 (0) 316240210

TU-GRAZ

Datum: 11. August 2012

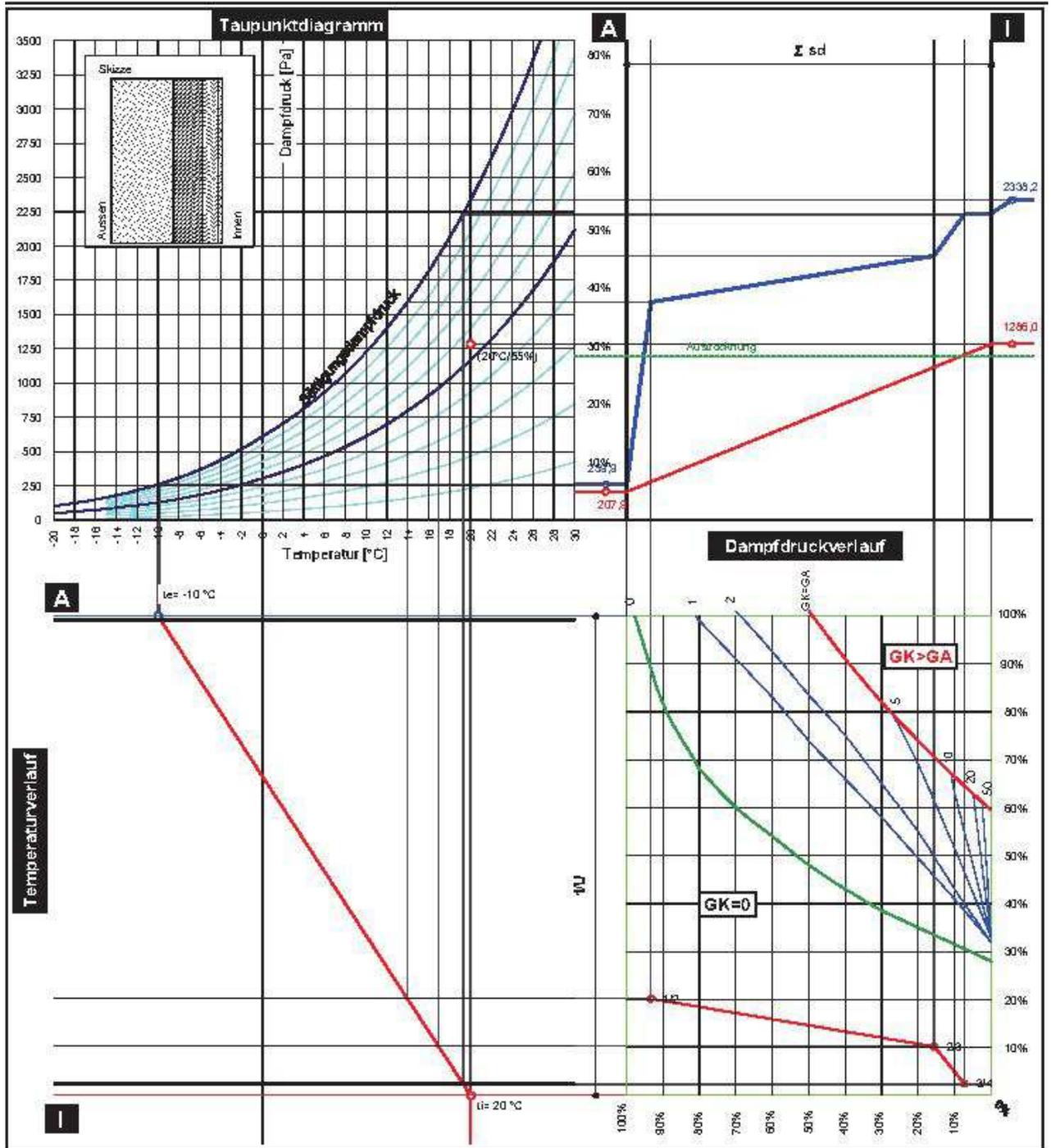
Bearb.: Stramitzer

Wärmeschutz im Hochbau

Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz

Masterarbeit: Außenwand, Aufbau 6

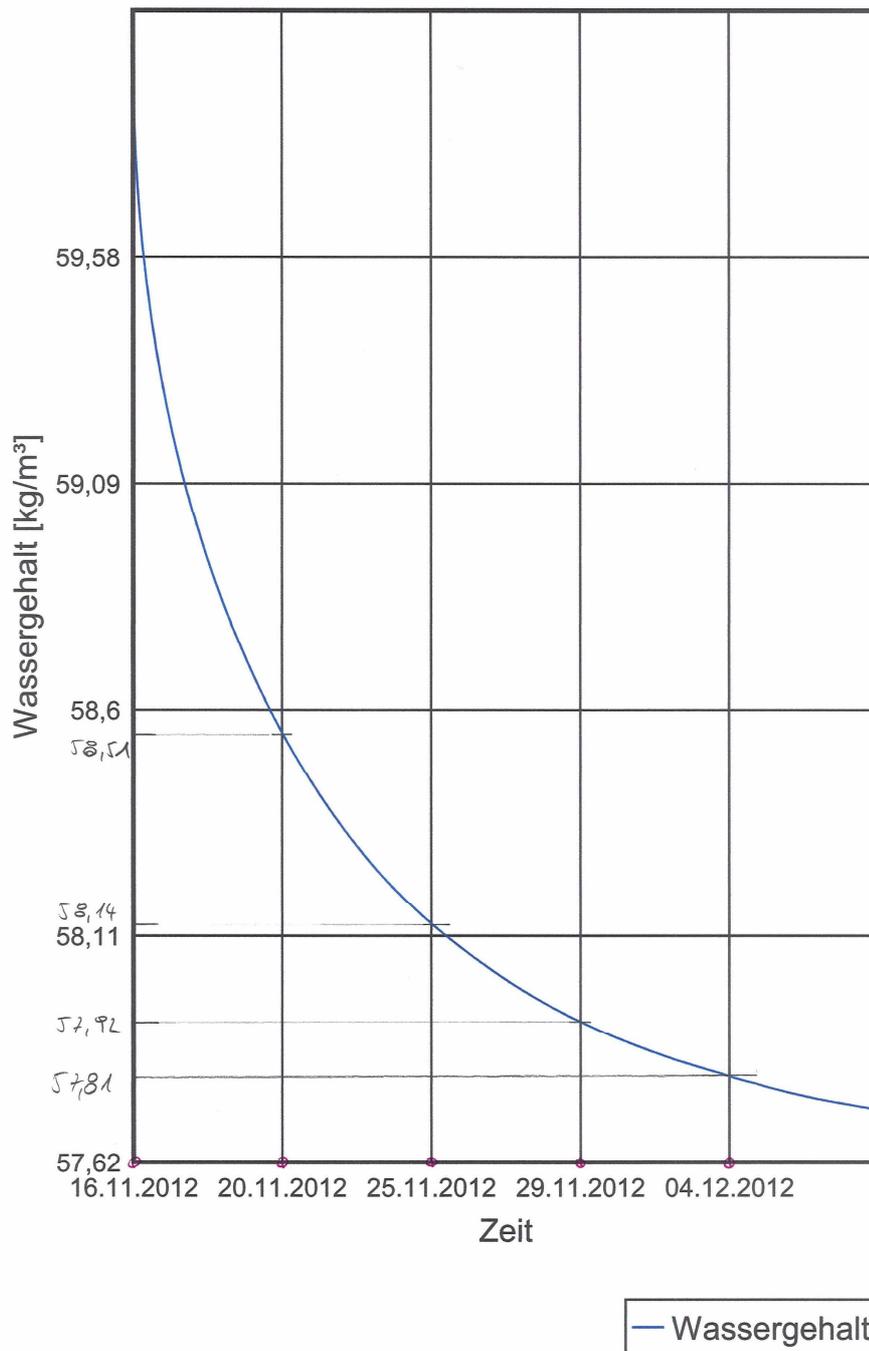
nach ÖN B8110/2  
Ausgabe 1295



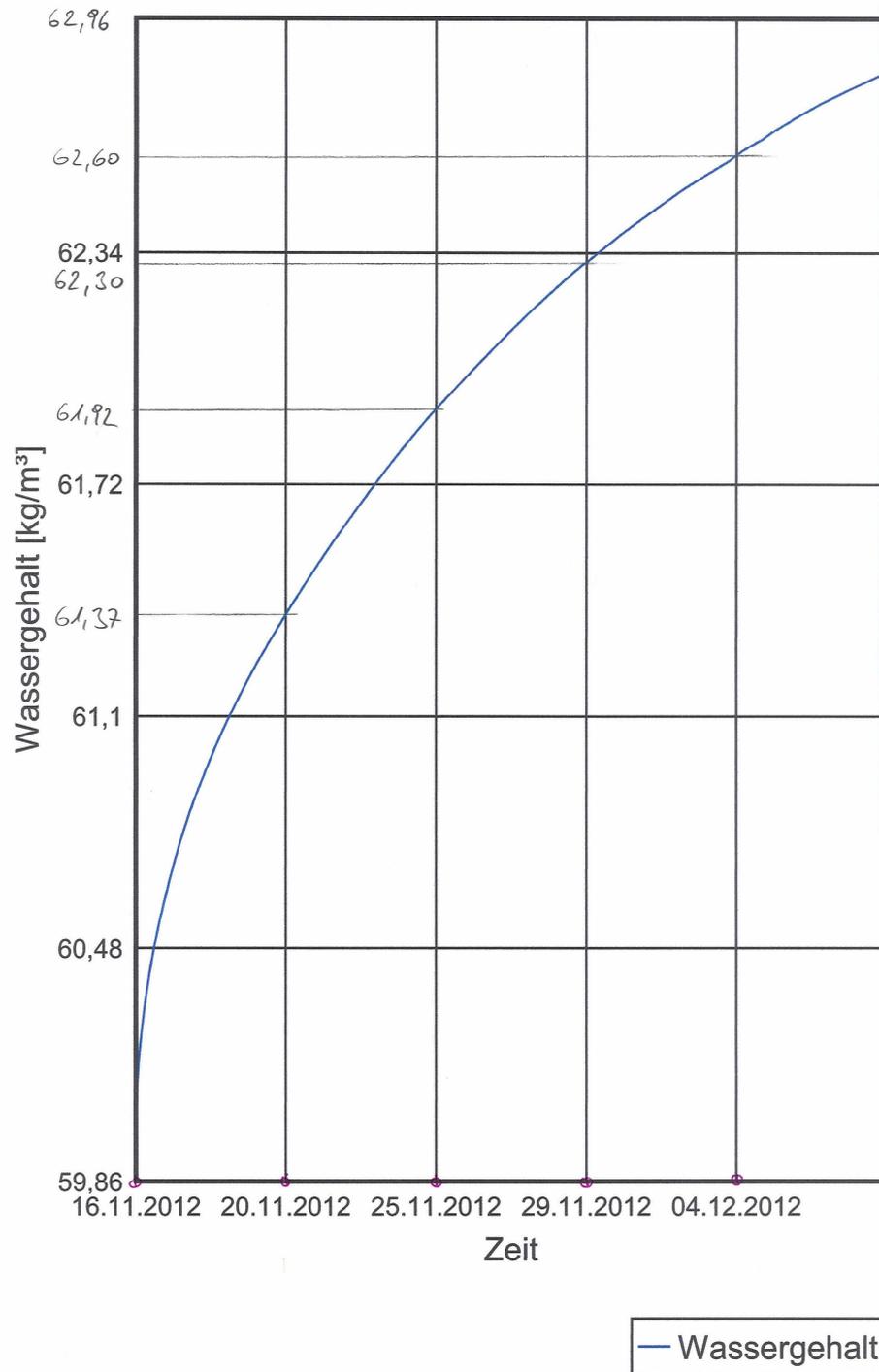
### 12.1.4 Auswertungsdiagramme WUFI2-3

#### 12.1.4.1 Aklimatisation

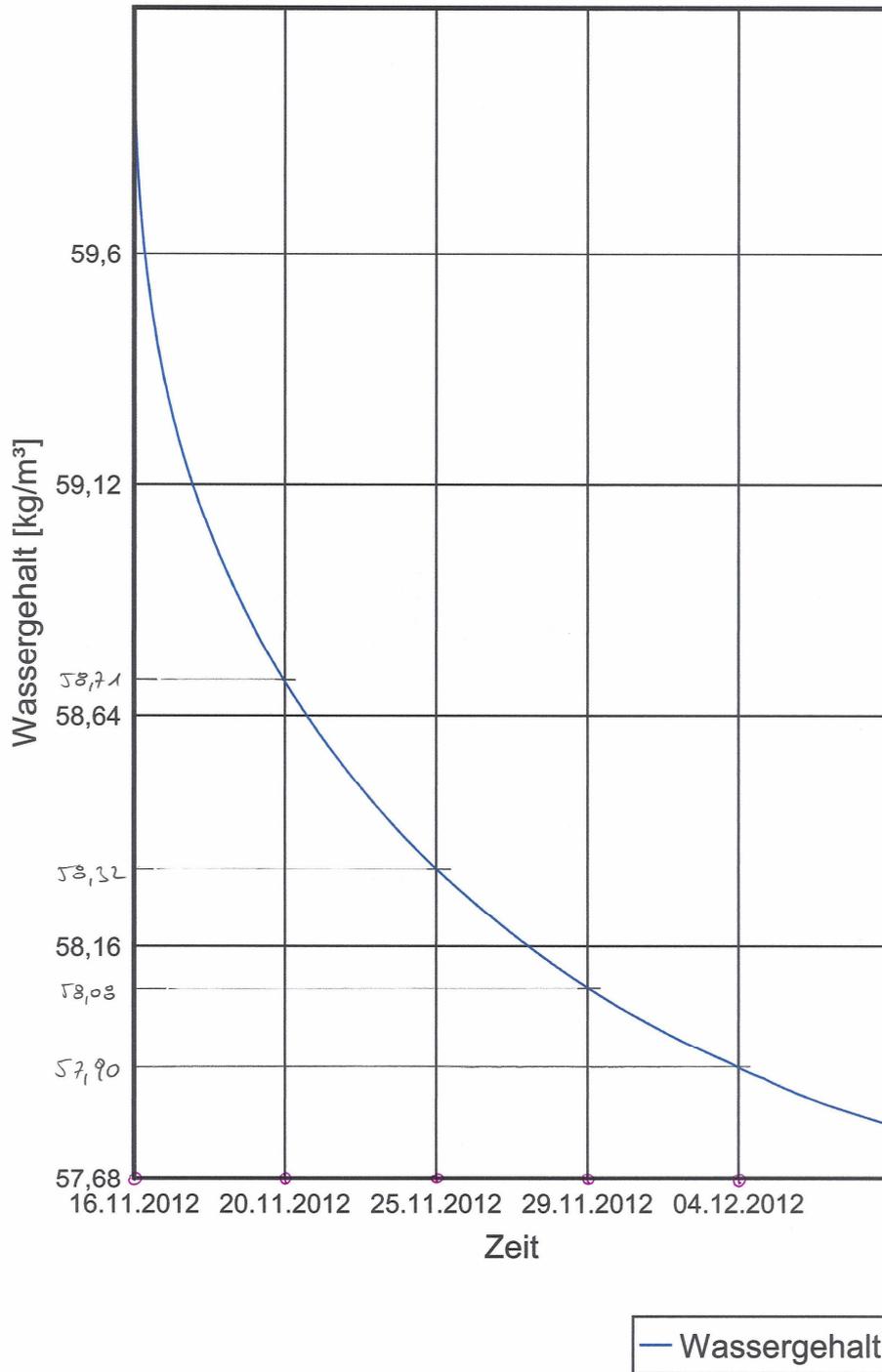
## Wassergehalt BSP OG



### Wassergehalt BSP Decke

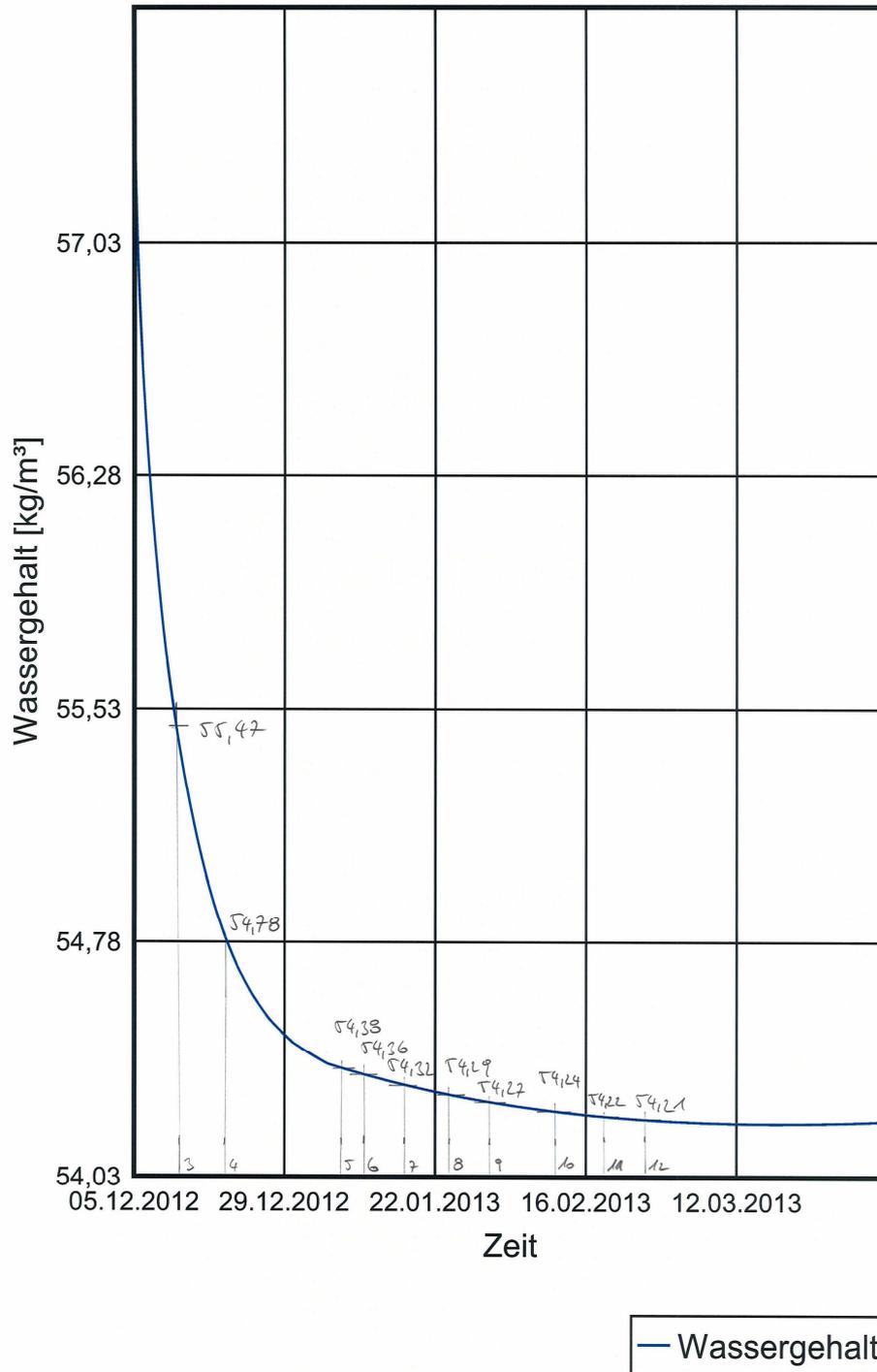


## Wassergehalt BSP EG

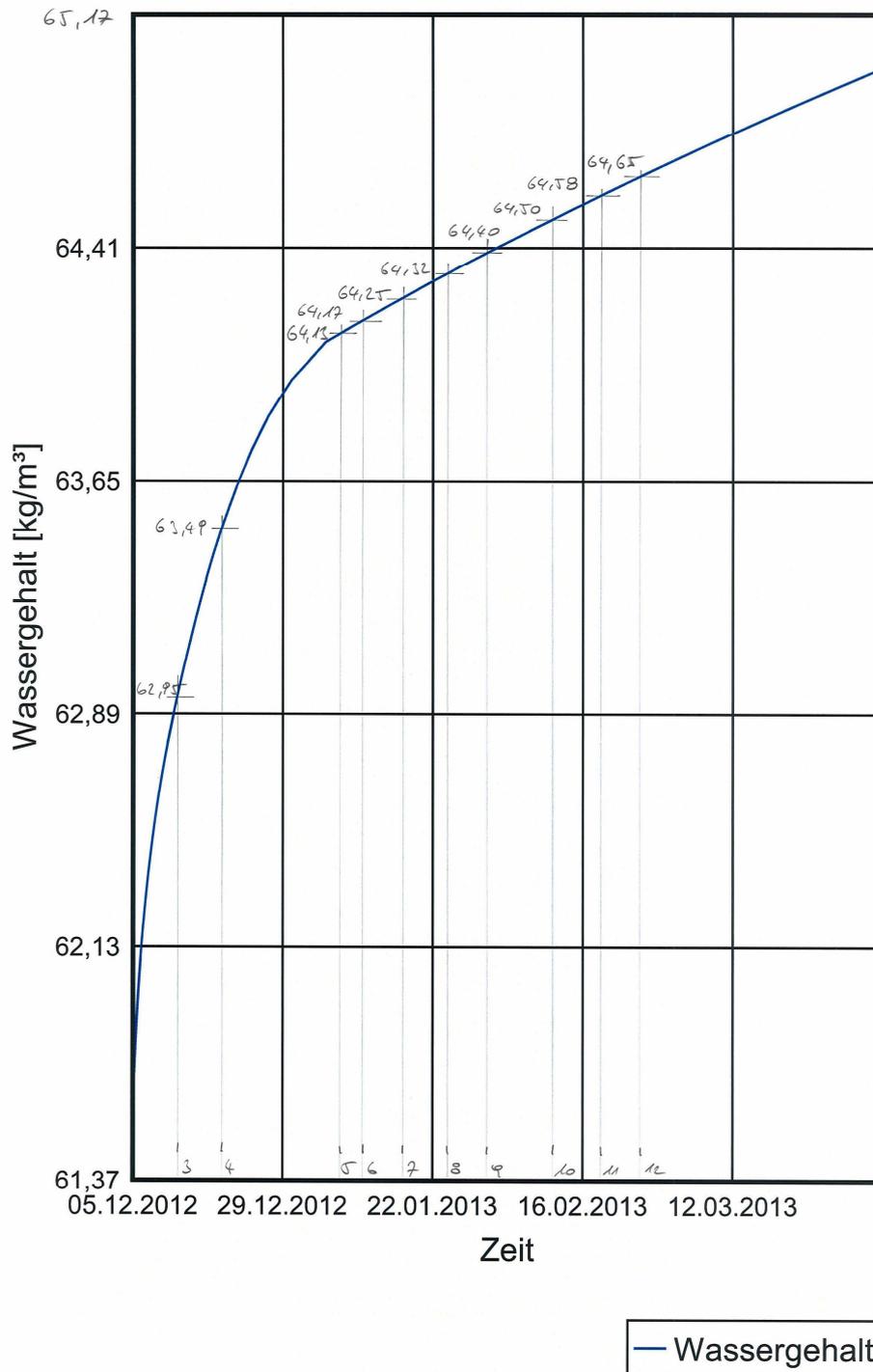


12.1.4.2 Differenzdruckklimakammer

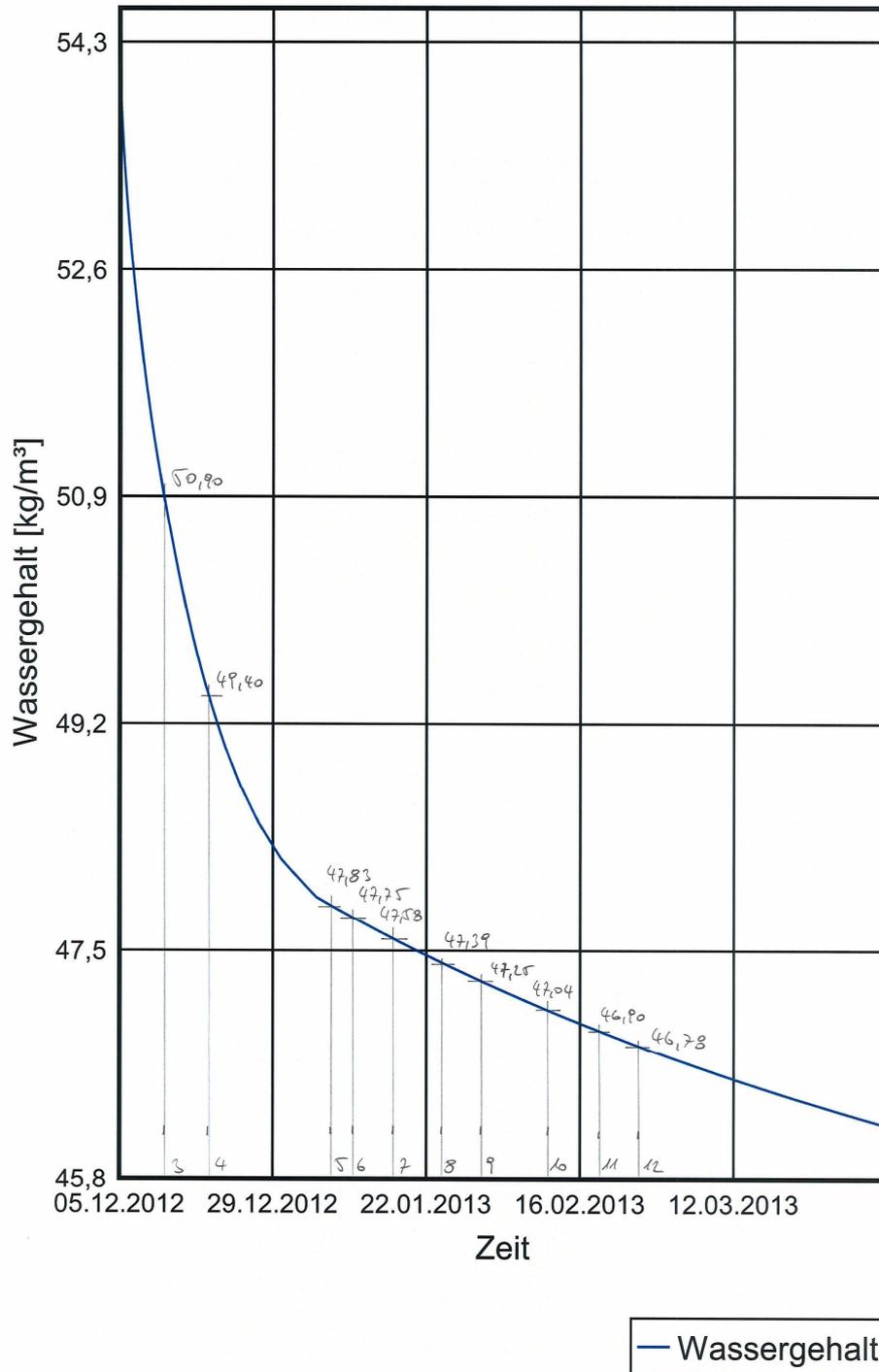
### Wassergehalt BSP OG Klimakammer



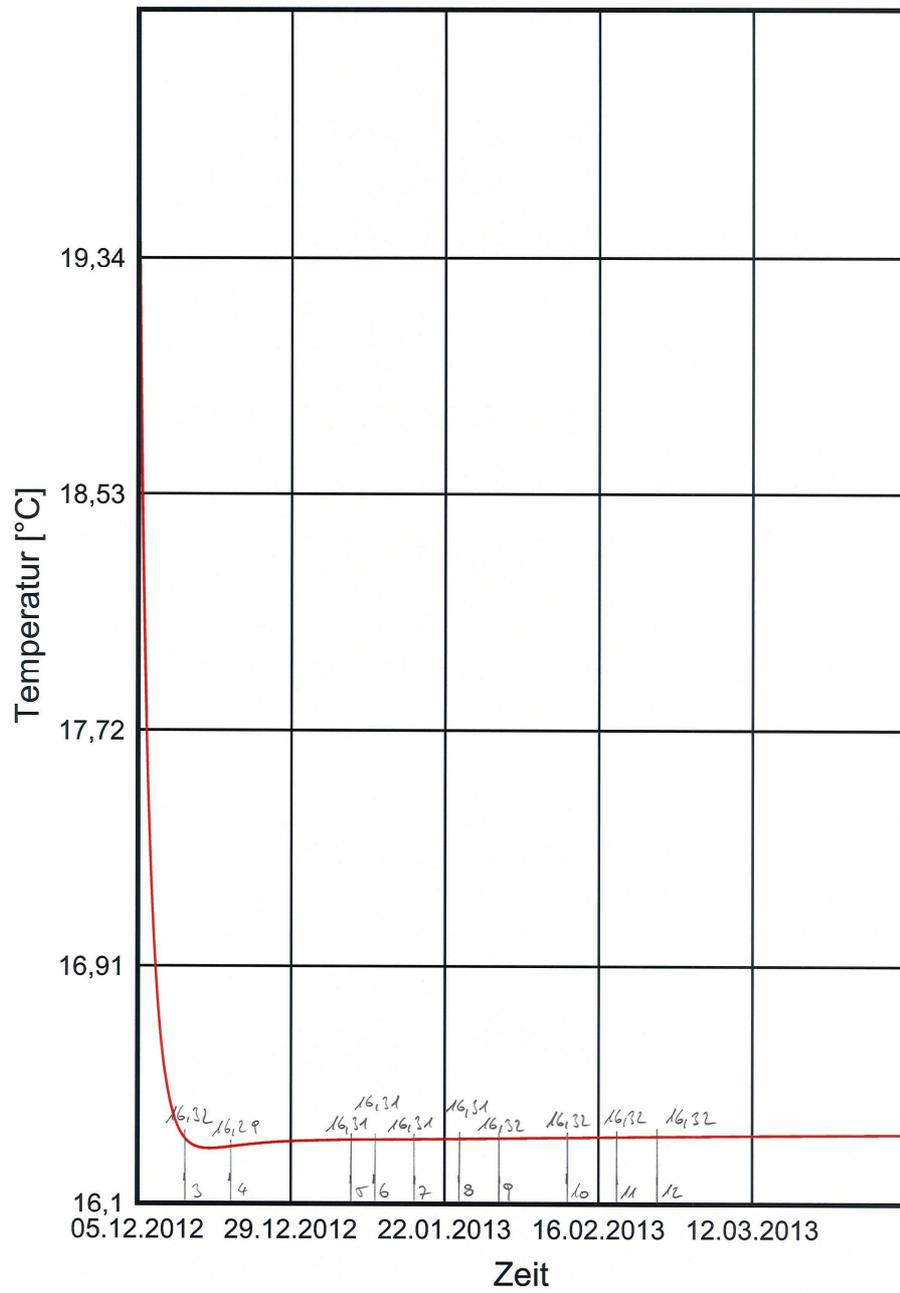
## Wassergehalt BSP Decke Klimakammer



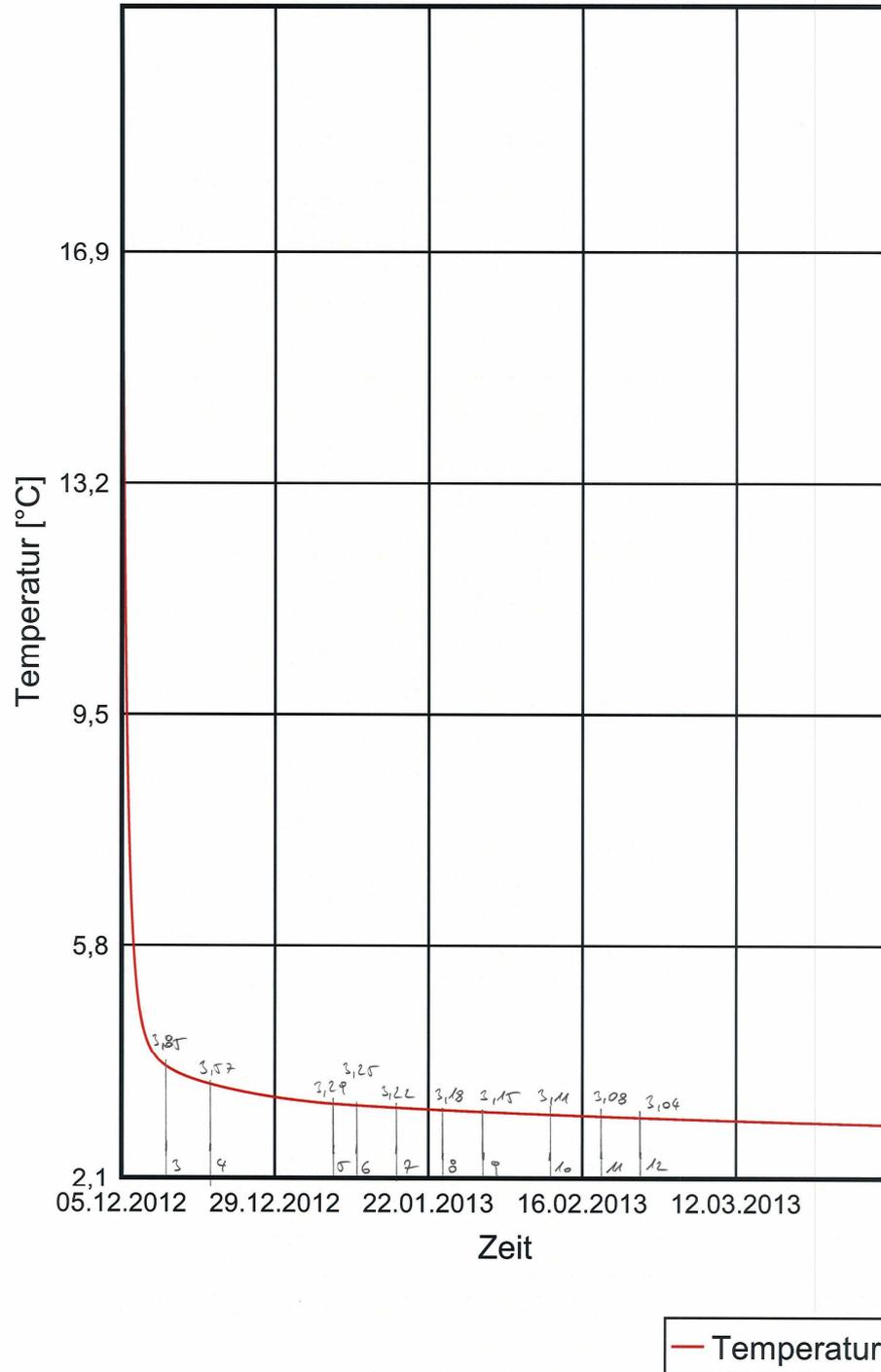
## Wassergehalt BSP EG Klimakammer



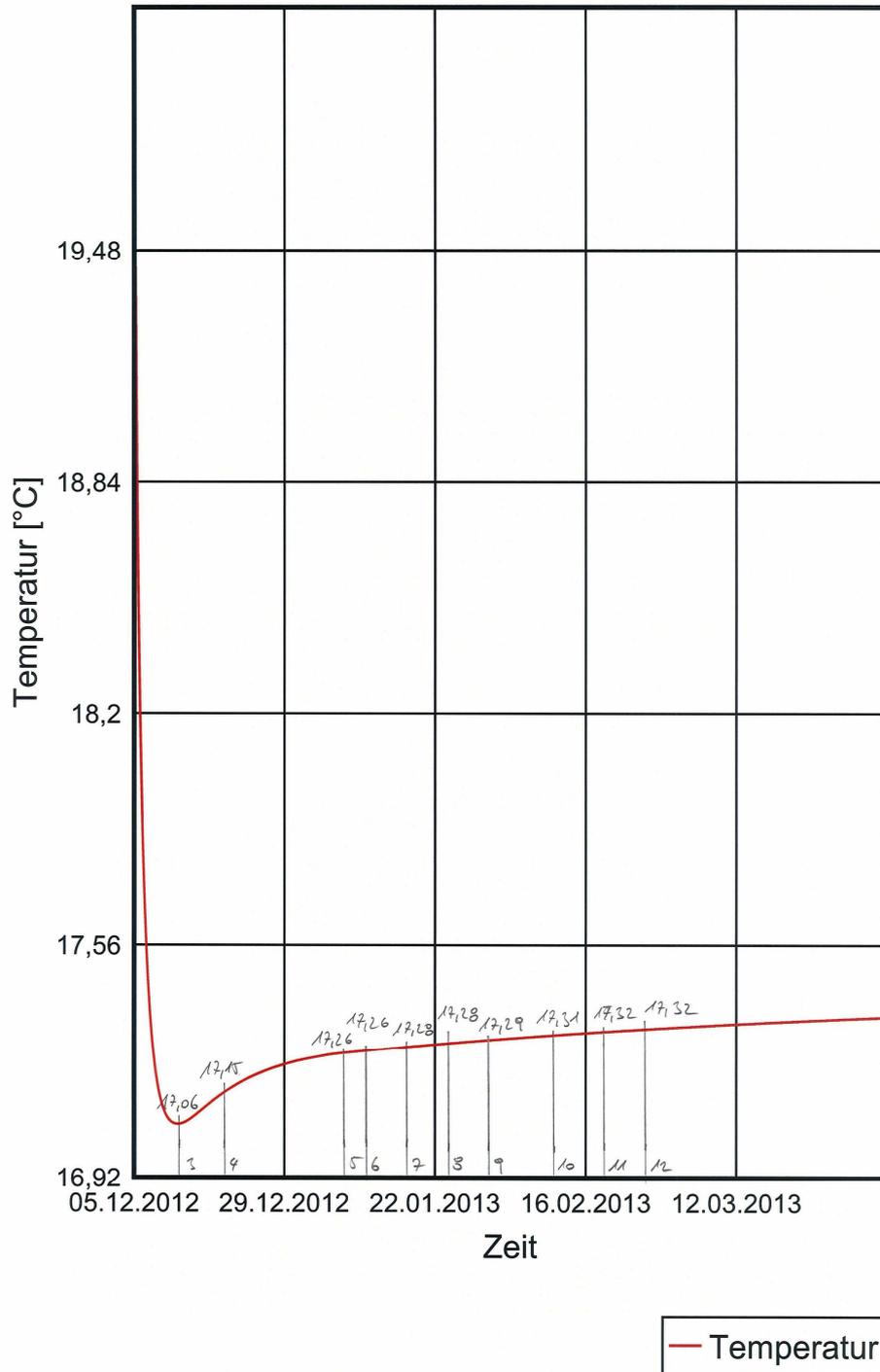
## Temperatur BSP OG Klimakammer



## Temperatur BSP Decke Klimakammer

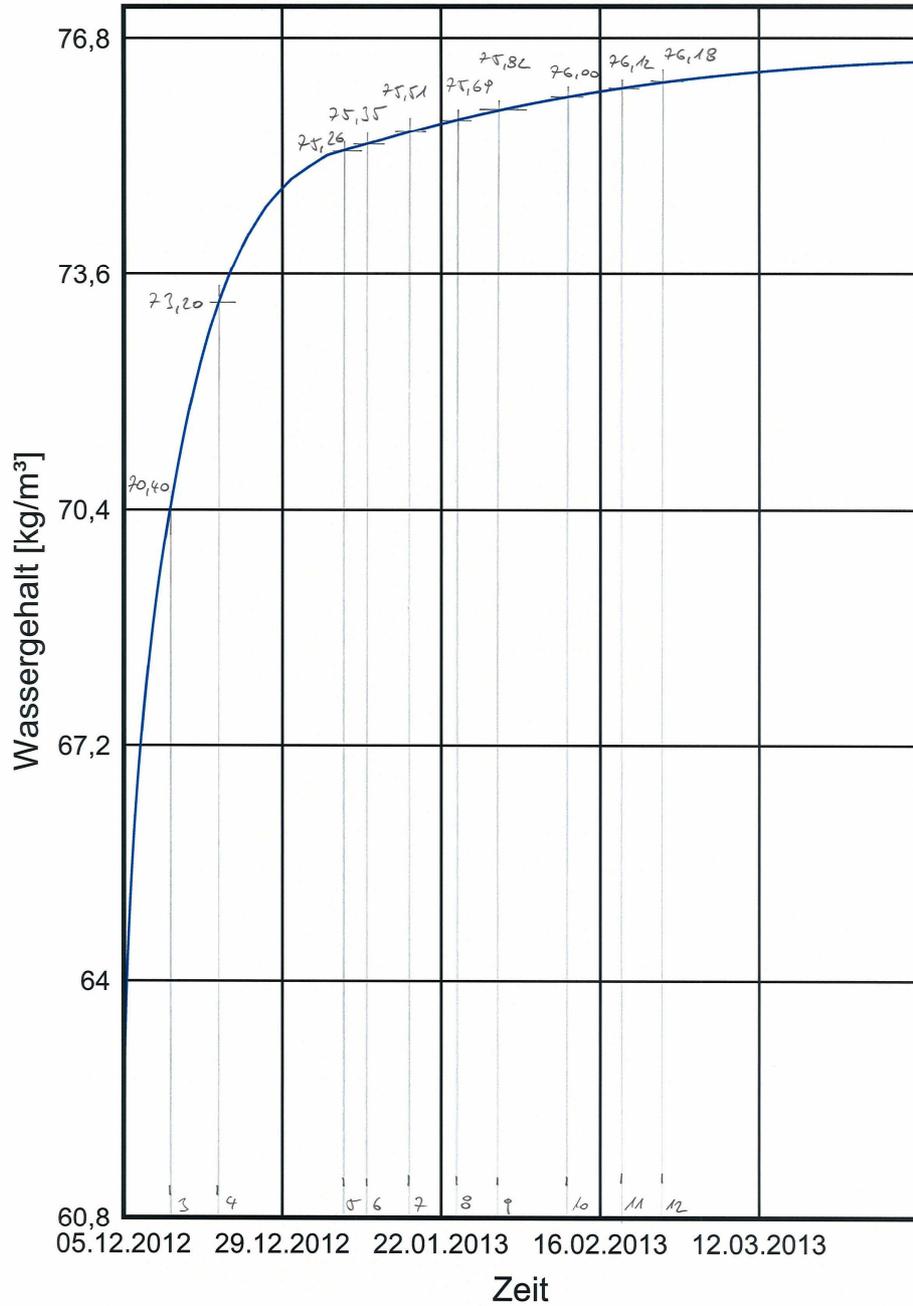


## Temperatur BSP EG Klimakammer



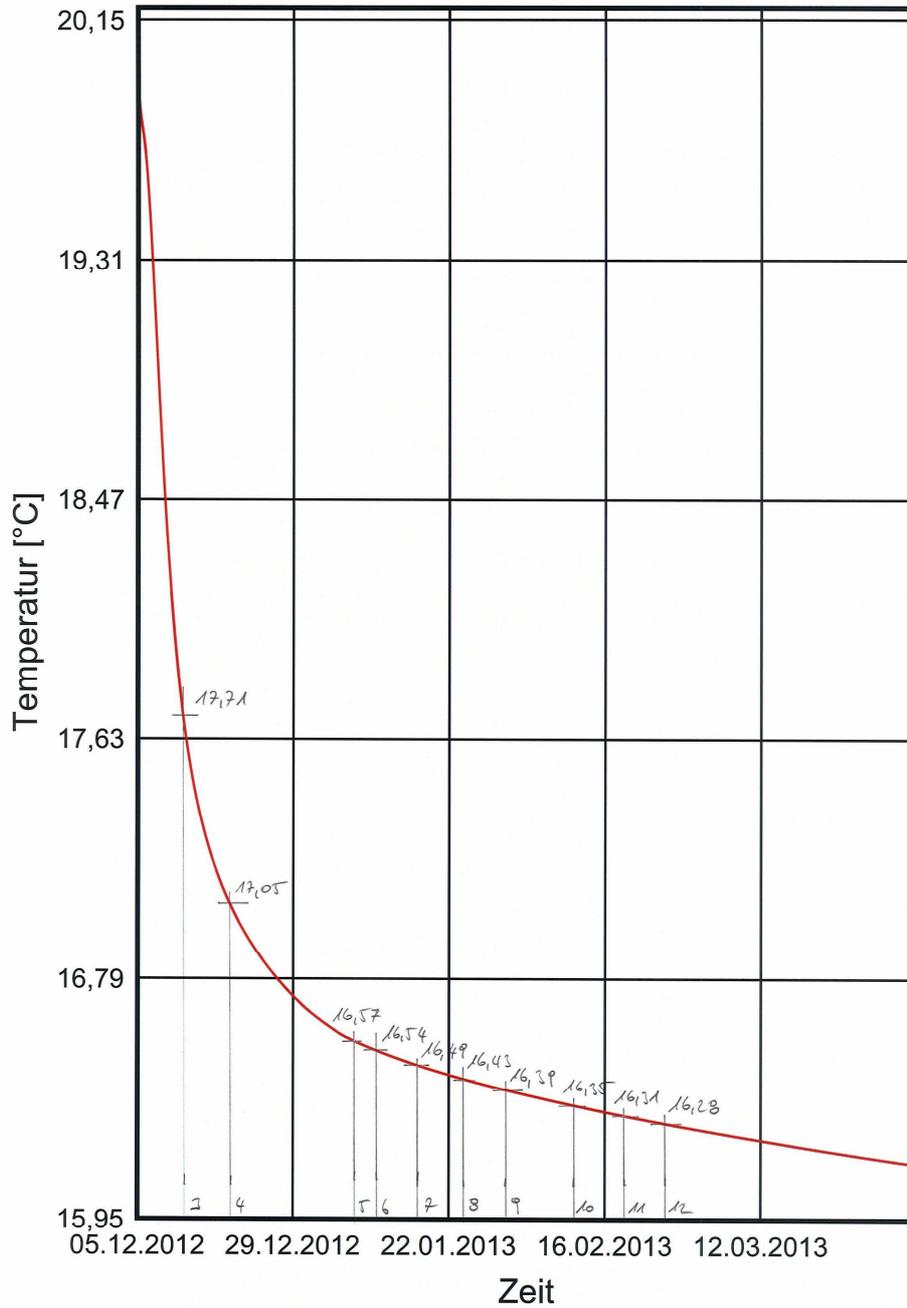
12.1.4.3 Messpunkte

### Wassergehalt MP13 Klimakammer

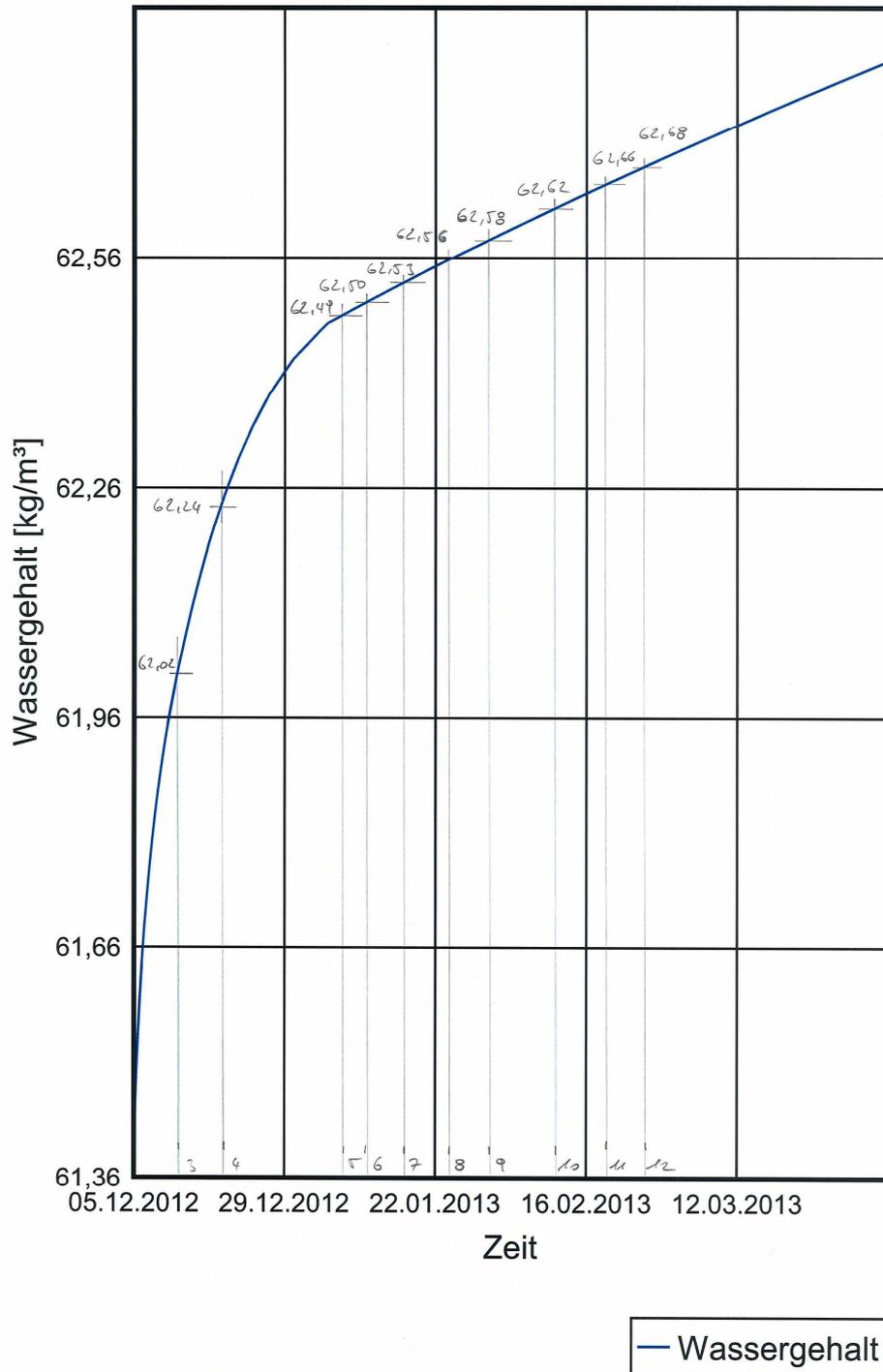


— Wassergehalt

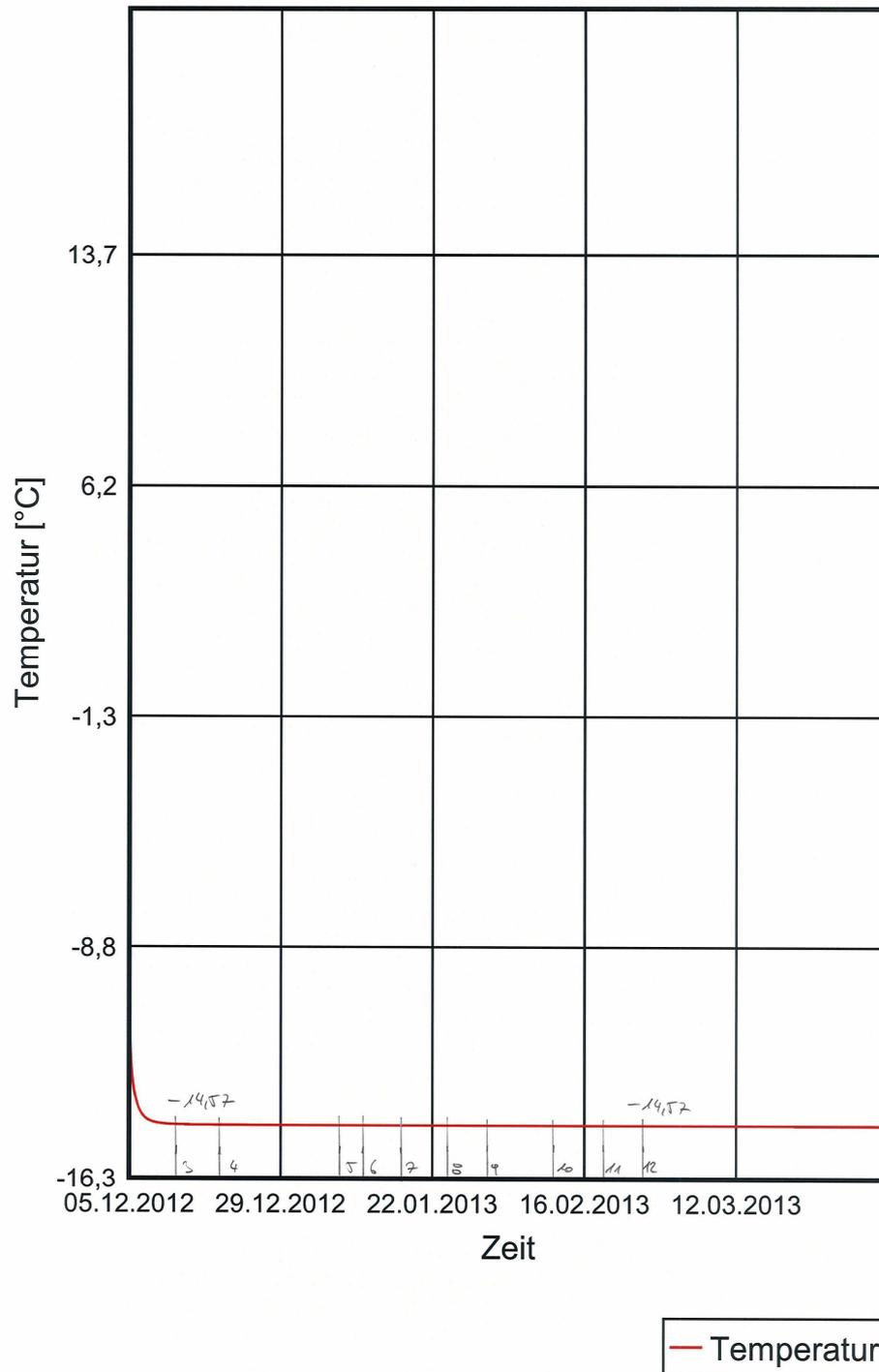
## Temperatur MP13 Klimakammer



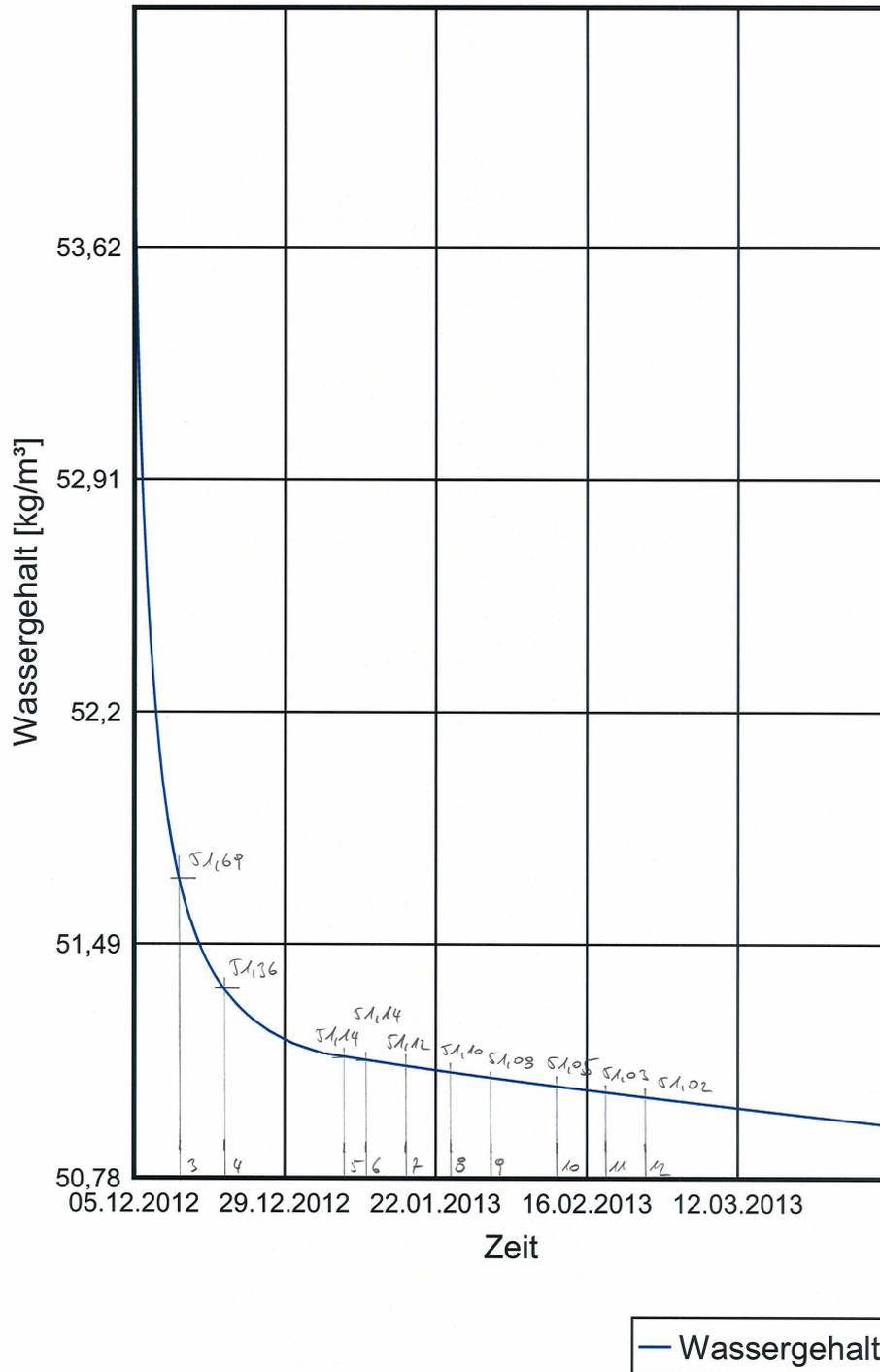
## Wassergehalt MP20 Klimakammer



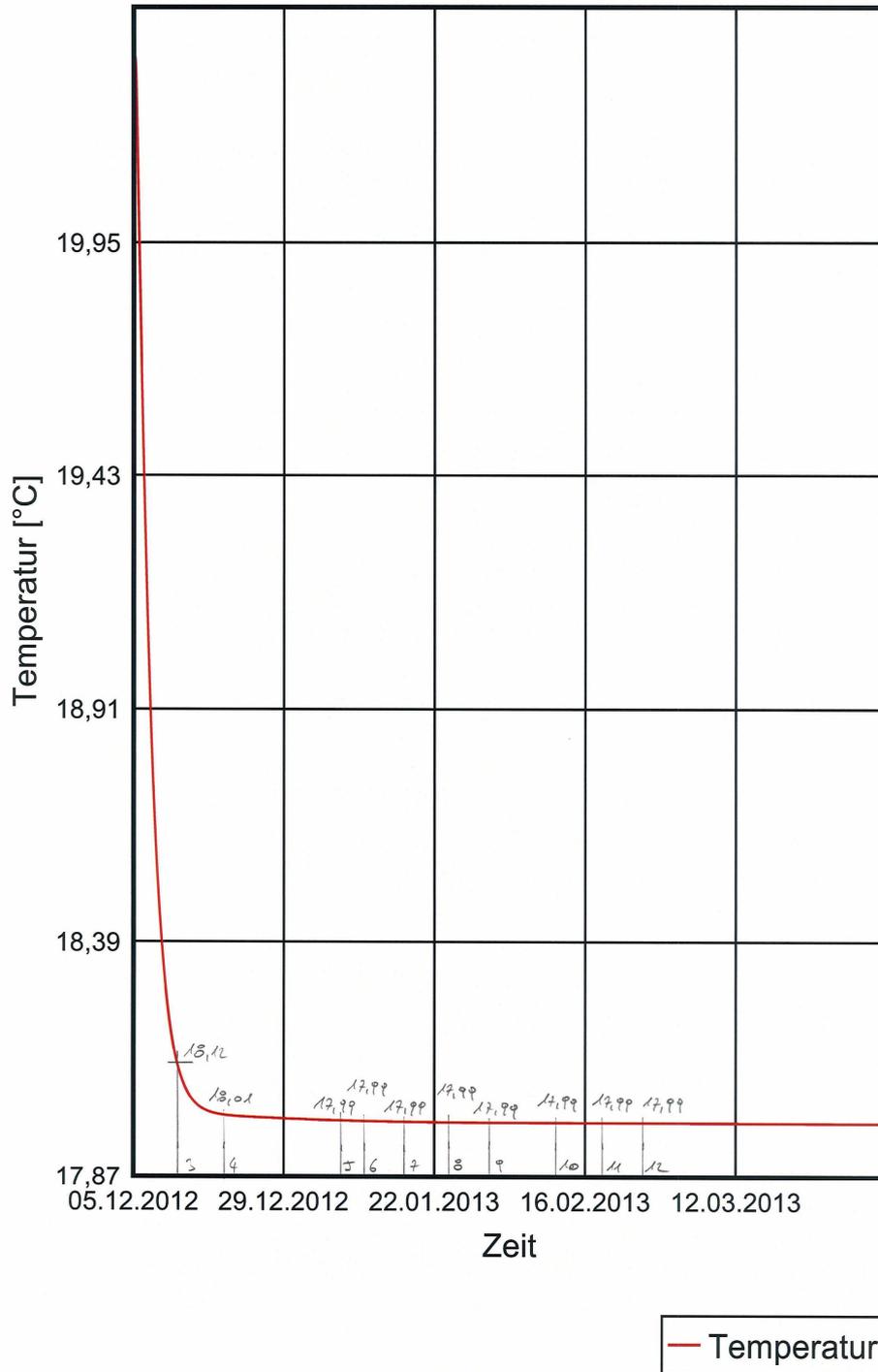
## Temperatur MP20 Klimakammer



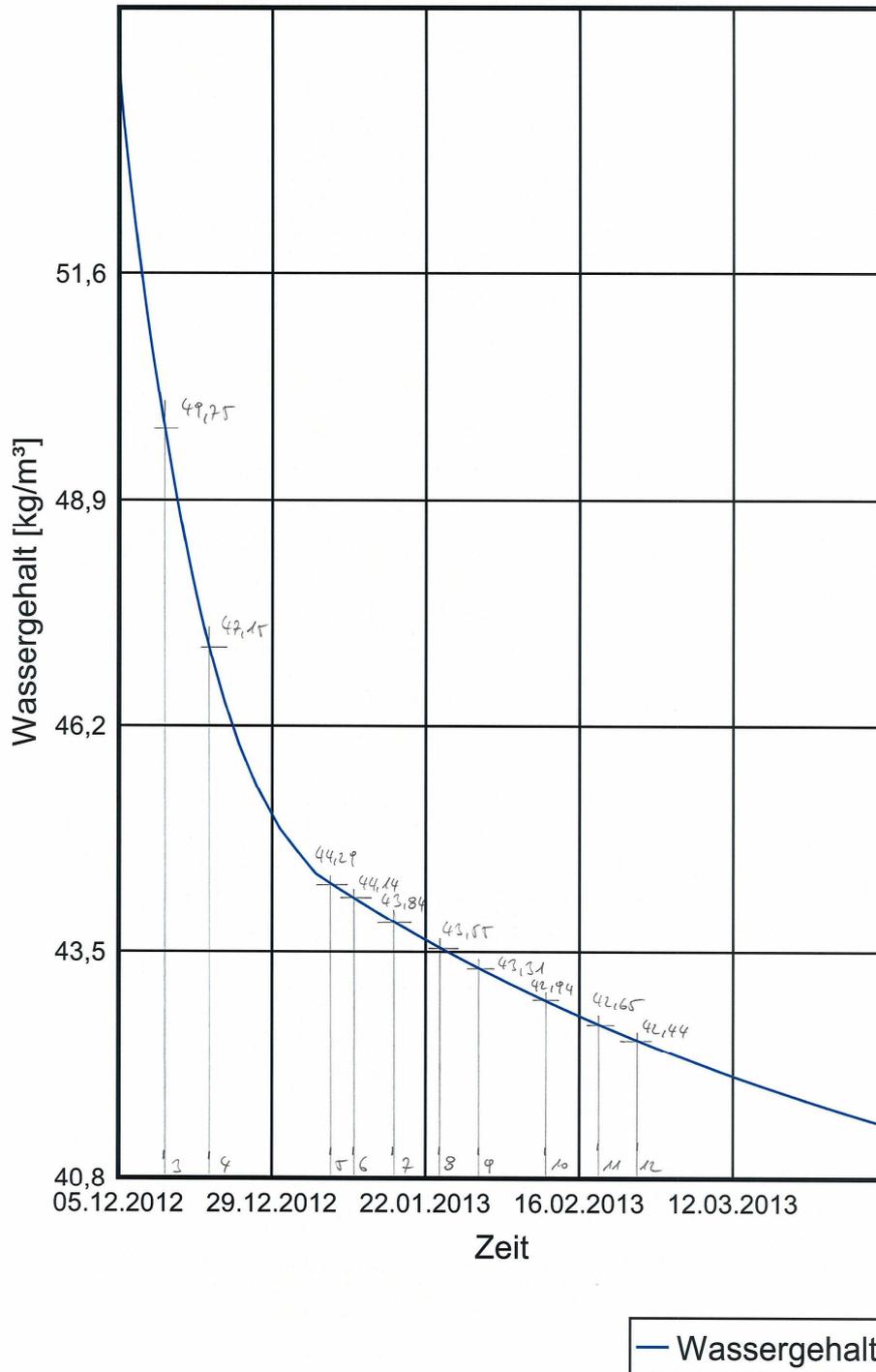
## Wassergehalt MP3 Klimakammer



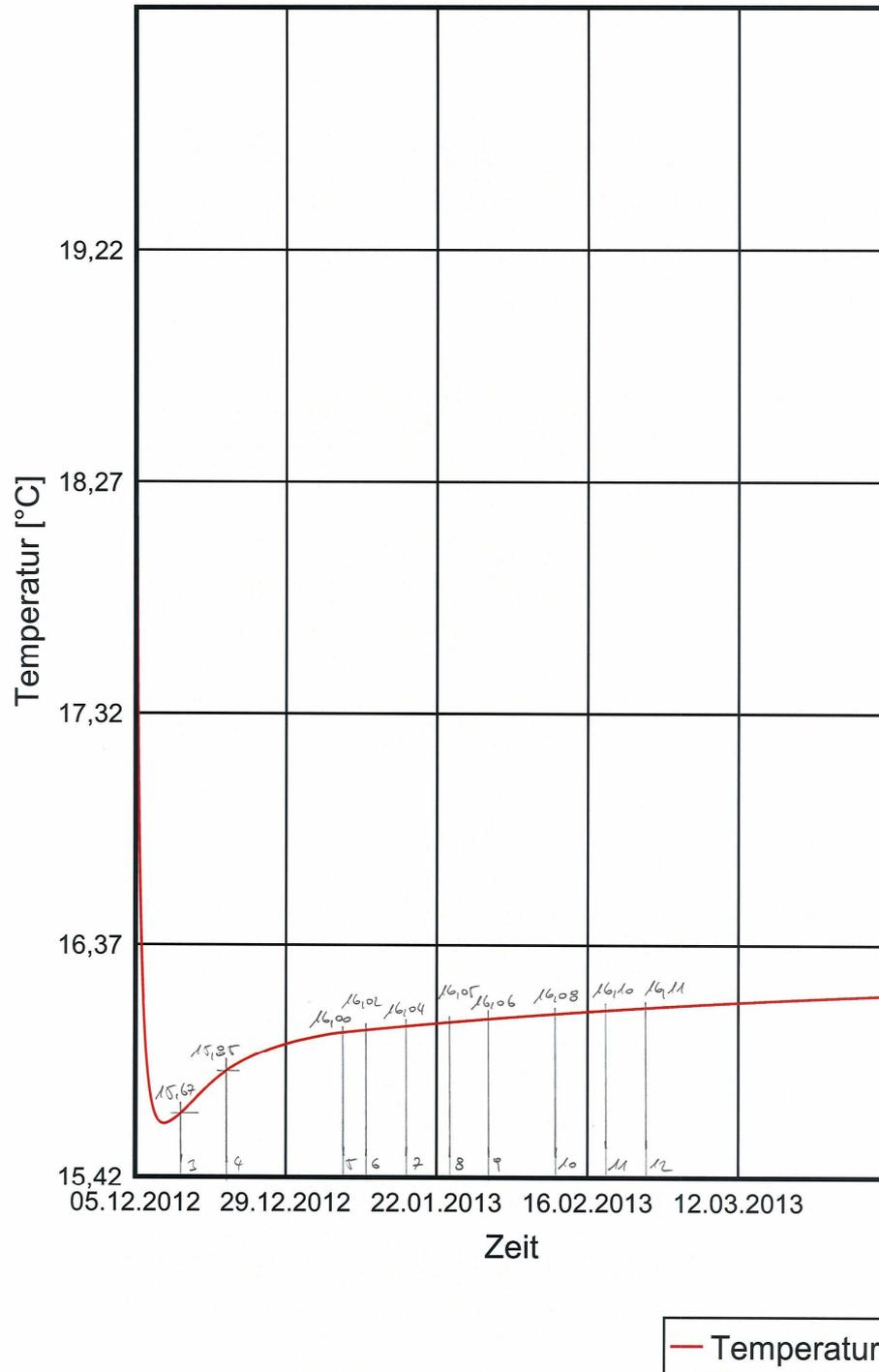
# Temperatur MP3 Klimakammer



## Wassergehalt MP24 Klimakammer



## Temperatur MP24 Klimakammer



12.1.5 Messprotokolle

Messprotokoll

Messung	1
Datum:	16/11/2012
Temperatur Innen [°C]:	23,1
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	45,0
Temperatur Außen [°C]:	23,1
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	45,0
Uhrzeit:	1300

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4		
	5		
	19		
BSP OG Außen	22		
BSP Decke Innen	6		
	7		
	8		
	9		
	10		
	11		
	12		
BSP Decke Außen	13		
	14		13,6
	15		15,1
	16		13,5
	17		15
	18		15,1
	20		
BSP EG Innen	21		
	26		
	1		
BSP EG Außen	2		
	3		
	23		
	24		
	25		

### Messprotokoll

Messung	2
Datum:	04/12/2012

Temperatur Innen [°C]:	23,0
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	33,0

Versuchsbeginn 05/12/2012

Temperatur Außen [°C]:	23,0
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	33,0

Bedingungen: Außen -15°C 60%  
Innen +23°C 45%

Uhrzeit:	12:00
----------	-------

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	21,9	15,4
	5	22,0	15,7
	19	/	13,3
BSP OG Außen	22	21,6	14,8
BSP Decke Innen	6	21,3	14,6
	7	21,7	14,7
	8	22,0	17,7
	9	22,3	17,7
	10	22,0	14
	11	22,0	20,5
	12	21,3	14,5
	13	22,1	39,4
BSP Decke Außen	14	21,6	9
	15	21,4	10,8
	16	21,4	8,7
	17	21,3	9,2
	18	21,5	10,4
	20	21,7	11,1
	21	21,4	12,7
	26	21,8	12,2
BSP EG Innen	1	21,7	14,6
	2	21,5	14,2
	3	21,5	14,5
BSP EG Außen	23	20,8	11,9
	24	20,7	11,8
	25	21,0	12,3

### Messprotokoll

Messung	3
Datum:	12/12/2012

Temperatur Innen [°C]:	23,0
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	44,1

Temperatur Außen [°C]:	-15,1
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	53,2

Uhrzeit:	11:25
----------	-------

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	21,7	14,2
	5	21,2	15,2
	19	/	14,4
BSP OG Außen	22	11,0	15,2
BSP Decke Innen	6	21,4	13,6
	7	22,6	13,8
	8	21,1	15,5
	9	20,6	15,4
	10	19,1	12,8
	11	19,7	13,3
	12	18,7	16,0
	13	21,2	23,6
BSP Decke Außen	14	-12,8	11,0
	15	-12,0	11,6
	16	-12,0	10,0
	17	-12,0	10,0
	18	-11,9	11,0
	20	-11,9	13,6
	21	-11,1	14,0
26	1,0	16,6	
BSP EG Innen	1	21,2	13,4
	2	19,3	13,3
	3	20,1	13,5
BSP EG Außen	23	2,0	16,2
	24	7,0	14,6
	25	7,8	15,5

### Messprotokoll

Messung	4
Datum:	19/11/2012

Temperatur Innen [°C]:	23,1
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	43,5

Temperatur Außen [°C]:	-15,6
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	57,1

Uhrzeit:	1405
----------	------

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	17,6	13,6
	5	17,6	15,3
	19	/	14,0
BSP OG Außen	22	7,0	14,8
BSP Decke Innen	6	21,3	13,3
	7	22,3	13,7
	8	21,4	14,9
	9	21,4	15,0
	10	20,9	11,9
	11	20,9	13,0
	12	20,3	15,5
	13	17,3	22,8
BSP Decke Außen	14	-11,9	11,0
	15	-12,8	12,8
	16	-12,8	10,5
	17	-12,8	19,5
	18	-12,9	11,3
	20	-10,1	13,4
	21	-11,3	13,2
	26	2,0	14,5
BSP EG Innen	1	20,3	13,2
	2	19,3	13,2
	3	20,2	13,6
BSP EG Außen	23	-0,8	14
	24	11,0	13,5
	25	11,2	14,5

### Messprotokoll

Messung	5
Datum:	07/01/2013
Temperatur Innen [°C]:	21,2
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	44,5
Temperatur Außen [°C]:	19,4
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	61,1
Uhrzeit:	15:30

Anlage über Wärmehaube ausgefallen!  
 Messzeit am 07/01/2013 16:00  
 Bedingungen: Innen: 22°C 45%  
 Außen: -15°C 60%

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	22,0	12,2
	5	22,0	14,6
	19	/	12,6
BSP OG Außen	22	21,1	10,3
BSP Decke Innen	6	21,7	12,5
	7	21,3	12,5
	8	22,7	14,0
	9	22,6	13,7
	10	22,1	10,3
	11	21,8	16,7
	12	21,9	13,3
	13	22,2	23,2
BSP Decke Außen	14	19,8	12,5
	15	19,8	13,3
	16	19,8	12,8
	17	19,6	13,5
	18	19,7	13,3
	20	19,8	13,4
	21	19,2	13,5
	26	20,3	11,9
BSP EG Innen	1	21,7	10,4
	2	21,4	12,8
	3	21,5	13,1
BSP EG Außen	23	20,3	11,1
	24	20,8	10,4
	25	20,8	10,5

### Messprotokoll

Messung	6
Datum:	11/01/2013

Temperatur Innen [°C]:	22,9
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	43,4

Temperatur Außen [°C]:	5,7
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	72

Uhrzeit:	0830
----------	------

Der Fehler wurde entdeckt →  
Kühlmittelbehälter. Anlage lief von  
07/01/2013 bis 11/01/2013  
nicht optimal. Fehler behoben  
Donnerstag 11/01/2013 0800!

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	22,0	12,3
	5	21,5	12,8
	19	/	13,2
BSP OG Außen	22	14,7	12,1
BSP Decke Innen	6	21,8	12,3
	7	22,5	12,3
	8	22,8	14,1
	9	22,7	13,9
	10	22,0	10,5
	11	21,9	17,0
	12	22,0	13,9
	13	21,8	22,2
BSP Decke Außen	14	12,1	13,8
	15	14,8	14,6
	16	12,3	14,0
	17	11,2	14,7
	18	11,0	14,4
	20	9,3	14,2
	21	5,1	13,0
	26	13,4	13,1
BSP EG Innen	1	21,8	10,4
	2	20,9	12,1
	3	21,3	13,0
BSP EG Außen	23	13,4	12,3
	24	14,7	12,1
	25	14,2	12,0

## Messprotokoll

Messung	7
Datum:	17/01/2013

Temperatur Innen [°C]:	22,8
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	42,9

Temperatur Außen [°C]:	-15,5
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	57,4

Uhrzeit:	10:30
----------	-------

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	22,2	11,9
	5	21,4	14,2
	19	/	12,5
BSP OG Außen	22	5,0	14,8
BSP Decke Innen	6	21,7	12,0
	7	22,4	11,8
	8	23,0	13,3
	9	22,2	13,4
	10	22,2	10,6
	11	22,2	16,9
	12	22,2	14,2
	13	21,4	20,8
BSP Decke Außen	14	-10,9	12,8
	15	-12,7	13,9
	16	-11,3	14,0
	17	-13,2	13,7
	18	-13,0	14,3
	20	-13,5	14,9
	21	-12,5	13,4
26	-1,8	15,0	
BSP EG Innen	1	21,5	10,1
	2	20,3	12,1
	3	20,8	12,4
BSP EG Außen	23	1,0	15,0
	24	6,1	14,8
	25	6,2	14,1

## Messprotokoll

Messung	8
Datum:	24/01/2015

Temperatur Innen [°C]:	23,4
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	42,1

Temperatur Außen [°C]:	-14,7
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	61,4

Uhrzeit:	08:16
----------	-------

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	21,8	12,3
	5	21,0	14,1
	19	/	12,4
BSP OG Außen	22	6,0	14,0
BSP Decke Innen	6	21,9	12,2
	7	22,9	12,4
	8	22,4	13,4
	9	22,4	13,7
	10	22,2	10,3
	11	22,2	16,2
	12	22,2	13,1
	13	21,2	20,9
BSP Decke Außen	14	-11,6	13,3
	15	-13,8	14,3
	16	-12,6	13,8
	17	-14,5	14,3
	18	-14,6	14,2
	20	-15,0	14,9
	21	-13,5	14,2
26	-11,9	13,5	
BSP EG Innen	1	21,7	9,8
	2	19,9	12,0
	3	20,8	12,5
BSP EG Außen	23	-11,9	13,7
	24	6,0	14,1
	25	6,0	12,8

### Messprotokoll

Messung	9
Datum:	21/01/2013

Temperatur Innen [°C]:	22,8
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	42,3

Temperatur Außen [°C]:	-14,9
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	60,9

Uhrzeit:	0820
----------	------

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	22,1	11,1
	5	21,4	13,8
	19	/	12,6
BSP OG Außen	22	6,5	12,3
BSP Decke Innen	6	21,7	12,0
	7	22,6	14,4
	8	22,3	13,0
	9	22,3	13,1
	10	22,4	10,1
	11	22,3	15,6
	12	22,4	12,6
BSP Decke Außen	13	21,4	20,6
	14	-11,0	13,3
	15	-14,0	14,4
	16	-12,6	13,7
	17	-14,6	14,1
	18	-14,9	14,4
	20	-15,2	15,2
21	-12,8	14,0	
BSP EG Innen	26	-2,8	14,8
	1	21,7	9,5
	2	19,8	11,2
BSP EG Außen	3	20,4	12,4
	23	-2,3	14,3
	24	5,8	13,7
	25	5,9	12,0

### Messprotokoll

Messung	10
Datum:	11/01/2013
Temperatur Innen [°C]:	23,5
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	41,7
Temperatur Außen [°C]:	-15,6
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	56,2
Uhrzeit:	11:00

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	22,3	11,6
	5	21,3	13,5
	19	/	11,4
BSP OG Außen	22	6,5	12,0
BSP Decke Innen	6	21,7	11,6
	7	22,6	12,0
	8	21,8	12,3
	9	22,2	12,4
	10	22,4	9,6
	11	22,3	15,6
	12	22,4	12,3
	13	21,4	19,2
BSP Decke Außen	14	-12,2	13,3
	15	-14,1	14,0
	16	-13,1	13,5
	17	-15,3	13,1
	18	-15,0	14,3
	20	-15,0	15,0
	21	-13,7	13,6
	26	-1,7	16,0
BSP EG Innen	1	21,6	9,6
	2	19,8	14,8
	3	20,5	12,1
BSP EG Außen	23	-1,7	19,2
	24	6,0	13,1
	25	6,1	12,0

## Messprotokoll

Messung	11
Datum:	19/01/2013

Temperatur Innen [°C]:	23,2
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	42,7

Temperatur Außen [°C]:	-13,9
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	69,7

Uhrzeit:	0800
----------	------

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	22,1	10,9
	5	21,2	13,0
	19	—	10,9
BSP OG Außen	22	6,6	9,9
BSP Decke Innen	6	21,9	11,1
	7	22,7	10,8
	8	22,3	12,7
	9	22,5	11,8
	10	22,6	8,7
	11	22,5	15,4
	12	22,6	12,0
	13	21,3	18,7
BSP Decke Außen	14	-14,3	13,6
	15	-14,0	14,2
	16	-14,1	12,7
	17	-15,1	13,3
	18	-14,9	14,2
	20	-15,0	15,3
	21	-14,8	14,4
26	-1,0	15,2	
BSP EG Innen	1	21,9	7,5
	2	20,3	11,5
	3	20,8	11,9
BSP EG Außen	23	-1,0	13,0
	24	6,0	13,0
	25	6,1	10,4

### Messprotokoll

Messung	12
Datum:	25/02/2013
Temperatur Innen [°C]:	23,4
Relative Luftfeuchte Innen [%]:	42,6
Temperatur Außen [°C]:	-15,5
Relative Luftfeuchte Außen [%]:	61,6
Uhrzeit:	11:30

Bauteil	Messpunkt	Oberflächentemperatur Messstelle [°C]	Holzfeuchte [%]
BSP OG Innen	4	22,3	10,7
	5	21,2	12,2
	19	/	12,1
BSP OG Außen	22	7,0	11,8
BSP Decke Innen	6	22,3	11,1
	7	22,7	11,5
	8	22,3	12,5
	9	22,6	11,7
	10	22,6	8,8
	11	22,6	14,6
	12	22,7	12,3
	13	21,3	18,2
BSP Decke Außen	14	-14,8	13,4
	15	-14,5	14,2
	16	-13,9	13,1
	17	-14,2	14,3
	18	-14,8	14,9
	20	-14,6	15,2
	21	-12,5	14,2
26	-1,6	14,0	
BSP EG Innen	1	21,8	8,0
	2	20,3	11,4
	3	20,1	11,3
BSP EG Außen	23	-1,0	13,0
	24	6,0	12,6
	25	6,3	10,5

Mittelschicht der BSP-rechte bei Feldstelle MP 2 => 15,3 °C  
(5°C höher!)

## 12.2 Pläne

- Versuchsaufbau Seitenansicht
- Versuchsaufbau Innenansicht
- Versuchsaufbau Außenansicht
- Messpunkte Innenansicht/Seitenansicht
- Messpunkte Außenansicht/Seitenansicht
- Messpunkte Ansicht von oben/Ansicht von unten
- Detail A Außenwand
- Detail B Kelleranschluss
- Detail C Dachanschluss
- Detail D Anschluss Dachüberstand
- Detail E Geschossüberstand
- Detail F Carportanschluss
- Detail G Dachanschluss