

# Bauphysikalischer Vergleich und Bewertung publizierter und ausgeführter Dach-, Decken- und Wandaufbauten in Holz-Massiv- bauweise mit Brettsperrholz

M-4-5/2016



**Konstantin Ganster**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz



Konstantin Ganster, BSc

# **Bauphysikalischer Vergleich und Bewertung publizierter und ausgeführter Dach-, Decken- und Wandaufbauten in Holz- Massivbauweise mit Brettsperrholz**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur  
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
DI Manfred Augustin  
holz.bau forschungs gmbh

Graz, Januar 2016

*„Wer bauen will, braucht Geld und Kraft,  
doch meist nicht hohe Wissenschaft.  
Wer praktisch plant mit Hirn und Hand,  
der hat den rechten Hausverstand.“*  
(Horst Gamerith)

# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

## AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## Danksagung

Ich bedanke mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer für die Möglichkeit dieses interessante Thema zu bearbeiten, für die Unterstützung während der Bearbeitung und für die abschließende Begutachtung.

Weiters bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Manfred Augustin, der mir die Mitarbeit bei der holz.bau forschungs gmbh ermöglichte, mein Interesse an der Wissenschaft und Forschung weckte und mir den Raum zur fachlichen Weiterentwicklung bot.

Großer Dank gilt auch den Mitarbeitern und Kollegen der holz.bau forschungs gmbh und des Instituts für Holzbau und Holztechnologie für das hervorragende Arbeitsklima und die großartige Hilfsbereitschaft. Im speziellen bedanke ich mich bei meiner Bürokollegin Julia Dröscher und meinen Kollegen Florian Wolfthaler und Raimund Sieder die mir stets den Büroalltag verschönert haben.

Natürlich gilt der größte Dank meiner gesamten Familie die mich mittlerweile schon drei Jahrzehnte lang erträgt.

# Kurzfassung

Im Focus dieser Masterarbeit steht die hygrothermische Analyse von ausgewählten „Leitdetails“ in Holz-Massivbauweise mit Brettsperrholz mittels stationärer und instationärer Berechnungen bzw. Simulationen. Da bei der Holz-Massivbauweise besonders Außenbauteile einer ständigen, klimatischen Belastung ausgesetzt sind, ist das bauphysikalische Verständnis dieser noch relativ jungen Bauweise von größter Bedeutung. Einerseits werden diese Belastungen durch die Einwirkung des Außenklimas wie Temperaturschwankungen, Niederschlags- bzw. Schlagregenbelastungen, Sonneneinstrahlung sowie Wind verursacht. Andererseits entsteht auch durch individuelles Nutzerverhalten (Innenklima) wie z. B. Lüftungs- und Heizverhalten oder auch Feuchtigkeitseinträge durch Tätigkeiten wie Kochen oder Waschen eine Belastung der Bauteile. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit und Standsicherheit von tragenden Bauteilen spielt dabei die Holzfeuchte eine besondere Rolle. Denn sowohl die mechanischen, als auch die (bau)physikalischen Eigenschaften werden stark durch den Holzfeuchtegehalt bestimmt. Um dies zu gewährleisten, werden in ÖNORM B 1995 – 1 - 1:2014 Nutzungsklassen für die Errichtung von Holzbauwerken festgelegt, welche die hygroscopischen Eigenschaften von Holz berücksichtigen. Weiters werden in ÖNORM B 3802-1:2015 Gebrauchsklassen definiert, in welchen den unterschiedlichen Einbausituationen von Holz Rechnung getragen werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Analyse, Bewertung und anschließende Zuordnung verschiedener Bauteilanschlüsse mithilfe von geeigneten Softwareapplikationen zu ermöglichen. Um die Qualität der durchgeführten Simulationen zu verifizieren, wurde ein Messsystem in einem Einfamilienhaus, im gestörten (Bauteilanschluss) und ungestörten Bereich (homogener Wandaufbau) installiert. Da solche Langzeitmessungen aber mindestens über die Dauer von einem Jahr erfolgen sollten, konnte im Rahmen dieser Arbeit nur ein Vergleich der Simulationen über den Zeitraum von zwei Monaten erfolgen. Diese Gegenüberstellung zeigte im Sockelnahen Bereich zwar stark abweichende Ergebnisse (ca. 10-20 %), allerdings konnte im homogenen Bereich der Außenwand eine gute Übereinstimmung erzielt werden.

## Abstract

The focus of the present master thesis is the hygrothermal analysis of selected "leading details" in solid timber constructions with cross-laminated timber by means of steady and unsteady calculations and simulations. Solid timber constructions are exposed to a climatic impact on external components. The building physics understanding of this relatively new construction is of the utmost importance. On one hand, these stresses are caused by the action of the external climate, such as temperature fluctuations, precipitation and driving rain loads, sunlight and wind. On the other hand, loads are also produced by individual user behaviors (indoor climate) such as ventilation and heating performance or moisture ingress through activities such as cooking or washing. In view of the durability and stability of structural members, the moisture content plays a crucial role. Both, the mechanical as well as the physical properties are strongly influenced by the moisture content. According to ÖNORM B 1995-1 2014, service classes for the construction of timber structures are defined which take account of the hygroscopic properties of timber, in which the different installation situations of wood be taken into account. In addition in ÖNORM B 3802-1 2015 classes are defined for different installation situations. Aim of this study is to analyze, evaluate and subsequent assign different component connections by using appropriate software applications. In order to verify the quality of the simulations, a measurement system, in a disturbed (component connection) and undisturbed region (homogeneous wall structure) of a detached house has been installed. Since long-term measurements should be accomplished but at least over the period of one year, could only be a comparison of simulations over the period of two months within could be done the scope of this work. In the base region near the socket the comparison show significant differences (10 - 20 %), however, a good match could be achieved in the homogeneous region of the outer wall.

# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1-1	BRETTSPERRHOLZ.....2
1-1.1	Entwicklung.....2
1-1.2	Aufbau und Herstellung .....3
1-1.3	Brettsperrholz im Hochbau.....4
1-1.3.1	Baustoffeigenschaften .....4
1-1.3.2	Holz-Massivbauweise.....4
1-2	LEITDETAILS.....5
1-2.1	Allgemein .....5
1-2.2	Sockel .....5
1-2.3	Decke.....6
1-2.4	Dach.....6
1-2.5	Fensteranschluss.....7
<b>KAPITEL 2: BAUPHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>9</b>
2-1	WÄRMESCHUTZ .....10
2-1.1	Allgemein .....10
2-1.2	Temperatur (1).....10
2-1.2.1	Auswirkungen der Temperatur auf Stoffe (1) .....10
2-1.2.2	Temperaturbedingte Spannungen in festen Körpern (1) .....12
2-1.3	Wärmeenergie und spezifische Wärmekapazität (2) .....13
2-1.4	Enthalpie.....14
2-1.5	Wärmetransport (2) .....14
2-1.5.1	Wärmeleitung (Konduktion) .....14
2-1.5.2	Konvektion (2).....19
2-1.5.3	Strahlung.....20
2-1.6	Wärmetechnische Kenngrößen (14) .....26
2-1.6.1	Allgemein .....26
2-1.6.2	Wärmeübergangswiderstand (15).....26
2-1.6.3	Wärmedurchlasswiderstand (15) .....27
2-1.6.4	Wärmedurchgangswiderstand (14).....27
2-1.6.5	Wärmeübergangskoeffizient (14).....27
2-1.7	Wärmebrücken (14).....28
2-1.7.1	Begriffsbestimmungen .....28
2-2	FEUCHTESCHUTZ.....33
2-2.1	Allgemein (7).....33

2-2.1.1	Wasser und Bauwerke (14).....	33
2-2.1.2	Wasser und Bauteile .....	37
2-2.2	Gase (9).....	38
2-2.2.1	Gasmischungen (9) .....	38
2-2.2.2	Temperaturbedingte Spannungen von Gasen (1).....	40
2-2.2.3	Luftfeuchtigkeit (9).....	41
2-2.3	Flüssigkeiten .....	42
2-2.3.1	Das Element Wasser (9).....	42
2-2.3.2	Anomalie des Wassers (1) .....	43
2-2.3.3	Transportmechanismen des Wassers (9).....	43
2-2.4	Feuchtetechnische Kenngrößen .....	50
2-2.4.1	Oberflächentemperatur von Bauteilen .....	50
2-2.4.2	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (14) .....	53
2-2.4.3	Abhängigkeit der Dampfdiffusion von Holz (24).....	54
2-2.5	Schimmelpilzbildung .....	57
2-2.5.1	Allgemein (24).....	57
2-2.5.2	Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen (25).....	57
<b>KAPITEL 3: ANFORDERUNGEN UND BERECHNUNGSMETHODEN.....</b>		<b>59</b>
3-1	WÄRMESCHUTZ IM HOCHBAU (ÖNORM B 8110-2:2003).....	60
3-1.1	Allgemein (15).....	60
3-1.2	Anforderungen (15) .....	60
3-1.3	Klimabedingungen (15) .....	61
3-1.4	Berechnung zur Vermeidung von Kondensation an der inneren Bauteiloberfläche (15).....	63
3-1.5	Berechnung der Kondensation im Inneren von Bauteilen .....	63
3-2	. WÄRMEBRÜCKEN (ÖNORM EN ISO 10211).....	66
3-2.1	Modellhafte Abbildung der Konstruktion (27) .....	66
3-2.1.1	Allgemeines .....	66
3-2.1.2	Begriffe .....	66
3-2.1.3	Regeln für die modellhaft Abbildung .....	66
3-2.2	Eingabe- und Ausgabedaten (27).....	67
3-2.2.1	Eingabedaten.....	67
3-2.2.2	Ausgabedaten.....	67
3-3	ANFORDERUNGEN AN DEN FEUCHTIGKEITSSCHUTZ (ÖNORM B 2320:2010) .....	67
3-3.1.1	Allgemeines (28).....	67
3-3.1.2	Feuchtigkeit aus dem Baugrund (28) .....	68
3-3.1.3	Niederschlagswasser (28) .....	69

3-3.1.4	Schlagregen (29).....	69
3-4	<b>BERECHNUNGSMETHODEN</b> .....	72
3-4.1	Allgemeines.....	72
3-4.2	Stationäre und Instationäre Wärmeleitung (9).....	72
3-4.3	Stationärer und Instationärer Wasserdampftransport (14).....	73
3-4.3.1	Transportgesetz der Wasserdampfdiffusion (14).....	75
3-4.4	Hygrothermisches Berechnungsverfahren (31).....	76
3-4.5	Funktionsweise des Isolethenmodells (31).....	78
3-4.6	Funktionsweise des biohygrothermischen Modells (31).....	78
3-4.7	Lowest Isoleth for Mould (31).....	80
3-4.8	Nutzungsklassen (33) .....	83
3-4.9	Gefährdungsklassen (33).....	83
3-4.10	Gebrauchsklassen (34).....	85
3-5	<b>SOMMERLICHER WÄRMESCHUTZ</b> .....	87
3-5.1	Allgemein (9).....	87
3-5.2	Immisionsfläche (9).....	89
3-5.3	Speicherwirksame Masse (9).....	90
	<b>KAPITEL 4: DETAILS UND ERGEBNISSE</b> .....	<b>91</b>
4-1	<b>SOCKELVARIANTE „STANDARD AUSFÜHRUNG“ (MIT HINTERLÜFTUNG)</b> .....	92
4-1.1	Bauteilaufbauten.....	93
4-2	<b>SOCKELVARIANTE „BETONSOCKEL“ (MIT HINTERLÜFTUNG)</b> .....	94
4-2.1	Bauteilaufbau.....	95
4-3	<b>SOCKELVARIANTE „STANDARDVARIANTE“ (MIT WDV5)</b> .....	96
4-3.1	Bauteilaufbau.....	97
4-4	<b>STATIONÄRE BERECHNUNGEN</b> .....	97
4-4.1	Randbedingungen .....	97
4-4.2	Berechnung der U-Werte.....	98
4-4.2.1	Außenwand AW1 .....	98
4-4.2.2	Außenwand AW2 .....	98
4-4.2.3	Außenwand AW3 .....	99
4-4.2.4	Kellerdecke KD1 .....	99
4-4.3	Berechnung nach Glaser 1D.....	100
4-4.3.1	Außenwand AW1 .....	100
4-4.3.2	Außenwand AW2 .....	100
4-4.3.3	Außenwand AW3 .....	101
4-4.4	Berechnung nach Glaser 2D .....	102
4-4.4.1	Sockelvariante „Standardausführung“ (mit Hinterlüftung).....	102

4-4.4.2	Sockelvariante „Betonsockel“ .....	105
4-4.4.3	Sockelvariante „Standardvariante“ (mit WDVS) .....	108
4-5	INATIONÄRE BERECHNUNGEN.....	111
4-5.1	Hygrothermisches Berechnungsverfahren (3) .....	111
4-5.2	Vorgehensweise .....	112
4-5.3	Randbedingungen und Eingabeparameter .....	112
4-5.3.1	Klimadaten.....	113
4-5.3.2	Geometrie.....	114
4-5.3.3	Stoffkennwerte.....	114
4-5.3.4	Anfangsbedingungen .....	115
4-5.3.5	Zeitschritte .....	115
4-5.3.6	Sockelvariante „Standardvariante“ (mit Hinterlüftung) .....	115
4-5.3.7	Sockelvariante „Betonsockel“ .....	122
4-5.3.8	Sockelvariante „Standardvariante“ (mit WDVS) .....	129
4-6	BERECHNUNG DES SCHIMMELPILZRISIKOS.....	136
4-6.1	Allgemeines .....	136
4-6.2	Sockelvariante „Standardvariante“ (mit Hinterlüftung) .....	136
4-6.2.1	Sockelvariante „Betonsockel“ (mit Hinterlüftung).....	138
4-6.2.2	Sockelvariante „Standardvariante“ (mit WDVS) .....	139
4-7	ENTWICKLUNG DER HOLZFEUCHTE .....	140
4-7.1	Standardvariante mit Hinterlüftung .....	140
4-8	BETONSOCKEL MIT HINTERLÜFTUNG .....	141
4-9	STANDARDVARIANTE MIT WDVS .....	143
4-10	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE .....	145
4-11	GEGENÜBERSTELLUNG: NUTZUNGSKLASSE VS. GEBRAUCHSKLASSE. 147	
4-12	DECKENAUSKRAGUNGEN .....	148
4-12.1	Einleitung und Problemstellung.....	148
4-12.2	Untersuchte Deckenauskragungen.....	149
4-12.2.1	Deckenauskragung Standardvariante.....	149
4-12.2.2	Bauteilaufbauten .....	150
4-12.3	Deckenauskragung mit ungedämmter Unterseite .....	152
4-12.3.1	Bauteilaufbau .....	153
4-12.4	Deckenauskragung mit darüber liegendem Nassraum.....	154
4-12.4.1	Bauteilaufbau .....	155
4-12.5	Nassräume.....	155
4-13	BAUPHYSIKALISCHE BERECHNUNGEN UND SIMULATIONEN .....	159
4-13.1	Stationäre Berechnungen .....	159

4-13.1.1	Randbedingungen für Wohnräume.....	159
4-13.2	Randbedingungen für Nassräume.....	159
1.1.1	Geometrische Randbedingungen.....	160
1.1.2	Berechnung der U-Werte.....	161
1.1.2.1	Außenwand AW1 .....	161
1.1.2.2	Geschossdecke GD1 .....	161
1.1.2.3	Geschossdecke GD2 (auskragende Decke) .....	162
1.1.2.4	Geschossdecke GD3 (auskragende Decke ohne Dämmung).....	162
1.1.2.5	Geschossdecke GD3 (mit Innendämmung).....	163
1.1.2.6	Geschossdecke GD4 (Nassraum) .....	163
4-13.3	Berechnung nach Glaser 1D .....	164
4-13.3.1	Außenwand AW1 .....	164
4-13.3.2	Geschossdecke GD1 .....	164
4-13.3.3	Geschossdecke GD2 (auskragende Decke) .....	165
4-13.3.4	Geschossdecke GD3 (ungedämmt) .....	165
4-13.3.5	Geschossdecke GD3 (mit Innendämmung).....	166
4-13.3.6	Geschossdecke GD4 .....	167
4-13.4	Berechnung nach Glaser 2D .....	168
4-13.4.1	Deckenauskrägung Standardvariante .....	168
4-13.4.2	Deckenauskrägung mit ungedämmter Unterseite.....	172
4-13.4.3	Deckenauskrägung mit darüber liegendem Nassraum .....	176
4-14	INATIONÄRE BERECHNUNGEN .....	180
4-14.1	Vorgehensweise.....	180
4-14.2	Deckenauskrägung „Standardvariante“ .....	180
4-14.3	Deckenauskrägung mit ungedämmter Unterseite.....	187
4-14.4	Deckenauskrägung mit darüber liegendem Nassraum .....	193
4-15	BERECHNUNG DES SCHIMMELPILZRISIKOS .....	194
4-15.1	Deckenauskrägung Standardvariante .....	194
4-15.2	Deckenauskrägung mit ungedämmter Unterseite.....	200
4-16	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	202
4-17	FLACHDÄCHER.....	203
4-17.1	Einleitung und Problemstellung .....	203
4-17.2	Untersuchte Flachdachanschlüsse .....	204
4-17.2.1	Flachdach Standardvariante (Attikausbildung mit BSP) .....	204
4-17.2.2	Bauteilaufbau Flachdach FD1 .....	205
4-17.2.3	Flachdach Standardvariante (Attikausbildung mit OSB) .....	205
4-17.3	Stationäre Berechnungen.....	206

4-17.3.1	Berechnung des U-Wertes .....	206
4-17.3.2	Berechnung nach Glaser 1D .....	206
4-17.3.3	Geometrische Randbedingungen .....	207
4-17.4	Berechnung nach Glaser 2D .....	207
4-17.4.1	Standardvariante (Attika mit BSP) .....	207
4-17.4.2	Standardvariante (Attika mit OSB).....	209
4-17.5	Instationäre Berechnungen.....	211
4-17.5.1	Standardvariante (Attika mit BSP) .....	211
4-17.6	Standardvariante (Attika mit OSB).....	215
4-17.7	Berechnung des Schimmelpilzrisikos .....	218
4-17.8	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	220
<b>KAPITEL 5: SCHLUSSBETRACHTUNG .....</b>		<b>221</b>
<b>KAPITEL 6: LONG-TIME MONITORING (AUSBLICK) .....</b>		<b>223</b>
6-1	MESSKONFIGURATION .....	224
6-1.1	Messumgebung .....	224
6-1.2	Messsensoren .....	225
6-1.3	Messkonfiguration in der BSP-Wand .....	226
6-2	AUSFÜHRUNG .....	228
6-3	MESSDAUER .....	231
6-4	BAUPHYSIKALISCHE SIMULATIONEN.....	231
6-4.1	Stationäre Berechnungen .....	231
6-5	ERSTE ERGEBNISSE .....	232
6-6	SIMULATION VERSUS MESSUNG .....	237
<b>ANHANG A VERZEICHNISSE.....</b>		<b>I</b>
A-1	Literaturverzeichnis .....	I
A-2	Abbildungsverzeichnis.....	III
A-3	Tabellenverzeichnis .....	XII

# KAPITEL 1: EINLEITUNG

In Kapitel 1 wird ein kurzer Überblick über den Holzwerkstoff Brettsperrholz bezüglich des grundsätzlichen Aufbaues und der Herstellung gegeben. Im Anschluss daran werden auf die besondere Bedeutung dieses Produktes im Hochbau eingegangen und die vielseitigen Anwendungsbereiche aufgezeigt. Da in dieser Arbeit hauptsächlich bauphysikalische Untersuchungen angestellt werden, wird im Folgenden nicht näher auf die anisotropen Festigkeitseigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen eingegangen. Die besonderen bauphysikalischen Eigenschaften von Brettsperrholz werden in Kapitel 2 näher beschrieben.

In Kapitel 3 werden alle bauphysikalisch relevanten Grundlagen erörtert, wobei die Schwerpunkte auf den Wärmeschutz im Winter und den Feuchteschutz gelegt werden. Des Weiteren werden die spezifischen Eigenschaften von Brettsperrholz im Hinblick auf die Bauphysik besprochen. Kapitel 3 beinhaltet auch alle anzuwendenden Normen bzw. Anforderungen an den Einsatz von Brettsperrholz im Wohnbau. Nachfolgend werden die Berechnungsmethoden, Rechenmodelle und die verwendeten Softwareapplikationen eingehend beschrieben.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit den in dieser Arbeit zu bearbeitenden Leitdetails. Hier wird auf den Begriff Leitdetail genauer eingegangen und die ausgewählten Details beschrieben und dargestellt. Weiters hat Kapitel 4: sämtliche Ergebnisse der bauphysikalischen Untersuchung zum Inhalt. Um eine Aussage über die Qualität der Leitdetails treffen zu können wurden diese quantitativ durch ein Punktevergabesystem bewertet. Natürlich wird auch auf die hierfür verwendeten Bewertungskriterien ausführlich eingegangen.

Das fünfte Kapitel „Diskussion und Schlussfolgerung“ enthält eine Gegenüberstellung von Leitdetails und soll ans Licht bringen, welche Produktpalette vorzugsweise für diverse Aufbauten in Frage kommt bzw. idealerweise zum Einsatz kommen soll. Außerdem werden im Anschluss daran Verbesserungsvorschläge gegeben und Ausführungshinweise erarbeitet, die der Schadensvermeidung bei der Planung und Ausführung dienen sollen.

Das sechste und letzte Kapitel umfasst eine zusammenfassende Schlussbetrachtung dieser Masterarbeit und gibt Ausblicke und Einschätzungen für die Zukunft.

## 1-1 BRETTSPERRHOLZ

### 1-1.1 ENTWICKLUNG

(1)

Holzwerkstoffe sind, durch Zerlegen und nachträgliches Zusammensetzen, entwickelte Produkte, die auch oft unter Beigabe von weiteren Stoffen, wie z.B. Klebstoffen, hergestellt werden. Die Entwicklung von Holzwerkstoffen und somit auch von Brettsperrholz wurde durch die Verbindung von Holzbauteilen durch Klebstoffe maßgebend vorangetrieben. Aber nicht nur die Baustoffentwicklung war daran beteiligt. Da das Arbeiten mit Holz all jenen Arbeiten umfassen, die sich mit der Ver- und Bearbeitung des Rohstoffes Holz bis hin zum Holzwerkstoff befassen, wurde auch durch die Weiterentwicklung der Bearbeitungsmöglichkeiten die Entwicklung des Brettsperrholzes stark angekurbelt. Nicht zuletzt jedoch ist die rasche Entwicklung auch dem breiten Einsatzgebiet von Brettsperrholz zu verdanken. Hier kommt dem Brettsperrholz durch seine Fähigkeit, Lasten in zwei Hauptrichtungen abtragen zu können, besondere Bedeutung zu. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass sowohl durch den hohen Vorfertigungsgrad und der damit verbundenen raschen und wirtschaftlichen Bauweise, als auch durch die Nachhaltigkeit und das umweltschonende Bauen das Interesse enorm gestiegen ist. Abbildung 1.1 zeigt die Entwicklung der BSP-Produktion in Mitteleuropa innerhalb der letzten 25 Jahre.

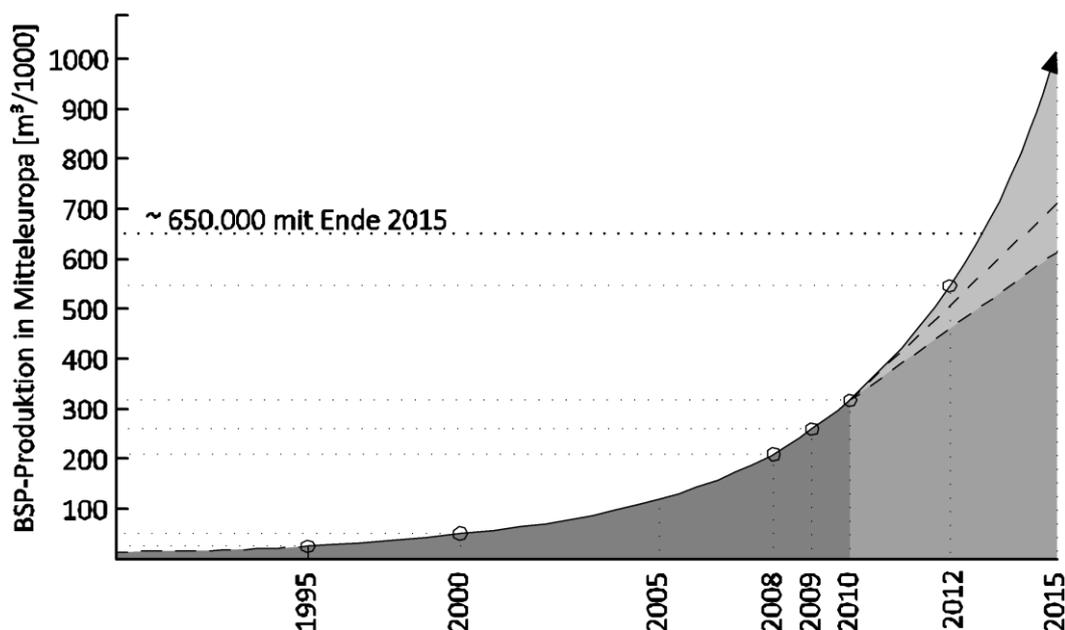


Abbildung 1.1: Entwicklung der BSP-Produktion in Mitteleuropa, Vgl. (2)

In den letzten Jahren wurde am Institut für Holzbau und Holztechnologie an der TU Graz der Focus der Forschungsaktivitäten verstärkt auf die Untersuchung materialspezifischer Eigenschaften von Brettsperrholz und der dazugehörigen Verbindungstechnik gelegt. Ziel dieser Arbeit soll es nun sein, die Anwendung dieses Holzwerkstoffes im Wohnbau, vor allem in Hinblick auf bauphysikalische Aspekte, genauer zu betrachten und somit eine Planungshilfe in Form von optimierten Leitdetails zu entwickeln.

## 1-1.2 AUFBAU UND HERSTELLUNG

(1)

Brettsperrholzplatten (BSP) sind Massivholzplatten die aus mehreren Schichten bestehen und miteinander verklebt werden. Die Grundlage für die Herstellung solcher Platten bilden einzelne Bretter, welche durch sägen aus dem Rohmaterial in der Seitenware (Stammrandzonen) und der Hauptware gewonnen werden. Die Bretter weisen Dicken zwischen 10 mm bis 40 mm und Breiten von 80 mm bis 240 mm auf. Hier sollte jedoch stets ein Verhältnis Breite zur Dicke von  $b:d \geq 4:1$  eingehalten werden. Für die Herstellung von BSP werden hauptsächlich Nadelhölzer wie Fichte, Kiefer, Tanne und Lärche verwendet. Die Schichten bestehen aus einzelnen Brettern die entweder fugenlos (an den Schmalseiten verklebt bzw. „knirsch“ aneinandergelegt) oder mit einer Fuge geringer Breite hergestellt werden (siehe Abbildung 1.2).

Diese Schichten werden im Regelfall um 90° verdreht zueinander angeordnet (siehe Abbildung 1.3), wodurch eine orthotrope Platte entsteht (siehe Abbildung 1.4). Aber auch die Anordnung unter einem beliebigen Winkel wäre selbstverständlich möglich.

Aufgrund der vollflächigen Verklebung unterschiedlich orientierter Schichten, entsteht bei BSP-Platten ein Effekt, der die Reduzierung des Schwind- und Quellverhaltens des Holzes zur Folge hat. Diesen Effekt bezeichnet man als sogenannten „Sperreffekt“. Da momentan noch keine Regelungen betreffend der Abmessungen bei der Produktion bestehen, werden Brettsperrholzplatten üblicherweise in Längen von bis zu 16,5 m und Breiten von bis zu 3 m hergestellt, wobei auch Übergrößen von 30 m Länge und 4,5 m Breite möglich sind. Die notwendigen Stöße der einzelnen Bretter werden dabei mittels Keilzinkenverbindungen realisiert welche versetzt angeordnet werden sollten.

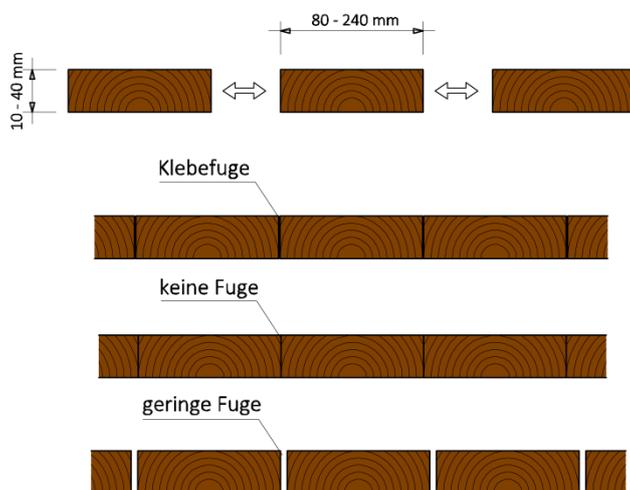


Abbildung 1.2: Einzelschichten

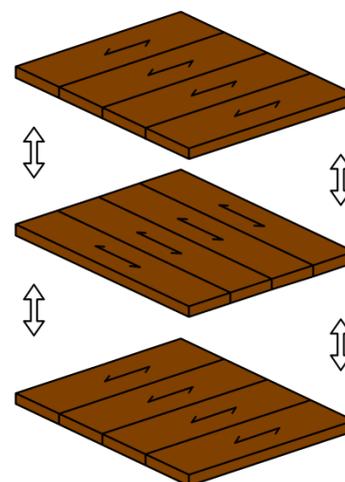


Abbildung 1.3: Verklebung der Einzelschichten

Die Anzahl der Schichten hängt von statischen, bauphysikalischen und brandschutztechnischen Aspekten ab und kann individuell abgestimmt werden. Durch die Anbringung von Decklagen können Brettsperrholzplatten auch optische Anforderungen ohne weiteres erfüllen. Die somit möglichen Plattendimensionen erlauben geschosshohe Elemente und stellen durch ihre vielseitige Herstellbarkeit eine wirtschaftliche Alternative zum konventionellen Massivbau dar, die Holz-Massivbauweise.

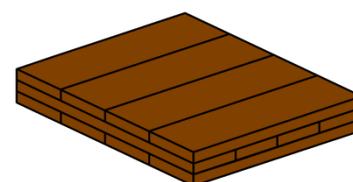


Abbildung 1.4: BSP-Platte

## 1-1.3 BRETTSPERRHOLZ IM HOCHBAU

### 1-1.3.1 Baustoffeigenschaften

(2)

Während Baustoffe mit günstigen wärmeschutztechnischen Eigenschaften nach einem porenreichen Gefüge verlangen, weisen hingegen Baustoffe mit hohen Festigkeiten ein dichtes Gefüge auf. Für Baustoffe die im Wohnbau eingesetzt werden, ist es daher wichtig, dass diese beiden, entgegengesetzten Forderungen entsprechen. Gerade Holz schafft hier ein besonders günstig ausgeprägtes Verhältnis zwischen Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit. Vergleicht man nun Beton mit Brettsperrholz ergeben sich folgende Verhältniszahlen:

$$\frac{f_{c,90,k}}{\lambda_{BSP}} = \frac{3,0}{0,12} = 25,00 \quad (1.1)$$

$$\frac{f_{c,cube}}{\lambda_{Stahlbeton}} = \frac{25}{2,3} = 10,87 \quad (1.2)$$

Je höher die Verhältniszahl zwischen Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit ausfällt, desto geeigneter ist der Baustoff für die Verwendung im Wohnbau. Im Vergleich zu Stahlbeton schafft Holz hier eine Verhältniszahl die jene des Stahlbetons um das rund 2,3-fache übersteigt. Dies spiegelt die hervorragende Eignung von Holz im Wohnbau wider.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Holz-Massivbauweise ist das relativ geringe Eigenwicht. Verglichen mit konventionellen Baustoffen wie Ziegel (700 – 2100 [kg/m<sup>3</sup>]) oder Stahlbeton (1800 – 2600 [kg/m<sup>3</sup>]) weist Holz (400 – 600 [kg/m<sup>3</sup>]) eine bis zu vierfach geringere Rohdichte auf was vor allem bei Transport und Montage aber auch in statischer Hinsicht entscheidende Vorteile bringt.

(3)

Auch den Schallschutz betreffend bietet die Holz-Massivbauweise Vorteile, wenn man diese mit der Leichtbauweise vergleicht. Durch die Möglichkeit der Anbringung von Decklagen und das Variieren der Schichtanzahl, können BSP-Massivplatten individuell auf die schalltechnischen Erfordernisse angepasst werden. Wie in 1-1.2 erwähnt, werden Brettsperrholzplatten an den Schmalseiten verklebt, knirsch und mit geringen Fugen hergestellt. Aus bauphysikalischer Hinsicht sollten beim Einsatz von Brettsperrholz im Wohnbau die Schmalseiten verklebt ausgeführt werden, da durch die Verklebung ein besserer Schallschutz gewährleistet und die Winddichtheit erhöht (konvektionsdicht) werden.

### 1-1.3.2 Holz-Massivbauweise

(1)

Die Bedeutung der Holz-Massivbauweise hat aufgrund der Entwicklung von Brettsperrholz in den 80er - und 90er - Jahren wieder stark zugenommen. Auch in Bezug auf die Alpenkonvention gewinnt die Holz-Massivbauweise zunehmend an Relevanz, nicht nur wegen der großen Holzreserven. Diese zielt nämlich auch auf die nachhaltige Entwicklung des Alpenraums und den Schutz der Interessen der dort lebenden Bevölkerung ab. Die Holz-Massivbauweise kann diese Anforderungen naturgemäß erfüllen.

Im Allgemeinen lassen sich im Holzbau zwei verschiedene Bauweisen unterscheiden. Zum Einen sind das die Holz-Leichtbauweise, bei der die Lastabtragung durch stabförmige Elemente sichergestellt wird und zum Anderen die Holz-Massivbauweise, wo Lasten durch flächenförmige Bauteile abgetragen werden. In Abbildung 1.5 und Abbildung 1.6 sind beide Bauweisen dargestellt. Während bei der Holz-Massivbauweise die dämmenden und tragenden Schichten klar getrennt sind, liegen bei der Holz-Leichtbauweise die tragende und die dämmende Schicht in einer Ebene.

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen jeweils einen klassischen Wandaufbau im Grundriss und lassen die Unterschiede klar erkennen.

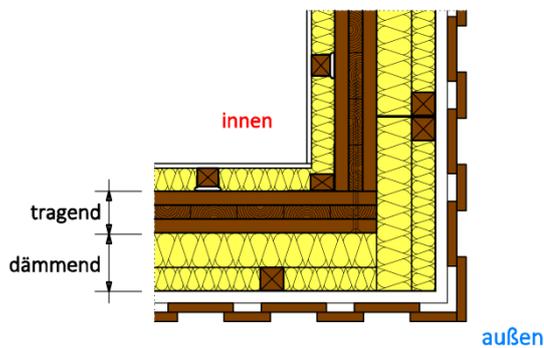


Abbildung 1.5: Holz-Massivbauweise (5)

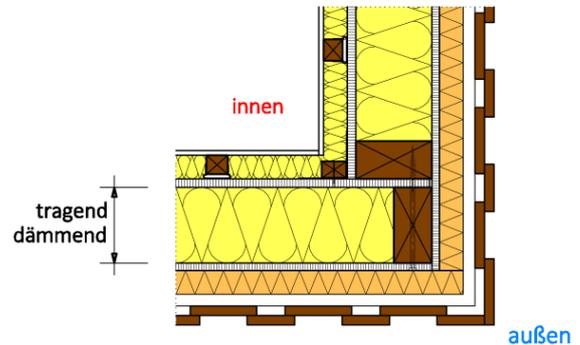


Abbildung 1.6: Holz-Leichtbauweise (5)

## 1-2 LEITDETAILS

### 1-2.1 ALLGEMEIN

Jeder Planer, Bauausführende oder Architekt kennt den Begriff „Leitdetail“, doch tatsächlich existiert keine einheitliche Definition dieses Begriffes. Im Allgemeinen werden unter dem Ausdruck „Leitdetail“ Zeichnungen verstanden, die dem Auftragnehmer spezielle Detaillösungen, also eine erwünschte Art der Ausführung, nahelegen. Es handelt sich also um eine zeichnerische Beschreibung eines repräsentativen Bauteils, der die grundlegenden Konstruktions- und Qualitätsstandards eines Gebäudeteils definiert. Leitdetails stellen demzufolge dem Auftragnehmer sonst relativ frei zu planende Ausführungseinschränkungen entgegen. Leitdetails sollten daher mehr der näheren Illustration dienen, in der alle wesentlichen Punkte, die dem Verfasser wichtig sind, enthalten sind. Leitdetails werden von vielen Herstellern in verschiedenen Formen wie z.B. „hardcopy-form“ oder in digitaler Form via Internet angeboten.

Die rasante Entwicklung im Holz-Massivbau und die damit verbundene Nachfrage führen zu einer zunehmenden Vielfalt an Detaillösungen. Auch die ständig wechselnden Anforderungen von Architekten und Nutzern haben großen Einfluss auf eine optimale Lösungsfindung, sei es im Bereich der Einfamilienhäuser oder im öffentlichen mehrgeschossigen Gewerbebau. Leitdetails die heute noch den Stand der Technik darstellen sind mit den wachsenden Ansprüchen und sich ändernden Nutzverhalten teilweise nicht mehr realisierbar.

### 1-2.2 SOCKEL

Der Sockel stellt die Anschlussstelle zwischen Kellerwand bzw. Flachgründung und der aufgehenden Außenwand dar. Das bedeutet, dass dieser Anschluss einerseits von Erdreich umgeben ist und andererseits den Witterungseinflüssen im Außenbereich ausgesetzt ist. Neben Schlagregen, Bodenfeuchte und möglicherweise drückendem Wasser, wirkt auf den Sockelbereich auch rückprallendes Regenwasser in der Spritzwasserzone ein. Durch besondere Anliegen seitens der Architekten wie barrierefreies Bauen und komfortbedingte Wünsche durch die Nutzer (geringer Niveauunterschied) wird die „Lage“ des Sockelanschlusses weiter verschärft. Der Sockelanschluss zählt daher zweifellos zu den problematischsten Details eines Gebäudes, speziell im Holzbau.

Abbildung 1.7 bis Abbildung 1.9 zeigen exemplarisch klassische Sockelausführungen auf die in Kapitel 4 noch näher eingegangen wird.

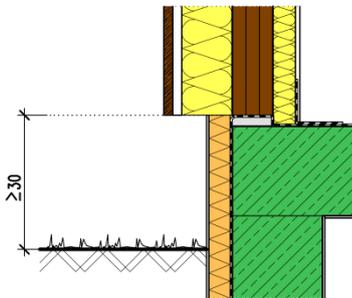


Abbildung 1.7: Sockel 30cm (6)

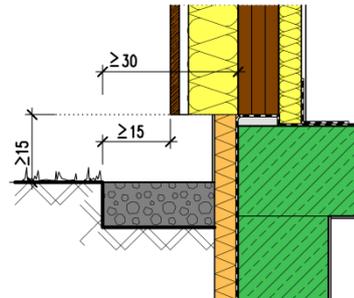


Abbildung 1.8: Sockel 15cm (6)

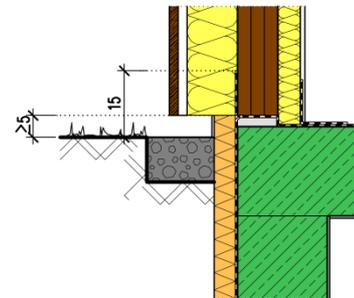


Abbildung 1.9: Sockel 5cm (6)

### 1-2.3 DECKE

Als Decke bezeichnet man horizontal ausgeführte Bauteile, die in erster Linie eine raumabschließende oder trennende Funktion haben. Sie dienen allerdings auch als Geh- und Standflächen. Der Aufbau und die Dimensionierung von Geschossdecken innerhalb von Wohn- und Betriebseinheiten werden neben den abzutragenden Nutzlasten auch durch den Schallschutz bestimmt. Die Nutzlasten werden vertikal zur Deckenebene eingeleitet, wodurch das Brettsperrholz als Platte wirkt. Bei Decken gegen unbeheizte Räume oder Außenluft, wie zum Beispiel Deckenauskragungen, sind hingegen auch Anforderungen an Wärme- und Feuchteschutz zu stellen. Besondere Aufmerksamkeit in diesem Zusammenhang ist hierbei Nass- oder Feuchträumen mit sichtbaren BSP-Deckenelementen zu schenken. Die genauen Aufbauten werden in Kapitel 4-12 behandelt. Die Abbildung 1.10 bis Abbildung 1.12 zeigen gängige Deckenkonstruktionen in Holz-Massivbauweise.

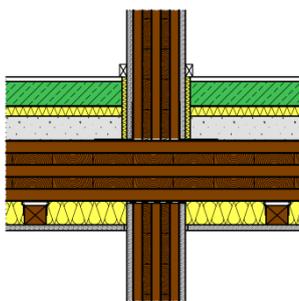


Abbildung 1.10: Decke (5)

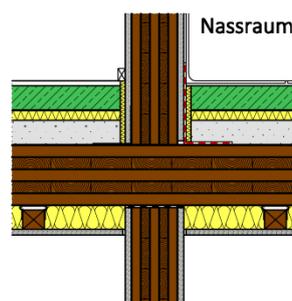


Abbildung 1.11: Decke Nassraum (5)

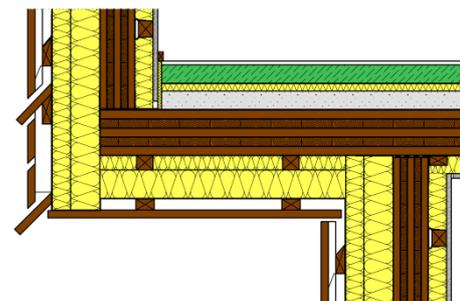


Abbildung 1.12: Deckenauskragung (5)

### 1-2.4 DACH

Grundsätzlich lassen sich Dächer in folgende zwei Gruppen einteilen:

- Schrägdächer
- Flachdächer

Bei Schrägdächern handelt es sich, wie der Name schon sagt, um Dächer mit geneigtem Dachaufbau oder geneigter Dachhaut. Schrägdächer werden in verschiedensten Varianten ausgeführt, jedoch lassen sich im Hinblick auf die Bauphysik zwei Kategorien unterscheiden:

- hinterlüftet
- nicht hinterlüftet (gedämmt)

Flachdächer sind Dächer die keine bzw. nur eine geringe Neigung aufweisen und dadurch viele nutzungsbedingte Vorteile mit sich bringen. Flachdächer können begehbar und/oder begrünt auch als Terrasse ausgeführt werden und bieten deswegen weitere Nutzungsmöglichkeiten. Ein weiterer Vorteil des Flachdaches ist die Nutzung der gesamten darunterliegenden Wohnfläche da hier eine Einschränkung durch geneigte Dachkonstruktionen entfällt. Außerdem besteht die Möglichkeit, durch entsprechende Dachelemente wie z.B. Lichtkuppeln die Räume unterhalb wesentlich attraktiver zu gestalten.

Aus bauphysikalischer Sicht lassen sich Flachdächer in den folgenden drei Kategorien unterscheiden.

- Kaldach
- Warmdach
- Umkehrdach

Das Kaldach unterscheidet sich vom Warmdach durch eine Luftschicht die es ermöglicht, eingedrungenes Wasser durch Luftzirkulation wieder abzuführen. Beim Warmdach wird die Konstruktion durch eine Abdichtungsebene und eine raumseitige Dampfsperre oder Dampfbremse vor einem Feuchtigkeitseintrag geschützt. Beim Umkehrdach liegt die Abdichtungsebene unterhalb der Dämmung; dadurch wird die Abdichtung vor den starken Belastungen wie Temperaturschwankungen, Regen und Schnee besser geschützt. Abbildung 1.13 und Abbildung 1.14 zeigen jeweils einen Flachdachaufbau als Warmdach und ein Schrägdach in Holz-Massivbauweise.

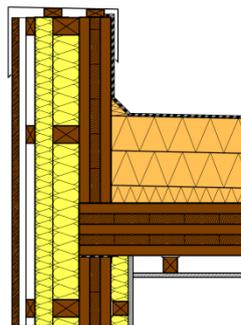


Abbildung 1.13: Warmdach (5)

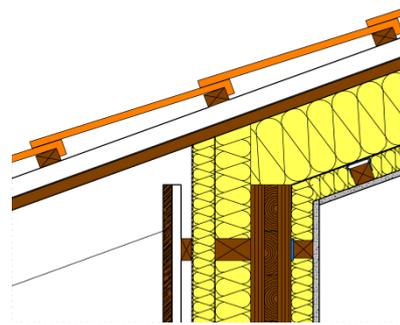


Abbildung 1.14: Schrägdach (5)

## 1-2.5 FENSTERANSCHLUSS

In Abbildung 1.15 ist ein typischer Fensteranschluss in Holz-Massivbauweise dargestellt. Hier liegt das Problem in der Überlagerung zweier Wärmebrücken. Einerseits stellt die Konstruktion Massivwand-Vollholzstiel eine Wärmebrücke dar, andererseits kommt es auch zu einem verstärkten Wärmestrom im Bereich des Fensteranschlages selbst. Des Weiteren können auch Einbauteile wie Rollkästen (siehe Abbildung 1.16) im Bereich von Fensteranschlüssen negative Einflüsse auf den Wärmeschutz haben.

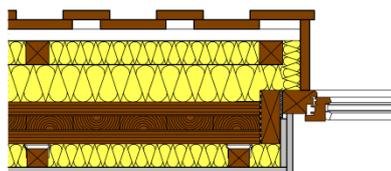


Abbildung 1.15: Fensteranschluss (5)

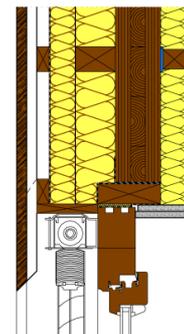


Abbildung 1.16: Fensteranschluss mit Rollo (5)



# KAPITEL 2: BAUPHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

## 2-1 WÄRMESCHUTZ

### 2-1.1 ALLGEMEIN

Der Wärmeschutz teilt sich in der Bauphysik in den sommerlichen und den winterlichen Wärmeschutz. Im Folgenden werden die Grundlagen des winterlichen Wärmeschutzes kurz erläutert. Sinn des Wärmeschutzes von Gebäuden ist es, Bauteile so zu konstruieren, dass die Energie- bzw. Wärmeverluste möglichst gering gehalten werden. Ein ausreichender Wärmeschutz dient nicht nur zur Verringerung der Emissionen und somit des Energieverbrauches, sondern auch der Behaglichkeit in der Nutzung. In Abbildung 2.1 ist die Beanspruchungen eines Bauteiles schematisch dargestellt.

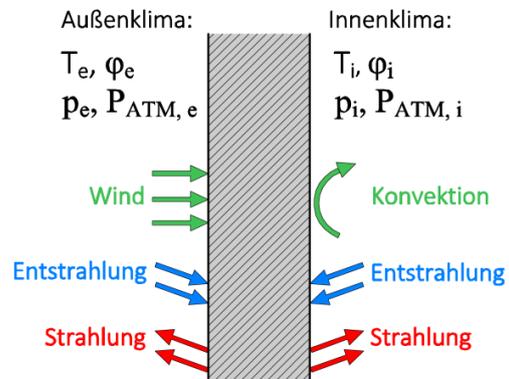


Abbildung 2.1: Bauteilbeanspruchung

### 2-1.2 TEMPERATUR (1)

Die Temperatur ist ein Maß für die Bewegungsenergie der Teilchen in festen, flüssigen und gasförmigen Körpern und tritt daher stets in Verbindung von Stoffen oder Stoffsystemen auf. Die Temperatur beschreibt also einen bestimmten Zustand eines Körpers und weist dabei keine „Richtung“ auf. Thermische Vorgänge können folglich nur bei Vorhandensein von Temperaturunterschieden stattfinden. Temperaturen werden im Allgemeinen in Grad Celsius [°C] oder in der SI-Einheit Kelvin [K] angegeben und unterscheiden sich nur durch die Festlegung des Nullpunktes. Der Nullpunkt der Grad Celsius-Temperaturskala liegt beim Schmelzpunkt des gefrorenen Wassers und die der Kelvin-Skala am absoluten Nullpunkt bei -273,16 °C. Die Einteilung der beiden Skalen ist ident und daher ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\theta = T - 273,16 \quad (1)$$

Es bedeuten:

$T$ .....Temperatur [°C]

$\theta$ .....Temperatur [K]

#### 2-1.2.1 Auswirkungen der Temperatur auf Stoffe (1)

Mit steigender Temperatur vergrößern feste, flüssige und auch gasförmige Stoffe ihr Volumen wobei zwischen Temperatur und Volumen nachstehender linearer Zusammenhang besteht.

$$V = V_K \cdot [1 + \alpha_t(T - T_K)] \quad (2)$$

Es bedeuten:

$V$ .....Volumen [m³]

$V_K$ .....Volumen des Körpers [m³]

$T_K$ .....Temperatur des Körpers [K]

$\alpha_t$ .....Ausdehnungskoeffizient [-]

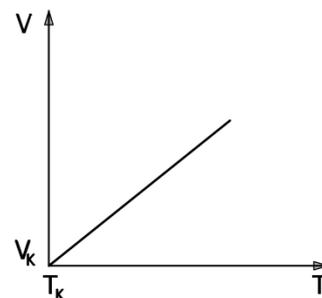


Abbildung 2.2: Verhältnis Temperatur und Volumen

Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt die für das Bauwesen wichtigsten

Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_t$ .

**Tab.: 1 Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_t$  (I)**

	$\alpha_t$	$\alpha_t$	E
Baustoff/Einheit	$10^{-6} K^{-1}$	mm/mK	N/mm <sup>2</sup>
Aluminium	23	0,023	72000
Stahl	12	0,012	210000
Beton	12	0,012	40000
Holz ( $\perp$ zur Faser)	3-9	0,003-0,009	4-10000
Glas	8	0,008	70000
Kunststoffe	35	0,035	400-7000

Die Volumenzunahme für beliebige Körper ergibt sich mit

$$\Delta V = V - V_k \tag{3}$$

und

$$\Delta T = T - T_k \tag{4}$$

zu

$$\Delta V = \alpha_t \cdot V_k \cdot \Delta T \tag{5}$$

Es bedeuten:

$\Delta V$  .....Volumenänderung [m<sup>3</sup>]

$\Delta T$  .....Temperaturänderung [K]

$\Delta l$  .....Längenänderung [m]

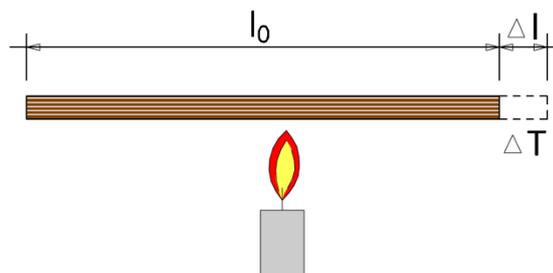
Durch Austauschen der Variablen  $V$  durch  $l$  lässt sich selbiger Zusammenhang auch für eine eindimensionalen Betrachtung wie folgt herstellen.

$$\Delta l = \alpha_t \cdot l_k \cdot \Delta T \tag{6}$$

Beispiel:

Wie groß ist Längenänderung eines 5 m langen Holzbalkens bei einem Temperaturunterschied von 10° C?

$$\Delta l = \alpha_t \cdot l_k \cdot \Delta T = 5,0 \cdot 10^{-6} \cdot 5,0 \cdot 10^3 \cdot 10 = 0,25 [mm]$$



**Abbildung 2.3: Längenänderung**

## 2-1.2.2 Temperaturbedingte Spannungen in festen Körpern (1)

Temperaturbedingte Formänderungen von festen Körpern sind im Allgemeinen relativ gering. Können sich diese Formänderungen allerdings nicht ungehindert einstellen, kann es zu großen Spannungen im inneren des Körpers kommen. Diese inneren Spannungen entsprechen jenen äußeren Spannungen die aufgebracht werden müssten, um den Körper wieder in seine ursprüngliche Form zu bringen. Solche Spannungen lassen sich mit Hilfe des Hook'schen Gesetzes berechnen.

Aus dem Zusammenhang

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (7)$$

folgt mit

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (8)$$

die Spannung bezogen auf die Längenänderung

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l_0} \quad (9)$$

Es bedeuten:

$E$ .....Elastizitätsmodul [N / m<sup>2</sup>]

$\sigma$ .....Spannung [N / m<sup>2</sup>]

$T_K$ .....Temperatur des Körpers [K]

$\alpha_t$ .....Ausdehnungskoeffizient [-]

$\varepsilon$ .....Dehnung [-]

Durch gleichsetzen von Gleichung (6) und Gleichung (9) erhält man die Spannung der Temperaturänderung.

$$\sigma = \alpha_t \cdot E \cdot \Delta T \quad (10)$$

Aus Gleichung (10) wird ersichtlich, dass die Spannung ausschließlich von den Materialkennwerten abhängt und unabhängig von der Geometrie ist. Das bedeutet dass sowohl in langen bzw. großen als auch in kurzen bzw. kleinen Materialstücken dieselben Spannungen auftreten.

Beispiel:

Ein beidseitig eingespannter Holzbalken wird um 20°C erwärmt. Durch die Einspannung wird dabei die Ausdehnung in Balkenachse behindert. Wie groß ist die im Querschnitt hervorgerufene Druckspannung infolge der Temperaturänderung.

$$E = 100000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\alpha_t = 5 \text{ [mm/mK]}$$

$$\sigma = \alpha_t \cdot E \cdot \Delta T = 0,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot 20 = 10 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

Bei einem Vollholzquerschnitt mit einer Festigkeitsklasse C24, einem Modifikationsbeiwert  $k_{mod} = 0,90$  und einem Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,30$  ergibt sich eine zulässige Druckspannung  $f_{c,0,d}$  von 14,5 [N/mm<sup>2</sup>]. Am Ergebnis ist ersichtlich, dass bei diesem Beispiel die Druckspannung bereits zu ca. 70% aufgebraucht ist.

Dieses Beispiel zeigt, dass Temperaturschwankungen, wie sie auch in unseren Breiten stattfinden, große Spannungen erzeugen wenn die Bewegungsmöglichkeit von Bauteilen eingeschränkt wird. Das temperaturbedingte Ausdehnen und Zusammenziehen von festen Körpern spielt im Bauwesen also eine wesentliche Rolle. Daher sollte stets auf eine ausreichende Bewegungsmöglichkeit geachtet werden, um Schäden an Konstruktionen zu vermeiden.

### 2-1.3 WÄRMEENERGIE UND SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄT (2)

Führt man einem Körper eine bestimmte Wärmemenge zu, so steigt dessen Temperatur im Verhältnis zur zugeführten Wärmemenge. Dieses Verhältnis wird als Proportionalitätsfaktor  $c$  bzw. spezifische Wärmekapazität bezeichnet und hat die Einheit [J/kgK]. Die spezifische Wärmekapazität gibt also jene Menge an, die notwendig ist, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen und ist wie folgt definiert.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (11)$$

Es bedeuten:

$Q$ .....Wärmemenge [1J = 1Ws = Nm]

$m$ .....Masse [kg]

$c$ .....spezifische Wärmekapazität [J / kgK]

$\Delta T$ .....Temperaturdifferenz [K]

Beispiel:

Wie lange benötigt ein elektrischer Heißwasserspeicher ( $c = 4,19 \text{ kJ/kgK}$ ) mit 20 Liter Inhalt, um das Wasser von  $10^\circ\text{C}$  auf  $60^\circ\text{C}$  Grad zu erhitzen. Die Heizleistung beträgt  $P = 1000\text{W}$  und der Wirkungsgrad  $90\%$  (inkl. aller Verluste).

Die Gleichung für die bereitgestellte Energie lautet:

$$W = \eta \cdot P \cdot t \quad (12)$$

Es bedeuten:

$W$ .....Energie [1J = 1Ws = Nm]

$\eta$ .....Wirkungsgrad [%]

$P$ .....Heizleistung [W]

$t$ .....Zeit [s]

Durch Gleichsetzen von Gleichung (11) und (12) erhält man:

$$m \cdot c \cdot \Delta T = \eta \cdot P \cdot t$$

Mit der Masse von Wasser  $m = 20 \text{ kg}$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T = 50 \text{ K}$  ergibt sich eine erforderliche Zeit von 1 Std. 15 min. und 54 Sek..

$$t = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\eta \cdot P} = \frac{20 \cdot 4190 \cdot 50}{0,92 \cdot 1000} = 4554 \text{ [s]}$$

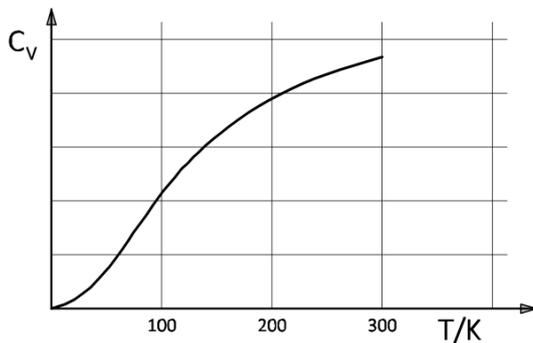


Abbildung 2.4: spez. Wärmekapazität in Abh. der Temp. (2)

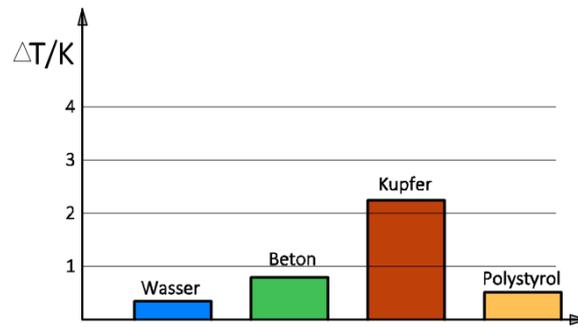


Abbildung 2.5: Temperatur verschiedener Stoffe (2)

In Abbildung 2.4 ist ein typischer Verlauf der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Die spezifische Wärmekapazität ist eine Materialkenngröße und muss experimentell bestimmt werden. Abbildung 2.5 zeigt, dass verschiedene Stoffe bei derselben zugeführten Wärmemenge von 1kWs und gleicher Masse von 1kg, verschiedene Temperaturen annehmen.

## 2-1.4 ENTHALPIE

Im Allgemeinen ist Enthalpie  $H$  die Summe aus innerer Energie  $U$  eines Körpers (Systems) und der Energie  $W$  (Arbeit) und ist gemäß nachstehender Gleichung definiert.

$$H = U + W \quad (13)$$

Es bedeuten:

$H$ .....Enthalpie [J]

$W$ .....Energie [J]

$U$ .....innere Energie [J]

Bei Vorgängen unter konstantem Druck, also isobaren Vorgängen, ist die Umwandlungswärme gleich der Änderung der Enthalpie. Im Bauwesen ist vor allem die Enthalpie der feuchten Luft von Interesse auf die noch im Kapitel 2-2 näher eingegangen wird.

## 2-1.5 WÄRMETRANSPORT (2)

Wärmetransportprozesse sind in der Regel sehr komplexe Vorgänge, da diese nicht visuell erfassbar sind und auch die mathematische Erfassung zur Beschreibung solcher Wärmetransporte sehr hohe Anforderungen stellt. Wärmeverluste in Bauteilkonstruktionen entstehen durch Transmission im Bauteilinneren und basieren im Wesentlichen auf den im Folgenden näher beschriebenen physikalischen Vorgängen.

### 2-1.5.1 Wärmeleitung (Konduktion)

Um die Konduktion beschreiben zu können, muss zunächst ein Zusammenhang zu mechanischen Transportvorgängen hergestellt werden, um diese dann adäquat zu erweitern. Man stelle sich dazu, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, zwei Flüssigkeitsreservoirs vor, welche eine Höhendifferenz von  $h_2 - h_1$  aufweisen. Im Reservoir 2 kann die gespeicherte potentielle Energie wie folgt beschrieben werden.

$$W_2 = m_2 \cdot g \cdot h_2 \quad (14)$$

Mit dem Potential der Masse  $m_2$ ,  $V_2 = g \cdot h_2$  gilt dann:

$$V_2 = g \cdot h_2 \quad (15)$$

Analog gilt dies auch für das Flüssigkeitsreservoir 1.

$$W_1 = m_1 \cdot g \cdot h_1 \quad (16)$$

$$V_1 = g \cdot h_1 \quad (17)$$

Es bedeuten:

$m$ .....Masse[kg]

$W$ .....potentielle Energie[J]

$V$ .....Potential der Masse[J]

$g$ .....Erdbeschleunigung [ $m / s^2$ ]

$h$ .....Höhe[m]

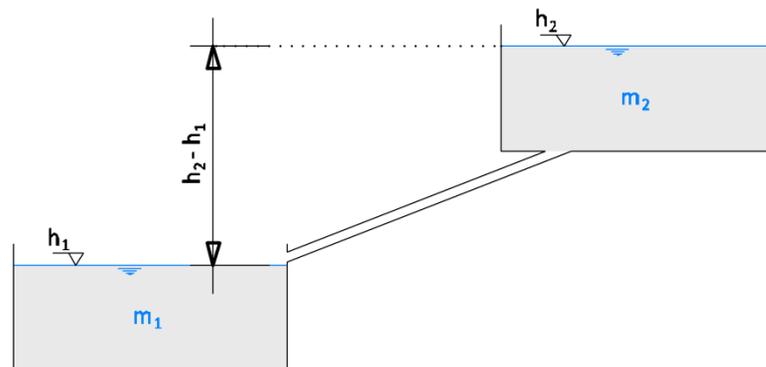


Abbildung 2.6: Flüssigkeitsreservoir 1 und 2

Wie in obiger Skizze dargestellt, sind die beiden Flüssigkeitsreservoirs durch ein Rohr miteinander verbunden. Aufgrund des Potentialunterschiedes  $V_2 - V_1$  beginnt ein Massestrom  $m'$  zu fließen. Der Massestrom ist gemäß Gleichung (18) definiert.

$$m' = \frac{V_2 - V_1}{R} \quad (18)$$

Da es in der Bauphysik vorteilhafter ist, den Druck anstatt des Potentials zu verwenden, kann man Gleichung (18) wie folgt umformulieren.

$$p = \rho \cdot g \cdot h = \rho \cdot V \quad (19)$$

$$m' = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot R} = \frac{P_2 - P_1}{R^*} \quad (20)$$

Es bedeuten:

$P$ .....Druck [Pa]

$\rho$ .....Dichte der Flüssigkeit [ $kg / m^3$ ]

$R$ .....Rohrleitungswiderstand [ $Ns / m^5$ ]

Im nächsten Schritt werden zwei große Wärmereservoirs mit den konstanten Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  betrachtet. Wie im vorhergehenden Beispiel werden wieder beide Reservoirs miteinander verbunden, jedoch besteht die Verbindung nun aus einem thermisch gut leitenden und in radialer Richtung isolierten Stab. Nun beginnt ein Wärmestrom von  $T_2$  nach  $T_1$  zu fließen, wenn man voraussetzt, dass  $T_2 > T_1$  ist. Analog zum mechanischen Beispiel gilt hier

$$Q' = \frac{T_2 - T_1}{R^*} \quad (21)$$

In  $R^* = R/A$  ist  $R$  der Wärmewiderstand, wenn  $A$  die Querschnittsfläche des Leiters darstellt. Der Widerstand  $R$  ist proportional zur Leiterlänge  $l$ .

$$R \sim l \quad (22)$$

Bezeichnet man nun die Wärmeleitfähigkeit mit  $\lambda$ , dann geht Gleichung (22) in

$$R = \frac{l}{\lambda} \text{ über.} \quad (23)$$

Ein Medium (Keramik) mit thermisch schlecht leitenden Eigenschaften ( $\lambda <$ ) hat demnach einen großen Widerstand und ein thermisch gut leitendes ( $\lambda >$ ) Medium (Stahl) einen geringen Widerstand. Der konduktive Wärmestrom kann nun wie folgt beschrieben werden.

$$Q' = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{l} \quad (24)$$

Es bedeuten:

- $Q'$  .....konduktiver Wärmestrom [W]
- $A$  .....Querschnittsfläche [ $m^2$ ]
- $T$  .....Temperatur [K]
- $\lambda$  .....Wärmeleitfähigkeit [W / mK]
- $l$  .....Leiterlänge [m]

Beispiel:

Eine Brettsperrholzwand mit einer Dicke  $d$  von 9 cm und einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,12$  [W/mK] trennt einen Raum vom Außenbereich. Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen innen und außen beträgt 30 K. Wie groß ist die Wärmestromdichte?

Für die Wärmestromdichte gilt:

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{d} = 0,12 \cdot \frac{30}{0,09} = 40 \text{ [W / } m^2 \text{]}$$

Bei der Wärmeleitung findet der Austausch also nicht zwischen zwei Medien statt, sondern innerhalb eines Festkörpers. Für die Übertragung wird ein Medium benötigt, welches sich in Ruhe befindet. Der Transport der Wärmeenergie findet hier durch molekulare Wechselwirkung statt, die durch eine Temperaturdifferenz im Medium verursacht wird. Für wärmeschutztechnische Untersuchungen stellt die Wärmeleitung wohl die wichtigste Art der Wärmeübertragung dar.

### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ (3)

Die Wärmeleitung eines Mediums ist nur von der Beschaffenheit des betrachteten Stoffes abhängig und somit eine spezifische Materialeigenschaft. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Temperaturfeld und Wärmestromdichte wird Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  genannt. In einem Temperaturfeld wird jedem Punkt im Raum eine Temperatur zugeordnet. Die Wärmestromdichte ist eine vektorielle Größe und ihr Integral über eine gegebene Fläche entspricht dem Wärmestrom durch diese Fläche. Die Wärmeleitfähigkeit gibt also an, welche Wärmemenge (J) pro Zeiteinheit (1s) durch die Flächeneinheit ( $1\text{m}^2$ ) mit einer Schichtdicke der Längeneinheit (1m) bei einer Temperaturdifferenz von 1K zwischen den normal zum Wärmestrom liegenden Oberfläche übertragen wird ( $\text{J/smK} = \text{W/mK}$ ). Abbildung 2.7 zeigt diesen Transportvorgang schematisch.

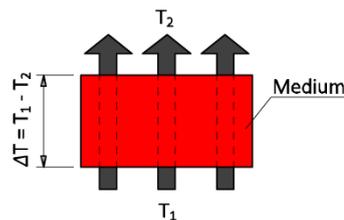


Abbildung 2.7: Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist also eine reine Baustoffkenngröße und von der Dichte, der Struktur und dem Feuchtigkeitsgehalt des Stoffes abhängig. In Abbildung 2.8 ist die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte für die im Bauwesen wichtige Baustoffe dargestellt.

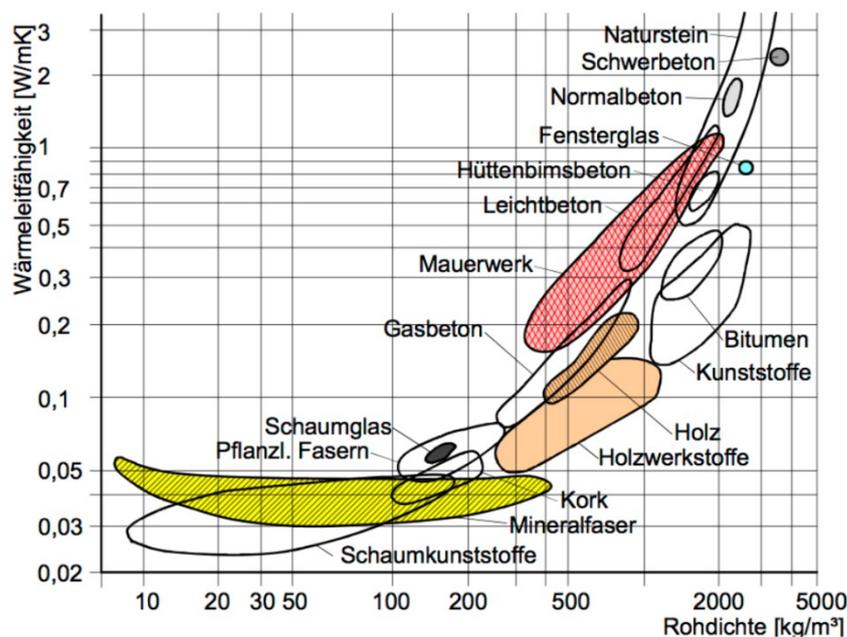


Abbildung 2.8: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte (10)

### Zunahme der Wärmeleitfähigkeit bei steigender Feuchte (12)

Messungen haben gezeigt, dass sich bei ein- und dreischichtigen Massivholzplatten aus Fichtenholz um 8 – 10 % tiefere Wärmeleitfähigkeitswerte in tangentialer Richtung als in radialer Richtungen einstellen. Auch ein Einfluss der Plattendicke auf die Wärmeleitfähigkeit konnte gemessen werden. Die in Mittellagen entstehenden Hohlraumanteile verursachen eine geringere Dichte und senken so die Wärmeleitfähigkeit.

### Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Holz

Die wichtigsten Einflussgrößen der Wärmeleitfähigkeit für Holz sind:

- Holzart
- Dichte
- Feuchtegehalt
- Richtung des Wärmeflusses (Anisotropie)
- Faserneigung
- Verhältnis zwischen Volumen bzw. Stärke der Probe und dem Feuchtegehalt

Die Rohdichte hat hier den größten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Die folgenden Gleichungen wurden von Kollmann (1951) in Niemz (1993) für Vollholz bestimmt.

In Faserrichtung:

$$\lambda_{\parallel} = 0,026 + 0,46 \cdot \rho \cdot 10^{-3} \quad (25)$$

Senkrecht zur Faserrichtung:

$$\lambda_{\perp} = 0,026 + 0,195 \cdot \rho \cdot 10^{-3} \quad (26)$$

Es bedeuten:

$\lambda_{\parallel}$ .....Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung [ $W / m^2 K$ ]

$\lambda_{\perp}$ .....Wärmeleitfähigkeit Senkrecht zur Faserrichtung [ $W / m^2 K$ ]

$\rho$ .....Rohdichte [ $kg / m^3$ ]

Aus diesen beiden Gleichungen wird ersichtlich, dass für Vollholz große Unterschiede zwischen den beiden Richtungen bestehen. Für Holzwerkstoffe ergeben sich nach Schneider und Engelhardt (1977) ebenso große Unterschiede in und senkrecht zur Plattenebene. Die Wärmeleitfähigkeit bei verleimten (Phenol- und Harnstoffharz) Spanplatten betrug in Plattenebene um das 1,9 – 2,4 fache mehr als quer zur Faserrichtung.

Um den Einfluss der Holzfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit beschreiben zu können, wurden von Kollmann (1951) in Niemz (1993) für Vollholz folgende Gleichung bestimmt:

$$\lambda_2 = \lambda_1 * [1 - 0,0125] * (u_1 - u_2) \quad (27)$$

Es bedeuten:

$\lambda_1$ .....Wärmeleitfähigkeit bei Holzfeuchte  $u_1$  [ $W / m^2 K$ ]

$\lambda_2$ .....Wärmeleitfähigkeit bei Holzfeuchte  $u_2$  [ $W / m^2 K$ ]

$u_1$ .....gemessene Holzfeuchte des Materials [ $kg / m^3$ ]

$u_2$ .....gemessene Holzfeuchte des Materials [ $kg / m^3$ ]

Infolge des erhöhten Feuchtigkeitsgehaltes ergibt sich durch den Mechanismus des Feuchtigkeitstransportes (bestehend aus Diffusion-, Kapillar- und Sorptionsvorgängen) auch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit (siehe Kapitel 2-2).

## 2-1.5.2 Konvektion (2)

Neben der Wärmeleitung gibt es auch noch andere Formen der Wärmeübertragung. Bei der Versorgung von Gebäuden durch Fernwärme, fließt ein Medium in einem Rohrsystem mit bestimmter Temperatur und transportiert somit Wärme. Durch Ableiten der Definitionsgleichung (11) nach der Zeit folgt der Wärmestrom.

$$Q' = m' \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = \rho \cdot c \cdot V' \cdot (T_2 - T_1) \quad (28)$$

Mit  $V = A \cdot x$  und  $x' = v$ , wobei  $A$  den Querschnitt und  $v$  die Fluidgeschwindigkeit darstellt, folgt:

$$Q' = \rho \cdot c \cdot v \cdot (T_2 - T_1) \cdot A \quad (29)$$

Dessen Dichte ist der Wärmestrom bezogen auf die Fläche  $A$  und ist demnach mit

$$q = \frac{Q}{A} = \rho \cdot c \cdot v \cdot (T_2 - T_1) \text{ gegeben.} \quad (30)$$

Beispiel:

Ein Gebäude wird über ein Rohrleitungssystem mit Wärme versorgt. Wie groß ist der Wärmestrom der vom Verbraucher abgenommen wird? Die Konvektionsgeschwindigkeit  $v$  soll 2 [m/s] betragen. Die Vorlauftemperatur  $T_2$  bzw. die Rücklauftemperatur  $T_1$  betragen 180°C bzw. 80°C. Die Rohdichte  $\rho$  von Wasser beträgt 1000 [kg/m<sup>3</sup>] und die spezifische Wärmekapazität  $c$  beträgt ungefähr 4187 [Ws/kgK]. Der Rohrdurchmesser beträgt innen 10 cm.

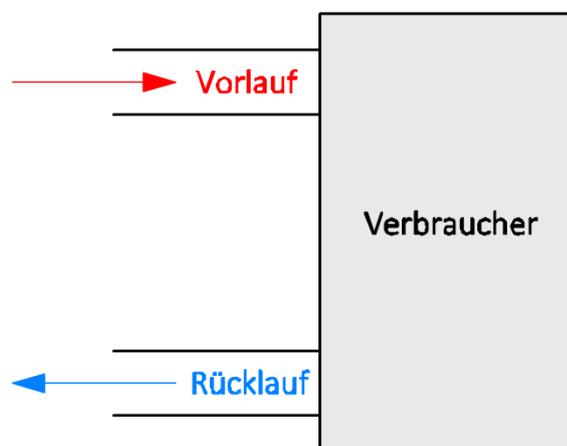


Abbildung 2.9: schematische Darstellung der Fernwärmeversorgung

$$\begin{aligned} Q' &= Q'_V - Q'_R \\ &= \rho \cdot c \cdot v \cdot (T_2 - T_1) \cdot A \\ &= 1000 \cdot 4187 \cdot 2 \cdot (180 - 80) \cdot 0,05^2 \cdot \pi \\ &= 6,6 [MW] \end{aligned}$$

Der Wärmestrom der vom Verbraucher aufgenommen wird, beträgt demnach 6,6 [MW].

Der Wärmetausch durch Konvektion ist also an ein Medium (Gase od. Flüssigkeiten) gebunden. Durch das Vorüberstreichen eines Mediums an einer Oberfläche entsteht in den Gas- oder Flüssigkeitsmolekülen Bewegungsenergie, welche auf die Atome der Oberfläche übertragen wird. Dies geschieht ausschließlich von „warm“ nach „kalt“. In der Bauphysik unterscheidet man die erzwungene und die freie Strömung. Die freie Strömung entsteht durch Dichteunterschiede infolge von Temperaturunterschieden während die erzwungene Strömung beispielsweise durch Wind oder Ventilatoren verursacht werden kann. Die konvektive Wärmeübertragung wird mit dem Wärmeübergangskoeffizienten  $h_k$  (W/m<sup>2</sup>k) beschrieben. Der Wärmeübergangskoeffizient ist hauptsächlich von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

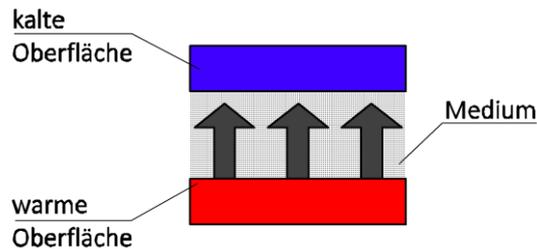


Abbildung 2.10: Konvektion (3)

### 2-1.5.3 Strahlung

#### Allgemein (5)

Strahlung ist eine Form der Energie, die durch elektromagnetische Wellen abgegeben wird. Unabhängig von den Umgebungsbedingungen emittiert jeder Körper Wärmestrahlung. Dies geschieht sowohl von warmen zu kalten Körpern, als auch umgekehrt. Dadurch entsteht ein Wärmetausch zwischen den Körpern, welcher an kein Medium gebunden und somit auch im Vakuum möglich ist. Die Wärmestrahlung ist abhängig von der Wellenlänge und der Oberflächenbeschaffenheit der Körper, da sich die Gesamtstrahlung aus der Summe von Absorption und Reflexion zusammensetzt.

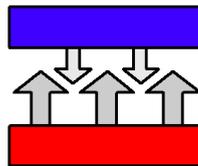


Abbildung 2.11: Strahlung (3)

Wärmestrahlen breiten sich, wie Licht, nur geradlinig aus und unterscheiden sich von Lichtstrahlen prinzipiell nicht. Der einzige Unterschied ist lediglich die Wellenlänge. Das elektromagnetische Spektrum, also die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen, umfasst neben der Wärmestrahlung und Licht auch Röntgenstrahlen, radioaktive Strahlen, Fernseh- und Radiowellen. Abbildung 2.12 zeigt eine schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle in Abhängigkeit der Intensität und des Ortes. Des Weiteren sind in Tabelle 2 einige Größenordnungen von Wellenlängen samt Bezeichnung zu finden.

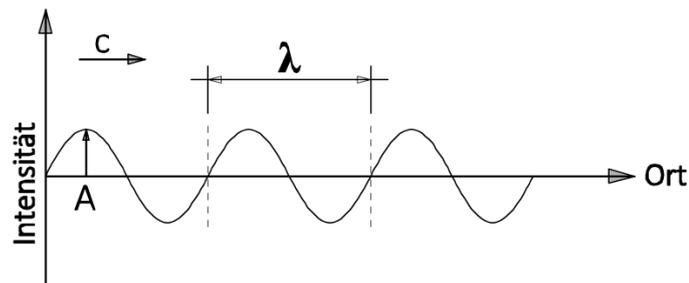


Abbildung 2.12: Wellenlänge

Es bedeuten:

$A$ .....Amplitude [m]

$c$ .....Ausbreitungsgeschwindigkeit [m / s]

$\lambda$ .....Wärmeleitfähigkeit [W / mK]

$f$ .....Frequenz [Hz] bzw. [s<sup>-1</sup>]

Tab.: 2 verschiedene Wellenlängen und zugehörige Anwendungen (5)

Wellenlänge $\lambda$	Bezeichnung	Anwendung
1 m	Radiowelle	UKW - Sender
0,01 mm	Wärmestrahlung	Infrartheizung
300 nm	UV - Strahlung	Höhensonne
500 nm	Grünes Licht	Verkehrssampel
1 nm	Röntgenstrahlen	Schirmbild
1 pm	Gammastrahlen	Krebstherapie

Die Gemeinsamkeit elektromagnetischer Wellen spiegelt sich auch in ihrer gleichen Ausbreitungsgeschwindigkeit wider. Diese beträgt im Vakuum:

$$c_0 = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ [m / s]}$$

### Farbe (12)

Da es sich bei dem Begriff Farbe um eine individuelle visuelle Wahrnehmung handelt, ist dieser Begriff nicht streng definiert. Allerdings besteht trotzdem ein qualitativer Zusammenhang zwischen den Wellenlängen-Bereichen und der Farbempfindung. In Tabelle 3 sind die sieben Grundfarben und ihre zugehörigen Wellenlängen-Bereiche aufgelistet.

Tab.: 3 Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge (5)

Farbe	Bezeichnung
Violett	380 - 430
Indigo	430 - 450
Blau	450 - 485
Grün	485 - 555
Gelb	555 - 600
Gelbrot	600 - 640
Rot	640 - 750

Abschließend ist in Abbildung 2.13 noch eine detailliertere Übersicht der elektromagnetischen Wellen mit dem sichtbaren Spektrum dargestellt.

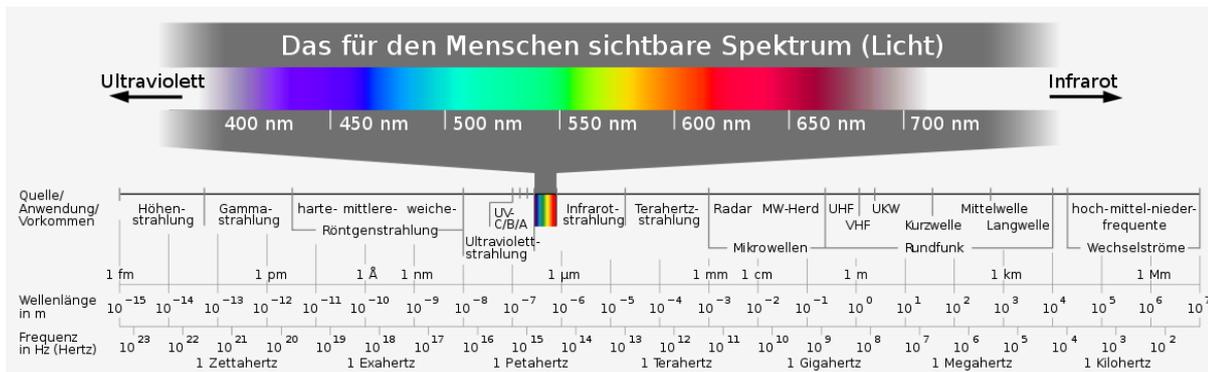


Abbildung 2.13: Übersicht (13)

### Das Gesetz von Stefan-Boltzman (8)

Wie eingangs erwähnt strahlt jeder Körper aufgrund seiner absoluten Temperatur Wärme ab. Stefan und Boltzmann fanden, dass der emittierte Strahlungsstrom, der von einem „schwarzen Körper“ ausgeht, durch

$$Q' = A \cdot \sigma \cdot T \quad (31)$$

gegeben ist.

Es bedeuten:

$Q'$  .....abgestrahlte Leistung [W]

$A$  .....Fläche [ $m^2$ ]

$\sigma$  .....Stefan – Boltzmann – Konstante [ $W / m^2 K^4$ ]

$T$  .....Temperatur der Fläche  $A$  [K]

Ein schwarzer Körper ist so definiert, dass er die gesamte auf ihn treffende Strahlung vollkommen absorbiert. Da in der Realität die meisten Körper keine schwarzen Körper darstellen, ist dieser Begriff eher als ein idealer zu verstehen. Für Körper, die dieser Definition nicht entsprechen, hat man den Begriff des grauen Körpers eingeführt. Naturgemäß emittiert ein solcher Körper bei gleicher Temperatur einen kleineren Wärmestrom. Anstatt der Gleichung (31) wird dann Gleichung (32) verwendet.

$$Q' = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (32)$$

Es bedeutet:

$\varepsilon$ .....Emissionsverhältnis [-]

Das Emissionsverhältnis  $\varepsilon$  wird experimentell bestimmt und kann Werte zwischen  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  annehmen. Ein idealer schwarzer Körper hat einen Wert von  $\varepsilon=1$  und würde somit die größtmögliche Strahlung abgeben. Bei Betrachtung der Gleichungen (31) und (32) erkennt man dass die Temperatur mit der vierten Ordnung in den Strahlungsstrom einfließt. Die Leistung die pro Flächeneinheit abgestrahlt wird (Wärmestromdichte bzw. Intensität), ist also der vierten Potenz der Temperatur proportional.

$$I = q' = \frac{Q'}{A} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (33)$$

Es bedeuten:

$I$ .....Intensität [ $W / m^2$ ]

$q'$ .....Wärmestromdichte [ $W / m^2$ ]

Die nachstehende Tabelle 4 gibt für einige Oberflächen die Emissionszahl  $\varepsilon$  an. Man erkennt, dass blanke Metalle kleine und Nichtmetalle große  $\varepsilon$ -Werte aufweisen.

**Tab.: 4 Emissionsvermögen (5)**

Beispiel:

Eine herkömmliche Ziegelwand liegt im absoluten Temperaturbereich von ungefähr  $T=300K$  und weist einen Emissionsgrad von etwa 0,9 auf. Wie groß ist der Wärmestrom den die Ziegelwand abgibt?

Mit der Stefan-Boltzmann-Konstante von  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$  und einer Wandfläche von  $A = 1 [m^2]$  ergibt sich mit Gleichung (32) folgender Wärmestrom:

$$Q' = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = 1 \cdot 0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^4 = 413,43 [W]$$

Würde die Erde nun selbst 400 [W] pro Quadratmeter abstrahlen, müsste sie eigentlich mit der Zeit abkühlen. Da der Erde jedoch von der Sonne Strahlungsenergie zugeführt wird geschieht dies nicht und es kommt zu einem Gleichgewicht.

Oberfläche	$\varepsilon$
Kupfer poliert	0,03
Aluminium, walzblank	0,04
Aluminium, eloxiert	0,92
Eisen, geschmiegelt	0,24
Eisen, verrostet	0,85
Heizkörperlack	0,92
schwarzer Lack, matt	0,97
Holz	0,94
Eis, Schnee	0,97
Ziegel	0,93
Wasser	0,895

### Das Planck'sche Strahlungsgesetz (5)

Da die abgestrahlte Leistung neben der Wellenlänge auch stark von der Temperatur abhängt, ist die Verteilung auf unterschiedliche Wellenlängen nicht gleichmäßig. Die Verteilungsfunktion für schwarze Körper ( $\epsilon=1$ ) wurde von Planck entwickelt und ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Auf die Herleitung dieser Verteilungsfunktionen wird in diesem Kapitel verzichtet.

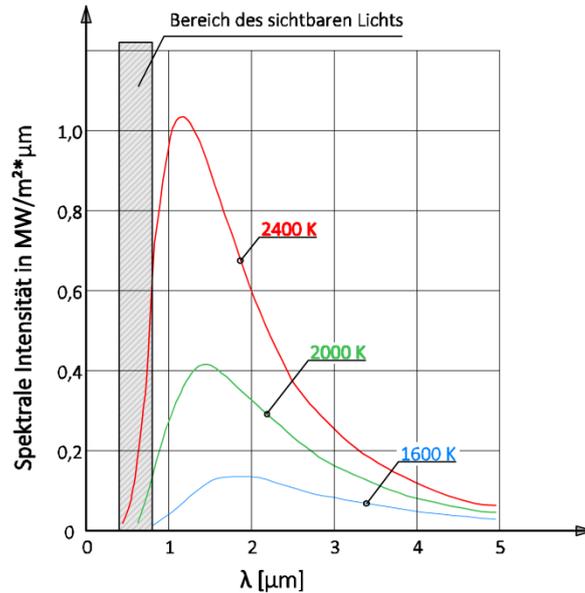


Abbildung 2.14: Energieverteilung der schwarzen Strahlung

### Das Gesetz von Wien (12)

Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich das Maximum der Strahlungsintensität gegen kürzere Wellenlängen. Das bedeutet, dass mit steigender Temperatur die Wellenlänge abnimmt, bei welcher das Intensitätsmaximum gilt. Das Wien'sche Verschiebungsgesetz lautet also:

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{konstant} = 0,02898 \text{ [mK]} \quad (34)$$

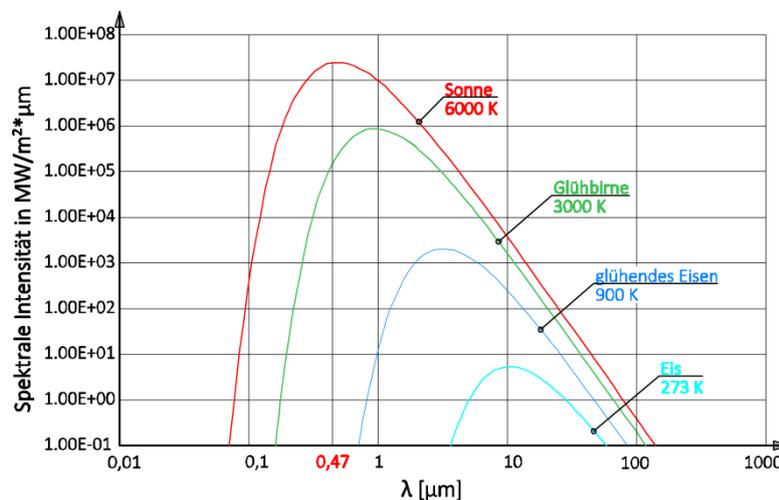


Abbildung 2.15: Wien'sches Verschiebungsgesetz (Wien)

Beispiel:

Mit Gleichung (34) ist es nun möglich die Oberflächentemperatur eines strahlenden Körpers zu ermitteln, ausgehend von der Wellenlänge des Intensitätsmaximums. Das Maximum der Intensität der Sonne liegt bei 0,47 [µm] (siehe Abbildung 2.15).

Aus Gleichung (34) folgt damit die Oberflächentemperatur zu:

$$T = \frac{2880}{\lambda_{max}} = \frac{2880}{0,47} = 6130 [K]$$

### Das Gesetz von Kirchhoff (5)

Das Gesetz von Kirchhoff besagt, dass ein Körper umso mehr Wärme abstrahlt, je mehr Wärmestrahlung dieser absorbieren kann. Folglich absorbieren dunkle bzw. schwarze Körper die Strahlung stärker als helle. Im Bauwesen kann man als Beispiel Flachdächer mit außenliegender Bitumenabdichtung nennen, welche auch bei niedrigen Lufttemperaturen sehr stark erwärmt werden. Im Gegensatz dazu können dem klaren Nachthimmel zugewandte Oberflächen unter die umgebende Lufttemperatur fallen und so zur Vereisung führen (z.B. Straßen).

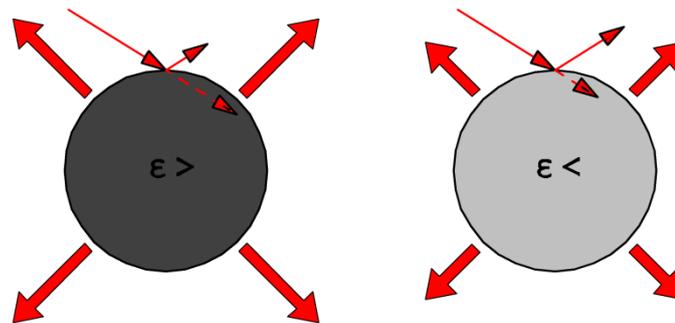


Abbildung 2.16: schematische Darstellung der Strahlungsstärke verschieden dunkler Körper

### Abstandsgesetz (12)

Das Abstandsgesetz beschreibt die Abnahme der Strahlungsintensität  $q'$  bzw.  $I$  in Abhängigkeit der Entfernung von der Quelle. Die Strahlungsintensität nimmt dabei quadratisch mit dem Abstand ab. Ursache dafür ist die Energieerhaltung, denn die Energie die von einer strahlenden Quelle ausgeht, verteilt sich im Raum wie auf einer Kugeloberfläche welche proportional mit dem Quadrat des Abstandes  $r$  zunimmt. Zuzufolge dessen nimmt die Strahlungsintensität  $I (Q/A)$  mit  $1/r^2$  ab (siehe Abbildung 2.17).

Das  $1/r^2$  - Gesetz lautet:

$$I \sim \frac{1}{r^2} \quad (35)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (36)$$

$$I_2 = I_1 \cdot \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad (37)$$

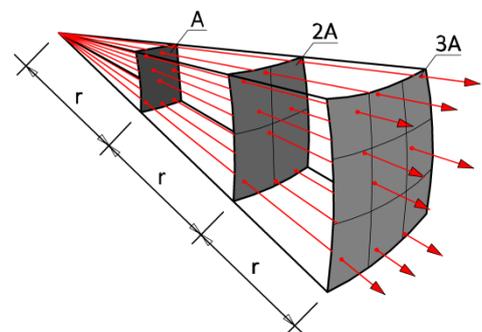


Abbildung 2.17: Abstandsregel

## 2-1.6 WÄRMETECHNISCHE KENNGRÖßEN (14)

### 2-1.6.1 Allgemein

Die in Kapitel 2-1.5 behandelten Transportmechanismen lassen sich für die praktische Anwendung in der Bauphysik in leicht handhabbare Kenngrößen zusammenfassen. In den folgenden Kapiteln wird näher auf folgende Kenngrößen eingegangen:

- Wärmeübergangswiderstand
- Wärmedurchlasswiderstand
- Wärmedurchgangswiderstand
- Wärmedurchgangskoeffizient

Der Widerstand von der Raumluft an eine raumseitige Bauteiloberfläche wird durch den Wärmeübergangswiderstand beschrieben. Der Wärmedurchlasswiderstand drückt den Widerstand der Bauteilkonstruktion selbst aus, also von der Innenoberfläche bis zur Außenoberfläche. Der gesamte Widerstand wird durch den Wärmedurchgangswiderstand beschrieben. Bildet man den Reziprokwert des Wärmedurchgangswiderstandes erhält man den Wärmedurchgangskoeffizienten.

### 2-1.6.2 Wärmeübergangswiderstand (15)

Zwischen Luft und Bauteiloberfläche muss stets ein Temperaturunterschied herrschen damit ein Wärmefluss erfolgen kann. Diese Temperaturdifferenz ist neben der Wärmeleitung auch von der Konvektions- und Strahlungsvorgängen abhängig, weil Luft an einer Grenzschicht immer leicht in Bewegung ist. Da der Übergang zwischen Grenzschichten sehr komplex ist, fasst man die Transportvorgänge zu einem Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten  $h_{ges}$  zusammen.

$$h_{ges} = h_c + h_r \quad [W / m^2K] \quad (38)$$

Bildet man nun den Kehrwert von  $h_{ges}$ , erhält man den Wärmeübergangswiderstand  $R_s$ , wobei  $R$  für „Resistance“ und der Index  $s$  für „Surface“ stehen.

$$R_s = \frac{1}{h_{ges}} \quad [m^2K / W] \quad (39)$$

Da ein Außenbauteil immer von zwei Seiten mit unterschiedlichen Verhältnissen umgeben ist, wird der Wärmeübergangswiderstand und damit die Kennzeichnung  $R_s$  um den inneren  $R_{Si}$  und den äußeren Wärmeübergangswiderstand  $R_{Se}$  erweitert. In Tabelle sind die Werte der Wärmeübergangskoeffizienten laut Norm ÖNORM B 8110-2:2003 in Abhängigkeit der Richtung des Wärmestromes angegeben.

Tab.: 5 Wärmeübergangswerte (8)

$R_{Se}$ und $R_{Si}$	Richtung des Wärmestromes		
	horizontal	aufwärts	abwärts
$R_{Si}$ [m <sup>2</sup> K/W] ( $h_i$ [W/m <sup>2</sup> K])	0,13 (7,69)	0,10 (10,0)	0,17 (5,88)
$R_{Se}$ [m <sup>2</sup> K/W] ( $h_e$ [W/m <sup>2</sup> K])	0,04 (25,0)	0,04 (25,0)	0,04 (25,0)

Es bedeuten:

- $h_{ges}$ .....gesamter Wärmeübergangskoeffizient [ $W / m^2 K$ ]
- $h_c$ .....konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [ $W / m^2 K$ ]
- $h_r$ .....Strahlungsübergangskoeffizient [ $W / m^2 K$ ]
- $R_s$ .....Wärmeübergangswiderstand [ $m^2 K / W$ ]
- $R_{Si}$ .....Wärmeübergangswiderstand innen [ $m^2 K / W$ ]
- $R_{Se}$ .....Wärmeübergangswiderstand außen [ $m^2 K / W$ ]

### 2-1.6.3 Wärmedurchlasswiderstand (15)

Für eine homogene Bauteilschicht ergibt sich der Wärmedurchlasswiderstand  $R$  durch den Quotient aus der Bauteilschichtdicke  $d$  und der zugehörigen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ .

$$R = \frac{d}{\lambda} [m^2 K / W] \quad (40)$$

Es bedeuten:

- $d$ .....Schichtdicke [ $m$ ]
- $\lambda$ .....Wärmeleitfähigkeit [ $W / mK$ ]
- $R$ .....Wärmedurchlasswiderstand [ $W / mK$ ]

Im Bauwesen, speziell im Hochbau, besteht ein Bauteil nur selten aus einer Schicht. Bei der Ermittlung des Wärmedurchlasswiderstandes des gesamten Bauteiles muss daher die Summe aller einzelnen Widerstände gebildet werden.

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} [m^2 K / W] \quad (41)$$

### 2-1.6.4 Wärmedurchgangswiderstand (14)

Der Wärmedurchgangswiderstand ergibt sich aus der Summe aller Wärmedurchlasswiderstände und der Wärmeübergangswiderstände.

$$R = R_{Si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{Se} [m^2 K / W] \quad (42)$$

### 2-1.6.5 Wärmeübergangskoeffizient (14)

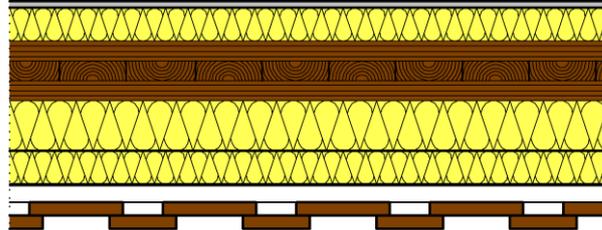
Der Wärmeübergangskoeffizient, in der Praxis oft als U-Wert bezeichnet, gilt nur für homogene Schichtaufbauten. Ein homogener Schichtaufbau liegt vor, wenn in der Ebene quer zur Richtung des Wärmestromes dasselbe Material vorhanden ist. Das bedeutet, dass keine Störungen, z.B. durch metallische Befestigungselemente oder Polsterhölzer in der Dämmebene, vorhanden sein dürfen. Für solche Aufbauten kann der U-Wert wie folgt ermittelt werden:

$$U = \frac{1}{R_{Si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{Se}} \quad (43)$$

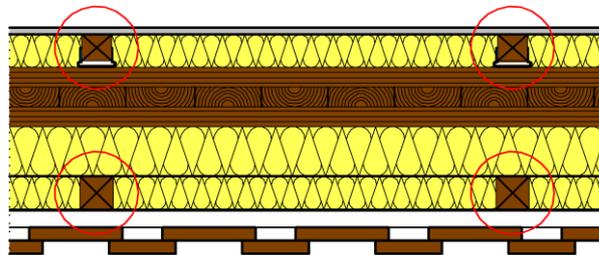
Es bedeutet:

- $U$ .....Wärmedurchgangskoeffizient [ $W / m^2 K$ ]

Abbildung 2.18 und Abbildung 2.19 zeigen exemplarisch den Unterschied zwischen einer homogenen und einer inhomogenen Bauteilschicht mit Störungen durch Polsterhölzer und metallische Befestigungen, welche durch die roten Kreise markiert sind.



*Abbildung 2.18: homogene Bauteilschicht (Wandaufbau im Grundriss)*



*Abbildung 2.19: inhomogene Bauteilschicht (Wandaufbau im Grundriss)*

## 2-1.7 WÄRMEBRÜCKEN (14)

Für einen optimalen Wärmeschutz bedarf es nicht nur einer ausreichenden Dämmung von Bauteilen, sondern auch deren Anschlüsse an andere Bauteile müssen aus bauphysikalischer Sicht gut überlegt sein. Denn hier besteht die Gefahr von Wärmeverlusten und niedrigen Temperaturen an den raumseitigen Bauteiloberflächen. Es sei noch darauf hingewiesen, dass sich Wärmebrücken umso stärker auswirken, je mehr das betreffende Bauteil gedämmt ist.

Wärmebrücken sind dadurch definiert, dass sie eine Änderung des Wärmestromes und der Oberflächentemperatur in und an Bauteilkonstruktionen zur Folge haben. Das bedeutet, dass an diesen Stellen die Wärmestromlinien (Isotherme) weder parallel noch orthogonal zur Bauteilschicht verlaufen, sondern Knicke und Sprünge aufweisen.

### 2-1.7.1 Begriffsbestimmungen

Grundsätzlich lassen sich drei verschiedene Arten von Wärmebrücken unterscheiden.

- materialbedingte Wärmebrücken
- geometriebedingte Wärmebrücken
- umgebungsbedingte Wärmebrücken

### Materialbedingte Wärmebrücken

Diese entstehen aufgrund der statischen Durchbildung eines Gebäudes und der damit verbundenen Trennung von raumbildenden und tragenden Bauteile. Materialbedingte Wärmebrücken sind anders ausgedrückt, Durchdringungen und Inhomogenitäten von und in Bauteilkonstruktionen. Die folgende Abbildung 2.20 zeigt eine klassische Wärmebrücke im Hochbau, wobei die roten Pfeile einen erhöhten Wärmestrom darstellen.

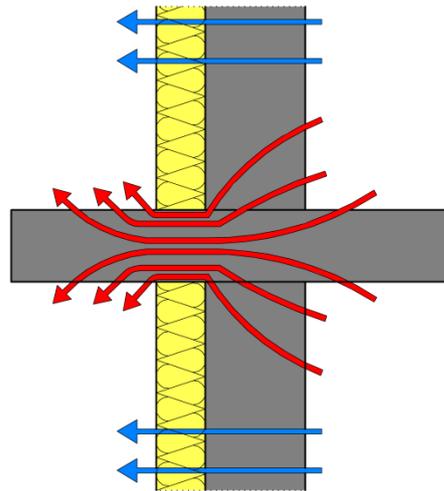


Abbildung 2.20: materialbedingte Wärmebrücke

### Geometriebedingte Wärmebrücken

Geometrisch bedingte Wärmebrücken sind beim Entwerfen und Durchbilden von Gebäuden bzw. Bauteilen unvermeidbar. Sie sind durch eine warme innere Oberfläche gekennzeichnet, der eine ungleich große, „kalte“ Oberfläche gegenüber steht (Verhältnis der äußeren Abkühlfläche zur inneren Erwärmungsfläche, z.B. Außenecke siehe Abbildung 2.21). Das bedeutet, dass der kleineren Fläche mehr Wärme entzogen wird und es dadurch zu einem erhöhten Wärmestrom kommt. Die Folge ist eine Absenkung der Oberflächentemperatur, was wiederum zur Bildung von Oberflächenkondensat führen kann.

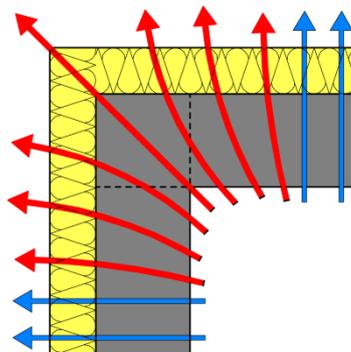


Abbildung 2.21 geometriebedingte Wärmebrücke

### Umgebungsbedingte Wärmebrücken

Durch die Behinderung der Konvektion (z. B. durch abgehängte Decken, Möbel oder Vorhänge) an Oberflächen erhöht sich der Wärmeübergangswiderstand. Daraus resultieren eine niedrigere Oberflächentemperatur und die Gefahr der Bildung von Oberflächenkondensat.

Nach (9) werden folgende Wärmeübergangswiderstände vorgeschlagen:

- Einbauschränke:  $R_{Si} = 1,00 [(m^2K)/W]$
- freistehende Schränke:  $R_{Si} = 1,00 [(m^2K)/W]$
- Gardinen:  $R_{Si} = 1,00 [(m^2K)/W]$

Naturgemäß ist auch eine Kombination der drei angeführten Wärmebrücken möglich und in der Praxis oft auch der Fall. Wärmebrücken können relativ einfach mittels Infrarot-Thermografie qualitativ ermittelt werden. Aus den Thermografieaufnahmen lassen sich rasch Bereiche erhöhten Wärmestroms erkennen. Die quantitative Bestimmung der Wirkung von Wärmebrücken kann entweder mittels Wärmebrückenkataloge oder durch geeignete Softwareapplikationen erfolgen.

### Wärmeverluste

Wärmebrücken verursachen zusätzliche Transmissionswärmeverluste, welche mit dem Wärmebrückenverlustkoeffizienten gekennzeichnet werden. Bei Wärmebrückenverlusten wird zwischen linienförmigen und punktförmigen Wärmebrücken unterschieden, wobei erstere pro Laufmeter und der Einflusslänge  $l$  mit  $\psi$  in der Einheit  $W/(m \cdot K)$  angegeben werden. Punktförmige Wärmebrücken werden dagegen mit  $\chi$  mit der Einheit  $W/K$  beschrieben.

Der  $\psi$ -Wert gibt einen zusätzlichen Wärmeverlust im Bereich einer Wärmebrücke (z. B. Bauteilanschluss oder Außenecke) an. Dieser zusätzliche Wärmeverlust kann aus der Differenz des tatsächlichen Wärmestroms  $\phi$ , bezogen auf die Temperaturdifferenz  $\Delta\theta$ , und der eindimensionalen Bilanzierung mit nachstehender Gleichung berechnet werden.

$$\Delta H = \frac{\Phi}{\Delta\theta} - U \cdot A [W / K] \quad (44)$$

Mit  $A = a \cdot b$  und  $b = 1$  bei  $\Delta\theta = 1 K$  ergibt sich:

$$\psi = \frac{H}{a} - U \cdot a [W / mK] \quad (45)$$

Es bedeuten:

$H$ .....temperaturspezifischer Wärmeverlust  $[W / K]$

$\Phi$ .....Wärmestrom  $[W]$

$\psi$ .....längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient  $[W / mK]$

$U$ .....Wärmedurchgangskoeffizient der betrachteten Fläche  $a \cdot b [W / mK]$

In EN ISO 10211:2007 (D) wird der Term  $\frac{H}{a}$  auch als  $L_{2d}$  bezeichnet. In allgemeiner Form wird dort der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient wie folgt beschrieben.

$$\psi = L_{2d} - \sum U_i \cdot l_i [W / mK] \quad (46)$$

Es bedeuten:

$L_{2d}$ .....thermischer Leitwert  $[W / K]$

$l_i$ .....Länge für die  $U_i$  gültig ist  $[m]$

Da sich das Thema dieser Masterarbeit auf zweidimensionale Berechnungen beschränkt wird an dieser Stelle nicht weiter auf den punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für dreidimensionale Berechnungen eingegangen.

Zusammenfassend ergeben sich aus Wärmebrücken folgende negative Auswirkungen:

- erhöhter Energieverbrauch (erhöhter Wärmefluss)
- Störung der Behaglichkeit (geringere Oberflächentemperatur)
- unzureichende Hygiene (Schimmelpilzbildung)
- Schädigung der Bausubstanz (längere Durchfeuchtung der Baustoffe)

Ebenso lassen sich vier Grundregeln zur Vermeidung von Wärmebrücken zusammenfassen:

- 1.) **Vermeidungsregel:** Vermeidung des Durchbrechens der Dämmhülle
- 2.) **Durchstoßregel:** Ist eine unterbrochene Dämmschicht nicht zu vermeiden, sollte der Wärmedurchgangswiderstand an dieser Stelle möglichst hoch sein
- 3.) **Anschlussregel:** An Bauteilanschlüssen sollten die Dämmschichten stets überlappen
- 4.) **Geometrieregeln:** Kanten und Ecken sollten in einem möglichst flachen Winkel ausgeführt werden

### Erforderlicher Wärmeschutz

Für ebenflächige Bauteile (ohne Wärmebrücken) kann man nun aus dem zuvor ermittelten mindesterforderlichen Bemessungs-Temperaturfaktor  $f_{Rsi,min}$  (siehe Kapitel 2-2.4.1) die mindesterforderliche innere Oberflächentemperatur  $\theta_{si,min}$  ermitteln. Der daraus höchstzulässige Wärmedurchgangskoeffizient  $U_{max}$  und der mindesterforderliche Wärmedurchlasswiderstand  $R_{min}$  wird wie folgt errechnet.

$$U_{max} = \frac{\theta_i - \theta_{si,min}}{R_{Si} \cdot (\theta_i - \theta_e)} \quad [W / m^2 K] \quad (47)$$

$$R_{min} = \frac{1}{U_{max}} - (R_{Si} + R_{Se}) \quad [m^2 / WK] \quad (48)$$

Es bedeuten:

$U_{max}$  .....maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient  $[W / m^2 K]$

$R_{min}$  .....mindesterforderlicher Wärmedurchlasswiderstand  $[m^2 K / W]$

### Negative $\psi$ -Werte

Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten können auch negative Werte annehmen. Grund dafür sind geometrische Bedingungen und die konstruktive Ausbildung von Bauteilanschlüssen.

Durch die geometrischen Verhältnisse (z.B. Außenecke) kommt es zu einer geringeren Wärmestromdichte im Eckbereich. Die Begründung für negative  $\psi$  liegt nun im gewählten Außenmaßbezug für die Bilanzierung, die aus Gründen der Vereinfachung die außenmaßbezogene thermische Hüllfläche  $A_{Aw}$  zu „großzügig“ beschreibt (siehe Abbildung 2.22).

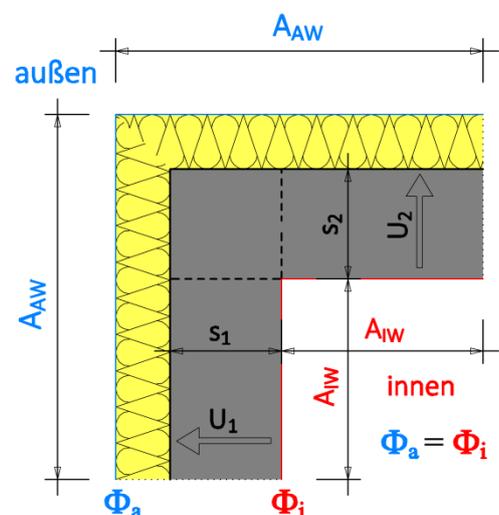


Abbildung 2.22: negative  $\psi$ -Werte (Außenecke)

Bei der Berechnung der außenmaßbezogenen  $\psi$ -Werte wird dieser Fehler allerdings korrigiert. Zu negativen  $\psi$ -Werte kommt es also immer dann, wenn der Geometrieinfluss größer ist als der materielle bzw. konstruktive.

Häufig wurden in älteren Publikationen innenmaßbezogene  $\Psi$ -Werte verwendet. Für das Beispiel der Außenecke kann mit folgender Gleichung zwischen Außenmaß- und Innenmaßbezogenem  $\Psi$  -Wert umgerechnet werden. Innenmaßbezogene  $\Psi$  -Werte sind im Allgemeinen positiv, außenmaßbezogene können jedoch negativ werden.

$$\psi_e = \psi_i - U_{AW,1} \cdot s_2 - U_{AW,2} \cdot s_1 \quad (49)$$

Der zweite Grund für negative  $\psi$ -Werte sind „Überkompensationen“ von thermischen Schwachstellen. Ein klassisches Beispiel hierfür wäre eine Überdämmung von Fensterblendrahmen (siehe Abbildung 2.23). Aus konstruktiven Gründen könnte es hier sinnvoll sein, die Dämmung stärker auszuführen, als es energetisch nötig wäre. Jedoch sollte, aus optischen Gründen, ein Kompromiss zwischen erforderlicher Dämmung und sichtbarer Blendrahmenbreite angestrebt werden.

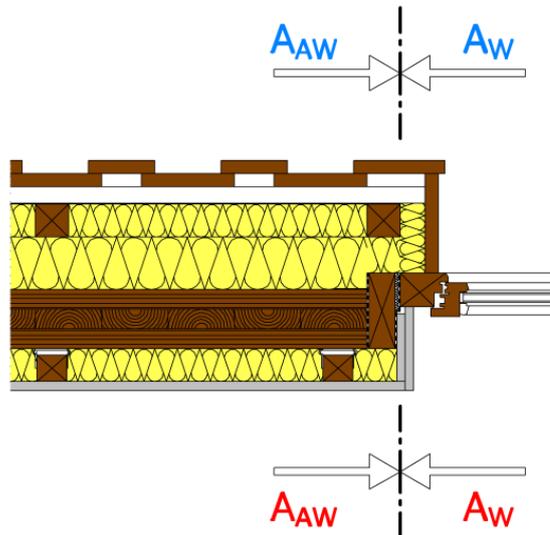


Abbildung 2.23 negative  $\psi$ -Werte (Fensteranschluss)

## 2-2 FEUCHTESCHUTZ

---

### 2-2.1 ALLGEMEIN (7)

Primäres Ziel des Feuchteschutzes ist es, bauliche Anlagen so zu errichten und in Stand zu halten, dass weder Leben noch Gesundheit des Menschen gefährdet werden. Ein weiteres Ziel ist es, unzumutbare Belästigungen wie Kondenswasser, zu hohe Luftfeuchtigkeit in Räumen oder Schimmelpilzbildung durch entsprechende bauliche Maßnahmen zu verhindern. Durch den Feuchteschutz soll also die Bildung von schädlichem Kondenswasser an Bauteiloberflächen und im Inneren von Bauteilkonstruktionen unterbunden werden. Schädliches Kondenswasser liegt vor, wenn

- *der vorgeschriebene Mindestwärmeschutz durch die Feuchtigkeitszunahme nicht mehr dauerhaft gewährleistet ist*
- *die Gefahr von Pilzbildung besteht (insbesondere bei ungeschützten organischen Baustoffen) und*
- *das Wasser durch die Baustoffe nicht gespeichert werden kann, sondern in Tropfen auftritt.*

Abgesehen von den oben angeführten Punkten zur Gewährleistung des Feuchteschutzes, erfordert ein für den Menschen nutzbarer Raum, ein relativ eng definiertes Raumklima, welches nur durch die Vermeidung von unkontrollierten Feuchtigkeitseinträgen sichergestellt werden kann. Ferner müssen Bauwerke auch ästhetischen Ansprüchen genügen, welche aufgrund von Feuchteschäden stark beeinträchtigt werden können.

Der Feuchteschutz ist auch im Zusammenhang mit dem Wärmeschutz zu sehen, da wichtige bauphysikalische Kenngrößen, wie die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  (siehe Kapitel 2-1.5.1), stark vom Feuchtegehalt des Baustoffes beeinflusst werden. Zudem stellen zu verdunstende Wassermengen zur Abführung der Feuchtigkeit in die Luft einen zusätzlichen Energieaufwand dar.

Wasser kann im Bauwesen ganz allgemein als Beschleuniger des unvermeidlichen Zerfalls von Bauwerken gesehen werden, da Wasser in Baustoffen viele chemische, physikalische und biologische Prozesse ermöglicht, die im trockenen Zustand nicht stattfinden könnten. Eine Vielzahl von Bauschäden kann daher auf das Wasser zurückgeführt werden.

Zum Feuchteschutz im Hochbau zählen somit alle baulichen Maßnahmen, welche die oben angeführten Punkte verhindern.

#### 2-2.1.1 Wasser und Bauwerke (14)

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Feuchtigkeitseinwirkungen aufgezeigt und die dafür notwendigen Gegenmaßnahmen kurz erklärt. Wasser kann auf sehr unterschiedliche Arten Wirkungen auf ein Bauwerk zeigen und dadurch Schäden verursachen. Wasser kann aber auch auf das Behaglichkeitsbefinden des Menschen Auswirkungen zeigen. Des Weiteren ist die Kenntnis der Wechselwirkung zwischen Wasser und Bauwerk von großer Bedeutung, da Wasser in allen drei Aggregatzuständen (fest, flüssig, gasförmig) auftreten kann.

Zu den Feuchtigkeitseinwirkungen im Außenbereichen zählen:

- Niederschlagswasser sowie der Wasserdampfgehalt in der Außenluft
- Bodenfeuchtigkeit und Sickerwasser
- Grundwasser, Stauwasser und Druckwasser

Zu den Feuchtigkeitseinwirkungen im Innenbereichen zählen:

- Baufeuchtigkeit
- Wasserdampf, verursacht durch Mensch und Tier
- Wasser aus Feuchträumen
- Reinigungswasser, Gießwasser und Wasser aus defekten Leitungen
- Oberflächen- und Kondenswasser

Um Bauwerke nun vor zu hohen Wasser- bzw. Feuchtigkeitseintrag zu schützen, stehen grundsätzlich folgende vier Möglichkeiten zur Verfügung:

- 1) Abdichtung
- 2) Ableitung
- 3) Unterbrechung des kapillaren Wassertransportes
- 4) Feuchtemanagement (bauphysikalische Strategie)

Abbildung 2.24 zeigt schematisch die in Punkt 2-2.1 angeführten Feuchtigkeitseinwirkungen auf ein Bauwerk.

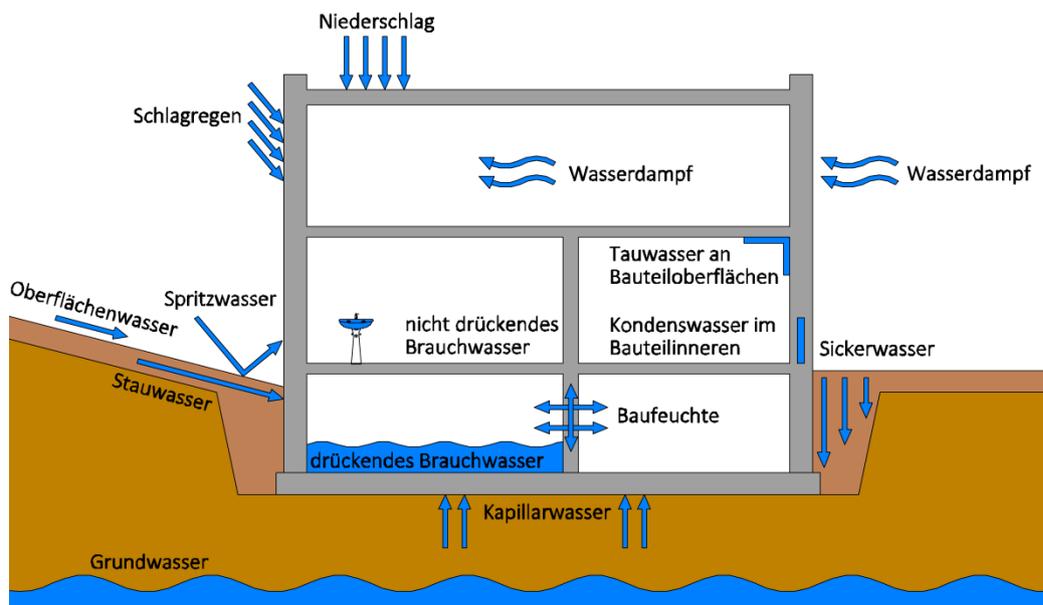


Abbildung 2.24: Feuchtigkeitseinwirkungen auf Bauwerke (14)

### Abdichtung

Unter Abdichten versteht man den Zufluss von flüssigem Wasser durch entsprechende Abdichtungsmaterialien (Bitumen-Membrane, Anstriche, Folien, Polymer-Dichtungsbahnen etc.) zu unterbinden. In der Regel schützen Abdichtungen großflächige Bauteile auf der einwirkenden Seite des jeweiligen Bauteiles (siehe Abbildung 2.25 und Abbildung 2.26). Wichtig dabei ist, dass dies lückenlos geschieht, weswegen Stöße meist überlappen und miteinander verschweißt werden. Abdichtungsmaterialien sollten auch eine relativ hohe Flexibilität aufweisen, um eventuelle Bewegungen des Bauteiles unbeschadet mitmachen zu können. Entscheidend ist für die Rissüberbrückungsfähigkeit jedoch auch die Schichtdicke. Was die Wasserdampfdiffusion betrifft, unterliegen Abdichtungen prinzipiell keinerlei Vorgaben.



Abbildung 2.25 aufgeflämmte Bitumenbahn (16)



Abbildung 2.26 aufgeflämmte Bitumenbahn an einem Gebäude in Holz-Massivbauweise

### Ableitung

Um bei drucklosen Wasserableitungen etwaige Fertigungstoleranzen zu berücksichtigen, sollten diese mit einem Mindestgefälle von 3% ausgeführt werden. Bei fließendem Wasser ist es ausreichend, die wasserführenden Elemente zu überlappen, um das Eindringen von Wasser an Stoßstellen weitgehend zu vermeiden. Dachdeckungen mit Ziegel oder Regenrinnen folgen diesem Prinzip, wobei die Wasserableitung immer der geplanten Fließrichtung entsprechen muss. Bei Dachdeckungen handelt es sich also um eine weitgehende Regendichtheit, da bei starkem Wind geringe Mengen Regenwasser unter die Dachhaut gelangen können. Entscheidend für die Dichtigkeit sind demnach das Gefälle, die Überlappungslänge und die Profilierung der Überlappungsbereiche. Im Vergleich zu Dachdeckungen werden die Deckungselemente an Fassaden als Schindeln bezeichnet. Da an Fassaden das Gefälle ein Höchstmaß besitzt, wird im Allgemeinen auf eine Profilierung verzichtet.

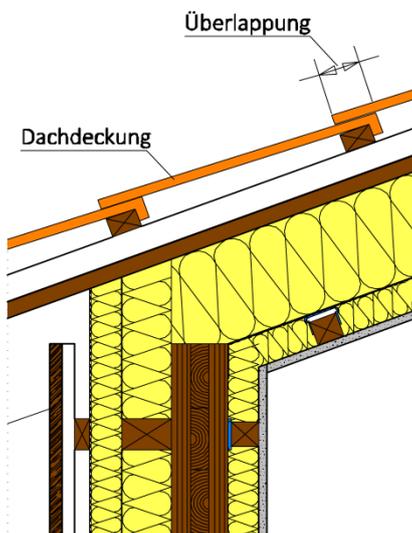


Abbildung 2.28 Überlappung bei Dachdeckung (5)

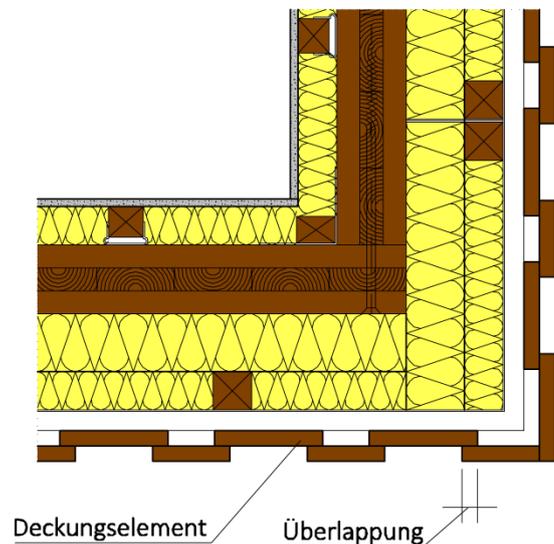


Abbildung 2.27 Überlappung Fassade (im Grundriss) (5)

### Unterbrechung des kapillaren Wassertransportes

Feinporige Baustoffe besitzen die Eigenschaft, durch Kapillarwirkung in kurzer Zeit relativ viel Wasser aufzunehmen. Durch Imprägnierungen oder Anstrich kann eine solche Wasseraufnahme verhindert werden. Im Holzbau werden hierfür vorwiegend Lacke und Lasuren verwendet. Nach der Imprägnierung wird die Holzoberfläche hydrophob, wodurch die Wasseraufnahme gestoppt wird und das Wasser an der Oberfläche abperlt.

Bei Bauteilen, welche direkter Bewitterung ausgesetzt sind geht dieser Schutz jedoch mit der Zeit verloren. Filmbildende bzw. hydrophobe Anstriche haben allerdings den Nachteil, dass aufgrund der geringen Schichtdicken weder eine Fehlstellenfreiheit noch eine gewisse Rissüberbrückung gewährleistet werden kann. Imprägnierungen sind daher vorzugsweise bei eher kurzfristigen Wassereinwirkungen anzuwenden, wenn diese auch durch Trocknungsperioden geprägt sind. Es ist allerdings zu beachten, dass nicht alle Beschichtungen hydrophob bzw. filmbildend wirken. Die Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten ist in ÖNORM EN 335-3:2013 geregelt. Abbildung 2.29 zeigt schematisch die Eindringtiefe verschiedener Verfahren.

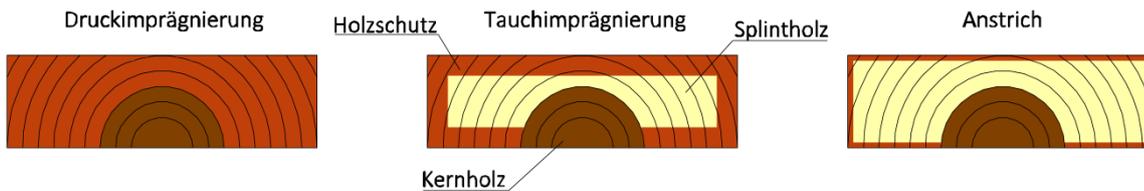


Abbildung 2.29 Eindringtiefe in Abhängigkeit des Verfahrens vgl. (17)

### Feuchtemanagement (bauphysikalische Strategie)

Bei Bauteilen die aus mehreren Schichten bestehen, muss die Wahl der Materialien, Schichtstärken und Schichtenfolge so erfolgen, dass ein ausreichender Schutz gegen Wärmeverluste und zu hohe Wassergehalte infolge Diffusion und Kondensatbildung gemäß ÖNORM B 8110-2:2003 gewährleistet werden kann. Grundsätzlich sollte bei mehrschichtigen Aufbauten der Diffusionswiderstand nach außen hin abnehmen und der Wärmedämmwert zunehmen. Eine Hilfestellung hierbei bietet der sogenannte „Lagewert“. Dieser setzt sich aus dem Produkt zwischen der Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der Schichtdicke  $d$  zusammen und sollte von der warmen zur kalten Seite hin möglichst abnehmen.

$$\text{Lagewert} = \mu \cdot \lambda \cdot d \quad (50)$$

Eine weitere Methode zur Bestimmung von Kondenswasserbildung wurde 1958 von Glaser entwickelt. Diese Methode erlaubt es, unter bestimmten klimatischen Bedingungen, die Tauwassermasse im Jahresverlauf zu ermitteln. Auf das Verfahren nach Glaser wird allerdings in Kapitel 3 näher eingegangen.

Überdies bieten mittlerweile zahlreiche Softwareapplikationen die Möglichkeit, stationäre und instationäre Wärme- und Feuchtetransportvorgänge in geometrisch relativ komplex aufgebauten Bauteilen zu berechnen. Instationäre Berechnungen bieten darüber hinaus die Möglichkeit, zeitlich veränderliche Randbedingungen zu berücksichtigen.

Diese bauphysikalische Strategie, zur Vermeidung von eindringender Feuchtigkeit, fördert die diffusionsoffene Bauweise und verringert die Ausführung von Dampfsperren. Durch eine umfassende Analyse können auch in vielen Fällen die Schichtdicken verringert werden und Detaillösungen somit vereinfacht werden.

## 2-2.1.2 Wasser und Bauteile

Im Allgemeinen findet eine Überlagerung der in Kapitel 2-2.1.1 angeführten Feuchtigkeitseinwirkungen statt. Abbildung 2.30 zeigt eine schematische Darstellung der möglichen Feuchtigkeitseinwirkungen auf eine Außenwand. Bei Außenbauteilen kommt es oft zu einer höheren Belastung durch von innen kommende Feuchte als durch Niederschlagswasser. Da Transportvorgänge wie Wärme- oder Feuchtetransport zum größten Teil im „verborgenen“ stattfinden, werden Schäden oft erst sehr spät erkannt. Vergleicht man die Wärmeleitfähigkeit von Wasser ( $\lambda = 0,6 \text{ [W/mK]}$ ) mit der von ruhender Luft ( $\lambda = 0,026 \text{ [W/mK]}$ ) wird die Auswirkung steigender Feuchtigkeit in, beispielsweise, einer Dämmung sofort verdeutlicht. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser ist demnach 25-mal größer als die von Luft und es gilt, sämtliche Feuchtigkeitseinträge zu minimieren. Füllen sich nun die Poren mit Wasser, wird die zuvor enthaltene Luft verdrängt und die Wärmeleitfähigkeit steigt mit dem Wassergehalt zwangsläufig an. Dies zeigt wie wichtig es ist, Baustoffe von Feuchtigkeitseinträgen zu schützen, auch in Hinblick auf wärmedämmende Eigenschaften.

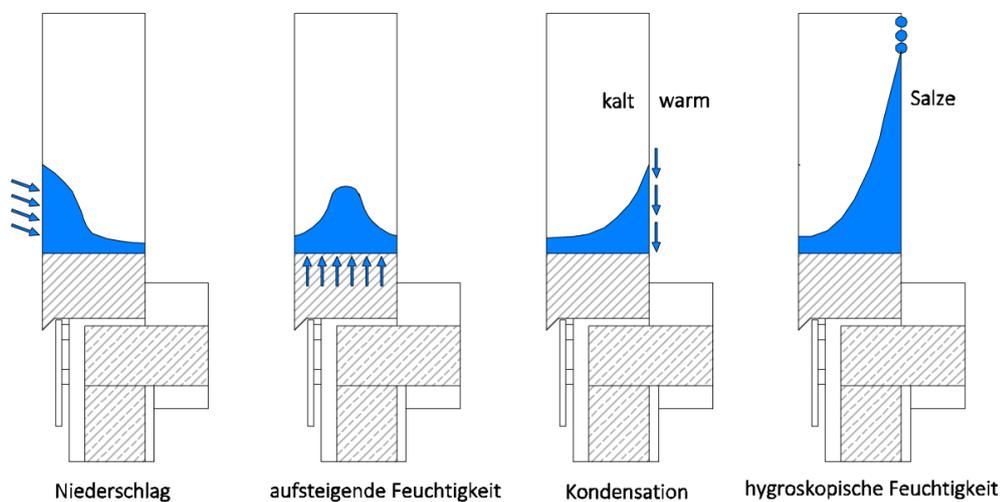


Abbildung 2.30: Feuchtigkeitseinwirkungen auf Bauteile

Es sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, dass auf den Feuchtegehalt von Baustoffen schon vor dem Einbau geachtet werden sollte. Baustoffe sollten möglichst trocken angeliefert werden und sind auch auf der Baustelle trocken zu halten. Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, kann es bei durchfeuchteten Baustoffen zu Frostschäden kommen da Wasser beim Gefrieren eine Volumenzunahme von ca. 10% erfährt. Gerade im Holzbau sollten, bei Anfallen von Niederschlagswasser, alle Bauteile abgedeckt oder durch andere Maßnahmen geschützt werden. Nach Fertigstellung des Neubaus ist es wichtig, das Gebäude sofort zu beheizen und durch regelmäßige Luftwechsel eine rasche Austrocknung zu ermöglichen. Abbildung 2.31 zeigt den Verlauf einer 38 cm starken, porösen Wand ( $\rho = 780 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ).

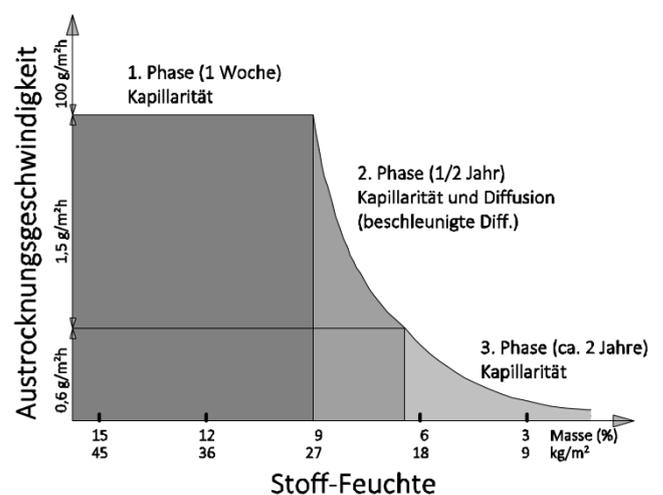


Abbildung 2.31: Austrocknungsgeschwindigkeit (Krischer)

## 2-2.2 GASE (9)

### Gesetz von Boyle-Mariotte

Das Produkt aus Druck und Volumen ist bei konstanter Temperatur konstant. Mit Gleichung (56) folgt:

$$p \cdot V = const. \quad (51)$$

Nimmt der Druck ab, so steigt das Volumen und umgekehrt.

### Gesetz von Joseph Louis Gay-Lussac

Das Verhältnis von Volumen und Temperatur ist bei konstantem Druck konstant

$$\frac{V}{T} = const. \quad (52)$$

Für konstante Volumen ist der Druck direkt proportional zur absoluten Temperatur.

### Vereinigtes Gesetz von Boyle-Mariotte-Gay-Lussac

$$\frac{p \cdot V}{T} = const. \quad (53)$$

Der Druck hängt vom Verhältnis zwischen Temperatur und Volumen ab.

### 2-2.2.1 Gasmischungen (9)

Das wohl bedeutendste Beispiel für eine Gasmischung ist die Luft. Als Luft wird also das Gasgemisch der Erdatmosphäre bezeichnet. Die Hauptbestandteile der Luft sind Stickstoff, Sauerstoff und andere Gase. Im Bauwesen ist vor allem das gasförmige Wasser von Interesse, das auch als Wasserdampf bezeichnet wird. Im Mittel ist Wasserdampf zwischen 0 bis ca. 3 Gew.-% bzw. 0 bis 4 Vol.-% in Luft enthalten. In Tabelle 6 ist die Zusammensetzung trockener und reiner Luft jeweils in Gewichts- und Volumprozent angegeben.

*Tab.: 6: Zusammensetzung trockener, reiner Luft (9)*

Gas	Formel	Gew.-%	Vol.-%
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	23,01	20,93
Stickstoff	N <sub>2</sub>	75,51	78,10
Argon	Ar	1,29	0,933
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	4*10 <sup>-2</sup>	3*10 <sup>-2</sup>
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	1*10 <sup>-3</sup>	1*10 <sup>-3</sup>
Neon	Ne	1,2*10 <sup>-3</sup>	1,8*10 <sup>-3</sup>
Helium	He	7*10 <sup>-5</sup>	5*10 <sup>-4</sup>
Krypton	Kr	3*10 <sup>-4</sup>	1*10 <sup>-4</sup>
Xenon	Xe	4*10 <sup>-5</sup>	9*10 <sup>-6</sup>

### Gesetz von Dalton

Wasser ist immer, in unsichtbarer Form und in einer gewissen Menge, in der Luft vorhanden. Jener Wasserdampf übt einen bestimmten Dampfdruck als Teildruck auf den atmosphärischen Dampfdruck aus. Dieser Teildruck wird auch als Partialdruck bezeichnet. Die Menge an Wasserdampf, die von der Luft aufgenommen werden kann hängt von der Temperatur ab und nimmt mit steigender Temperatur zu.

Das Gesetz von Dalton stellt für die Definition des Dampfdrucks eine wichtige Grundlage dar. Demnach ist die Summe der Partialdrücke gleich dem des Gesamtdrucks.

$$p = \sum_{i=1}^n p_i \quad (54)$$

Es bedeuten:

$p_i$ .....Partialdruck [pa]

$p$ .....Gesamtdruck der Luft [pa]

Dies bedeutet, dass sich die einzelnen Gaskomponenten des Gasgemisches so verhalten, als ob die anderen nicht vorhanden wären. In Abbildung 2.32 sind die Partialdrücke und der Gesamtdruck der Luft schematisch dargestellt.

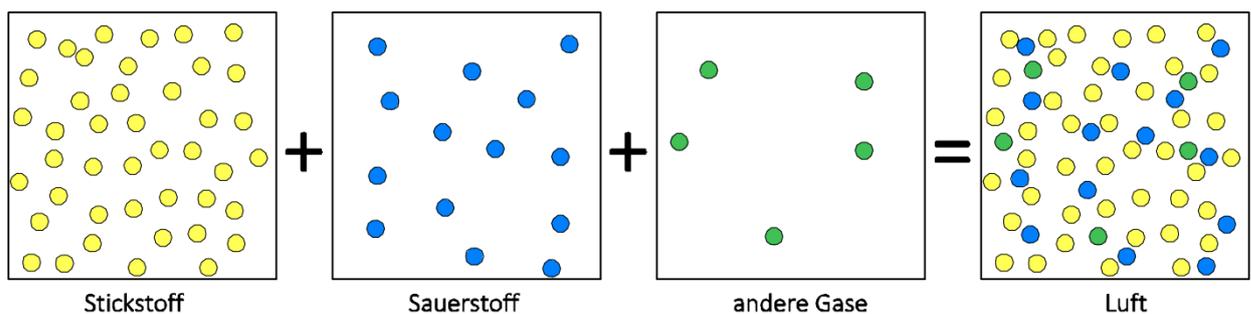


Abbildung 2.32: schematische Darstellung des Partialdruckes

### Feuchtegehalt

Die absolute Feuchte  $x$  ergibt sich aus dem Verhältnis der Feuchtigkeitsmasse  $m_D$  [kg] und der Masse der trockenen Luft  $m_L$  [kg].

$$x = \frac{m_D}{m_L} \quad (55)$$

Es bedeuten:

$x$ .....Feuchtegehalt [-]

$m_D$ .....Feuchtigkeitsmasse [kg]

$m_L$ .....Masse der trockenen Luft [kg]

### 2-2.2.2 Temperaturbedingte Spannungen von Gasen (1)

Der Zusammenhang zwischen Temperatur, Druck, Volumen und Gasmenge wird mit der allgemeinen Gasgleichung beschrieben. Mit Gleichung (56) lässt sich nun das thermische Verhalten von idealen Gasen charakterisieren. Die Gasmenge wird in der Einheit Mol angegeben und ist wie folgt definiert:

„...Ein Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensoviel Einzelteilchen besteht, wie Atome in 12/1000 Kilogramm des Kohlenstoffkleids  $C_{12}$  enthalten sind...“ (1)

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (56)$$

Es bedeuten:

$p$ .....Druck [pa]

$V$ .....Volumen [ $m^3$ ]

$n$ .....Stoffmenge [mol]

$R$ .....allgemeine Gaskonstante (8,31441) [J / molK]

$T$ .....absolute Temperatur [K]

Für die Anwendung im Ingenieurbereich wird Gleichung (56) umformuliert, wobei als Gasmenge meist die Masse eingesetzt wird. Aus Gleichung (56) folgt mit

$$R_s = \frac{R}{M_n} \quad (57)$$

und

$$M_n = \frac{m}{n} \quad (58)$$

die umformulierte Gasgleichung

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \quad (59)$$

Es bedeuten:

$R_s$ .....spezifische Gaskonstante [J / kg \* K]

$M_n$ .....Molmasse [kg / mol]

$m$ .....Masse [kg]

Die spezifische Gaskonstante  $R_s$  kann aus der allgemeinen Gaskonstante und der Molmasse  $M_n$  für jedes beliebige Gas berechnet werden.

Beispiel:

Gefragt ist die spezifische Gaskonstante von Wasser.

$$R_{H_2O} = \frac{R}{M_{nH_2O}} = \frac{8,31441}{18 \cdot 10^{-3}} = 462 \left[ \frac{J}{kgK} \right] \quad (60)$$

### 2-2.2.3 Luftfeuchtigkeit (9)

Als Luftfeuchtigkeit (auch Luftfeuchte genannt) wird, wie in Kapitel 2-2.2.1 beschrieben, der Anteil des Wasserdampfes des Gasgemisches Luft bezeichnet. Folglich werden flüssiges Wasser oder auch Eis der Luftfeuchtigkeit nicht zugerechnet. Die Luftfeuchtigkeit eine der wichtigsten Kenngrößen der Bauphysik, hat neben dem Feuchteschutz auch eine große Bedeutung in Bezug auf Gesundheit und Behaglichkeit.

#### Feuchtegehalt

Die absolute Feuchte  $x$  ergibt sich aus dem Verhältnis der Feuchtigkeitsmasse  $m_D$  [kg] und der Masse der trockenen Luft  $m_L$  [kg]. Die absolute Feuchte ist also nur eine andere Bezeichnung der Partialdichte von Wasserdampf und gibt an, wieviel Gramm Wasserdampf in einem  $m^3$  Luft enthalten ist.

$$x = \frac{m_D}{m_L} [-] \quad (61)$$

#### Relative Luftfeuchte

Im Allgemeinen enthält Luft nur einen Teil des höchstmöglichen Feuchtegehaltes. Das Verhältnis der bestehenden Feuchtigkeitsmenge zur Sättigungsmenge wird als relative Luftfeuchte bezeichnet.

$$\varphi = \frac{p_D}{p_s} [-] \quad (62)$$

Es bedeuten:

$p_D$ .....Wasserdampfdruck [pa]	$m_D$ .....Feuchtigkeitsmasse [kg]
$p_s$ .....Wasserdampfsättigungsdruck [kg]	$m_L$ .....Masse der trockenen Luft [kg]
$\varphi$ .....relative Luftfeuchte [-]	$x$ .....absolute Feuchte [-]

Ein Ansteigen der relativen Luftfeuchte kann also durch Feuchtigkeitszufuhr oder durch das Absenken der Lufttemperatur erfolgen. Wird die Sättigungsgrenze von 100% erreicht, führt jede weitere Zufuhr von Feuchtigkeit bzw. Absenkung der Temperatur zum Ausfall von Feuchtigkeit in Form von Kondenswasser. Die relative Luftfeuchte bewegt sich im Außenbereich zwischen 70% und 90% und ist im Wesentlichen von der Temperatur abhängig. In Abbildung 2.33 ist ein Jahresverlauf der relativen Luftfeuchte dargestellt.

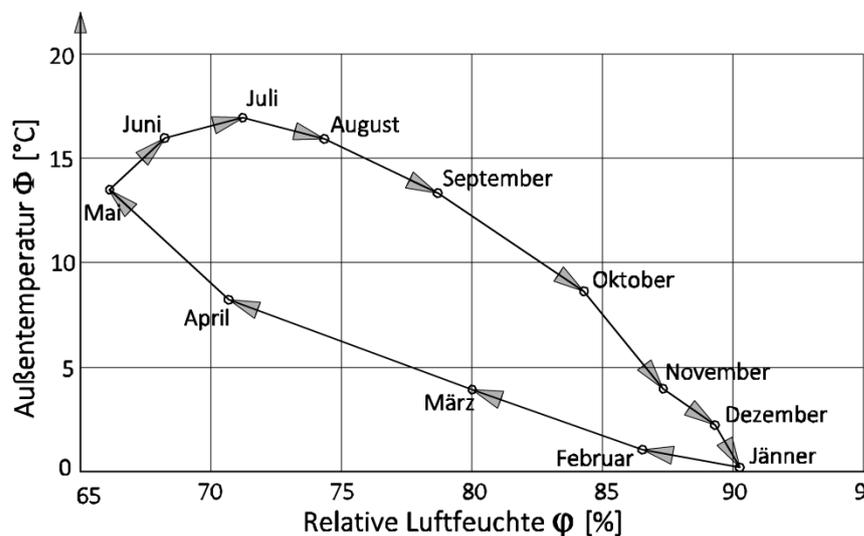


Abbildung 2.33: Jahresverlauf: relative Luftfeuchte (Hannover) (9)

## 2-2.3 FLÜSSIGKEITEN

### 2-2.3.1 Das Element Wasser (9)

Obwohl Wasser in der Atmosphäre nur in relativ geringen Mengen (0 – 4 Vol-%) als Wasserdampf vorkommt, hat es für die Bauphysik enorme Bedeutung. Naturgemäß kommt Wasser je nach Temperatur- und Druckverhältnissen auch in den beiden anderen Aggregatzuständen, fest und flüssig vor.

Versucht man gefrorenes Wasser mit einer Temperatur von 0°C zu erwärmen, bleibt diese so lange konstant, bis das Eis vollständig vom festen in den flüssigen Aggregatzustand übergegangen ist. In Abbildung 2.34 sind die Änderungen der Aggregatzustände in Abhängigkeit der Temperatur und der dafür benötigten Wärmeenergie dargestellt.

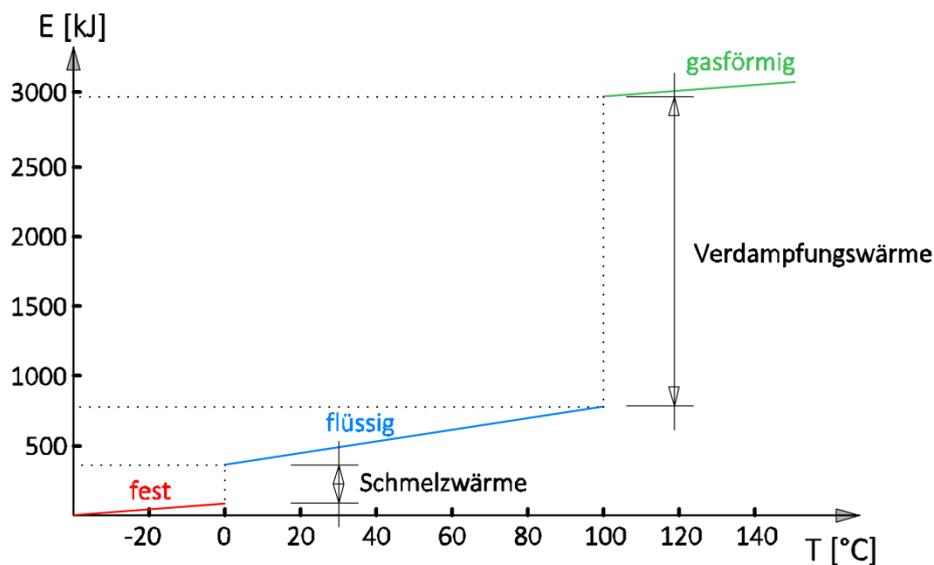


Abbildung 2.34: Aggregatzustände in Abhängigkeit der Temperatur und der benötigten Energie

Die Eigenschaften von Wasser in den verschiedenen Aggregatzuständen werden durch die innere Ladungsverteilung im Wassermolekül (Dipolwirkung) bestimmt. Aber auch das Verhalten anderer Stoffe gegenüber Wasser wird durch diesen polaren Charakter festgelegt. So weisen verschiedene Stoffe eine verschieden starke Affinität zu Wasser auf. Stoffe, die wasserabweisende Eigenschaften besitzen, werden als „hydrophob“ bezeichnet und Stoffe welche Wasser anziehen als „hydrophil“. Tabelle 7 zeigt mögliche Einwirkungen von Wasser auf ein Gebäude in Abhängigkeit des Aggregatzustandes.

Tab.: 7: Aggregatzustände und mögliche Einwirkungen (16)

$\Theta < 0^\circ\text{C}$ Eis (fest)	Sprengwirkung infolge von Volumszunahme, Frosterhebungen, Eislinsen
$0 < \Theta < 100^\circ\text{C}$ Wasser (flüssig)	Grundwasser, Schlagregen, Kapillar- und Sickerströmungen, Kondensat in und an Bauteilen
alle $\Theta$ Wasserdampf	Dampfdiffusion und Raumluftfeuchte

### 2-2.3.2 Anomalie des Wassers (1)

Im Gegensatz zu den Spannungen in festen Körpern, wird der Ausdehnungskoeffizient immer auf das Volumen bezogen und ist um etwa das 10-fache höher. In Tabelle 8 sind einige dieser Ausdehnungskoeffizienten angeführt, wobei im Bauwesen das Wasser als bedeutendstes Fluid angesehen werden kann. Die Ausdehnung von Flüssigkeiten ist gemäß Gleichung (63) definiert.

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T \quad (63)$$

Es bedeuten:

$\Delta V$ .....Volumenänderung [ $m^3$ ]

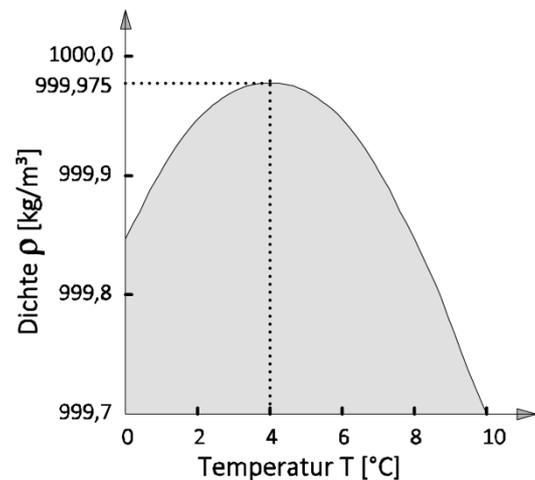
$V_0$ .....Volumen der Flüssigkeit

$\Delta T$ .....Temperaturänderung [ $K$ ]

$\gamma$ .....Ausdehnungskoeffizient [ $K^{-1}$ ]

**Tab.: 8: Ausdehnungskoeffizienten  $\gamma$  (18)**

Fluid/Einheit	$\gamma$ [ $10^{-3} K^{-1}$ ]
Wasser (0°C)	-0,068
Wasser (20°C)	0,207
Wasser (100°C)	0,782
Quecksilber	0,181
Hydrauliköl	0,700
Aceton	1,460



**Abbildung 2.35: Anomalie des Wassers (10)**

Ein Phänomen, das unter anderem beim Gefrieren von Wasser auftritt, ist die Volumenzunahme von ungefähr 10% im Bereich von 0°C bis 4°C. Diese Verringerung der Dichte beim Abkühlen von Wasser wird als Anomalie des Wassers bezeichnet. Die größte Dichte besitzt Wasser bei ca. 4°C, wobei bei Temperaturen darüber oder darunter die Dichte wieder abnimmt. In Abbildung 2.35 ist der Verlauf der Dichte in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Im Bauwesen hat dieser Effekt besondere Relevanz da in einen Baustoff eingedrungenes Wasser unter gewissen Umständen gefrieren kann und es durch die dadurch entstehende Zunahme des Volumens zu einer Art Sprengwirkung kommt. Auch in Rohrleitungen gefrierendes Wasser kann diese durch den enormen Druck beträchtlich schädigen.

### 2-2.3.3 Transportmechanismen des Wassers (9)

In porösen Baustoffen lässt sich der Mechanismus des Feuchtigkeitstransportes als reine Diffusion, Kapillarleitung und fortlaufende Kapillarkondensation beschreiben (siehe Abbildung 2.36). Solche Baustoffe besitzen einen gewissen Mindest-Feuchtigkeitsgehalt (Gleichgewichtsfeuchte), welcher die Wärmeleitung beeinflusst und daher in der Berechnung berücksichtigt werden muss.

## Wasserdampfdiffusion

Die Eigenbewegung des Wasserdampfes durch Baustoffe wird als Wasserdampfdiffusion bezeichnet. Physikalisch gesehen stellt sie also eine Gasdiffusion dar und ist im Gegensatz zur Gasströmung ein Transportvorgang aufgrund eines Konzentrationsgefälles des Wasserdampfes. Die treibende Kraft einer Gasströmung entsteht hingegen durch ein Gasdruckgefälle. Gase sind stets bestrebt, Konzentrationsunterschiede auszugleichen, wodurch ein Massestrom entsteht. Mit steigender Temperatur und fallendem Luftdruck nimmt die Diffusion zu.

## Diffusion durch Baustoffe

Die Eigenschaft des Wasserdampfes auch relativ dichte Stoffe zu durchdringen, findet im Diffusionswiderstandsfaktor  $\mu$  Ausdruck (siehe Kapitel 2-1.6). Der  $\mu$ -Wert gibt an, um wievielfach dichter der betrachtete Baustoff gegen diffundierende Wasserstoffmoleküle ist, als eine ruhende, gleich dicke Luftschicht. Die Diffusion verläuft meist in Richtung des Temperaturgefälles, da diese vom Dampfdruckgefälle abhängig ist.

In porösen Baustoffen wie Holz lässt sich der Mechanismus des Feuchtigkeitstransportes als reine Diffusion, Kapillarleitung und fortlaufende Kapillarkondensation beschreiben (siehe Abbildung 2.36). Solche Baustoffe besitzen einen gewissen Mindest-Feuchtigkeitsgehalt (Gleichgewichtsfeuchte), welcher die Wärmeleitung beeinflusst und daher in der Berechnung berücksichtigt werden muss.

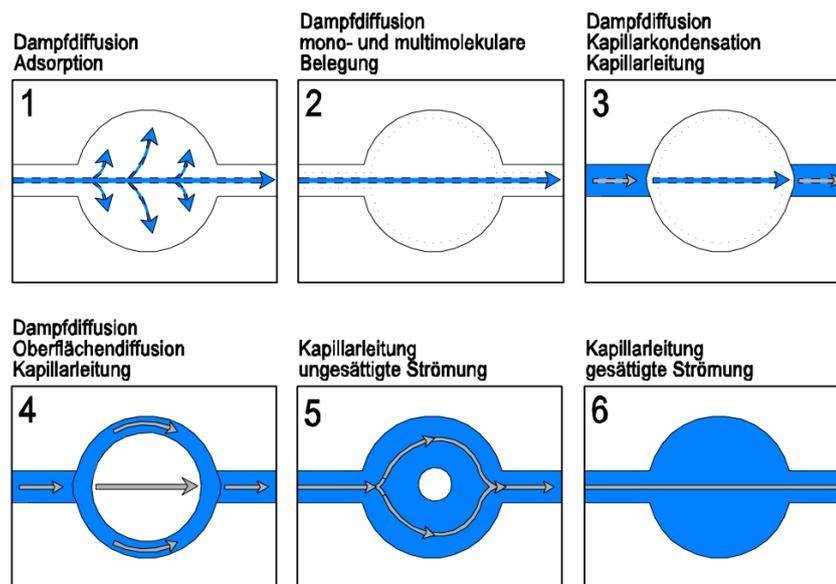


Abbildung 2.36: Diffusion (9)

Der Feuchtetransport in Baustoffen findet wie folgt statt (siehe Abbildung 2.36):

Im Zustand 1 findet Wasserdampfdiffusion statt, wobei an der Porenwand Wassermoleküle adsorbiert werden, bis sich an den Porenwänden eine Sorptionschicht bildet (Zustand 2). Die Dicke dieser Schicht wird durch den Porenradius begrenzt und ist abhängig von der relativen Luftfeuchte der Umgebung. Steigert man nun den Feuchtegehalt, füllen sich anfänglich die kleineren Poren vollständig durch Kapillarkondensation (Zustand 3). Durch weiteres Steigern des Feuchtegehaltes kommt es zur Kapillarleitung in den Zylinderporen, bis schließlich in die Kugelporen so viel Wasser eindiffundiert ist, dass zwar noch immer Wasser durch die Pore diffundiert, aber die Filmschicht so weit angewachsen ist, dass der Feuchtetransport auch durch die effektive Oberflächendiffusion möglich ist (Zustand 4). Durch die Zunahme der Schichtdicke kommt es zu einer Umlagerung von Bereichen mit großer Schichtdicke zu Bereichen mit geringer Schichtdicke. Bei der sogenannten Porenwasserströmung ist noch eine Luftblase eingeschlossen (Zustand 5). Schlussendlich ist diese Pore auch wassergesättigt und der Vorgang erfolgt nach den Mechanismen der laminaren Strömung (Zustand 6).

Der Austrocknungsvorgang geschieht hingegen in entgegengesetzter Richtung, wobei die Austrocknungsgeschwindigkeit zu Beginn groß und gegen Ende hin immer kleiner wird (siehe Abbildung 2.37).

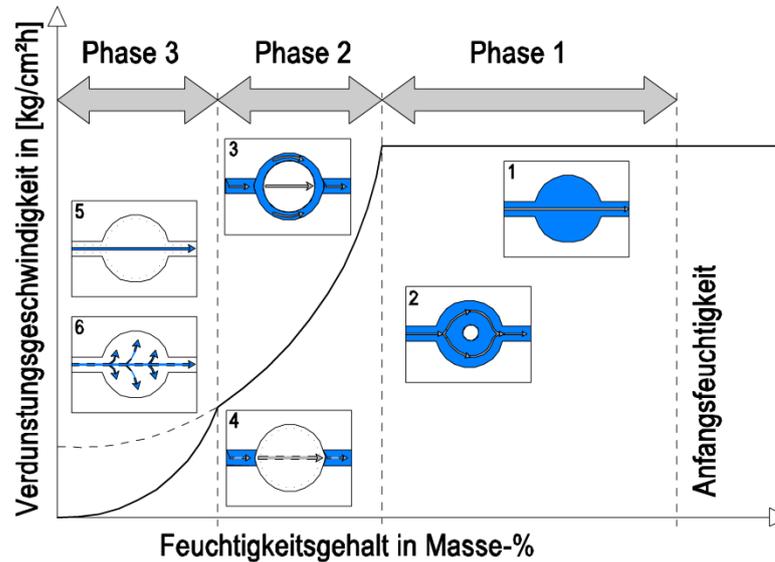


Abbildung 2.37: Verdunstung (9)

### Sorption

Sorption ist die Anreicherung eines Stoffes innerhalb, oder an der Grenzfläche, eines räumlichen Bereiches in dem physikalische und chemische Parameter homogen sind. Die Anreicherung innerhalb des Bereiches nennt man Absorption, die an der Grenzfläche zwischen zwei Bereichen wird Adsorption genannt. Der sorbierende Stoff wird dabei als Sorptionsmittel bezeichnet. Der eingelagerte (sorbierter) Stoff mit dem Sorptionsmittel zusammen wird Sorbat genannt. Die Anreicherung oder Anlagerung findet solange statt, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Liegt kein Gleichgewicht vor, so sind die beteiligten Stoffe bestrebt dieses herzustellen. In Abbildung 2.38: Sorption und Desorption ist der Transport des Wasserdampfes und der Flüssigkeit unter isothermen Bedingungen (oben) und nicht isothermen Bedingungen (unten) dargestellt. Bei isothermen Bedingungen herrscht bei Vorhandensein eines Partialdruckgefälles immer ein Gradient der relativen Luftfeuchte und des Sorptionsgehaltes vor. Man erkennt die Verlagerung des Sorbatfilms durch den Flüssigtransport (strichlierte Linie).

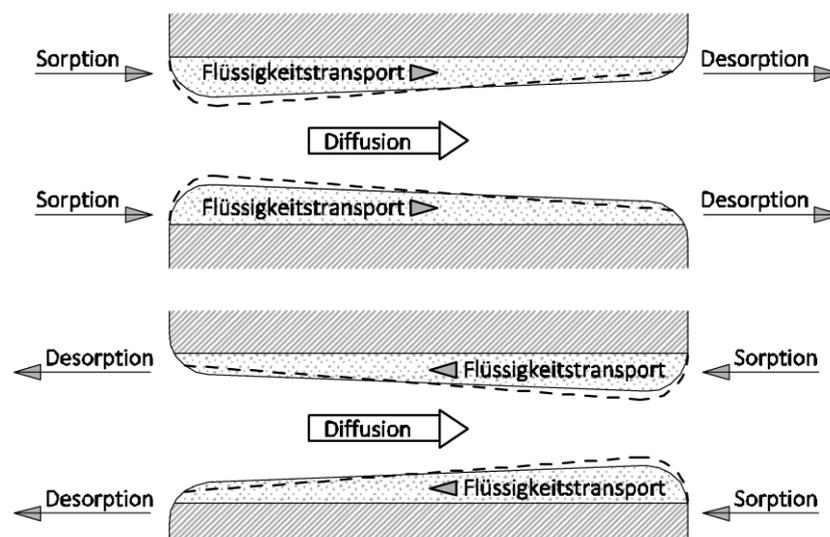


Abbildung 2.38: Sorption und Desorption (9)

### Sorptionsfeuchtebereich

Der Sorptionsfeuchtebereich wird durch die Anlagerung (Sorption) von Wasser aus der Umgebungsluft bis zum Eintreten des Gleichgewichtszustandes definiert. Die Sorptionstherme charakterisieren den Zusammenhang zwischen der An- oder Einlagerungsmenge und der relativen Luftfeuchte bei isothermen Verhältnissen. Sorptionstherme haben für hygroskopische poröse Baustoffe, wie z.B. Holz, einen S-förmigen Verlauf wobei oft ein Hystereseeffekt (unvollständige Reversibilität von Sorptions- und Desorptionsvorgängen) zu beobachten ist. Ist dieser Effekt sehr ausgeprägt, müssen Adsorption- und Desorptionstherme berücksichtigt werden, um die Sorptionseigenschaft von Baustoffen beschreiben zu können.

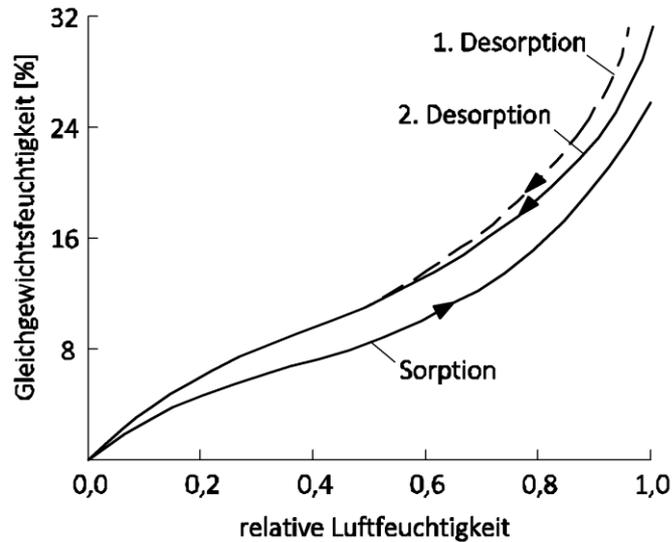


Abbildung 2.39: Sorptionsisotherme (Fichte) nach HA. Spalt (1985)

Für eine zweckmäßige Trocknung des Holzes ist die Kenntnis des Holzfeuchtegleichgewichts von großer Bedeutung, da vor der Verarbeitung das Holz immer auf diejenige Feuchte getrocknet werden sollte, für dessen Umgebung es bestimmt wurde. Dies verhindert größere Formänderungen die durch Quellen und Schwinden hervorgerufen werden.

Untersuchungen von (19) haben ergeben, dass sich das Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen stark unterscheidet. Dies ist auf folgende Punkte zurückzuführen:

- Klebstoffe und Zusatzstoffe (Art und Menge)
- Herstellungstechnologie
- Temperierung
- Verdichtung

Aus Abbildung 2.40 ist zu erkennen, dass neben OSB-Platten auch Sperrholz eine erhöhte Gleichgewichtsfeuchte aufweisen. Das bedeutet, dass sowohl zwischen Vollholz und Holzwerkstoffen Unterschiede bestehen, als auch unter den Holzwerkstoffen selbst.

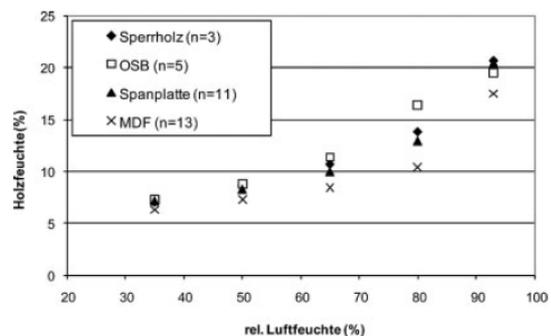


Abbildung 2.40: Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen (Mittelwerte) (19)

### Kapillarwirkung (20)

Kapillare sind z. B. enge Röhren, Hohlräume, Risse oder Spalten in Festkörpern. Das Verhalten von Flüssigkeiten in solchen Kapillaren nennt man Kapillarität oder Kapillareffekt. Dieser Effekt wird durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und der Grenzflächenspannung zwischen der Flüssigkeit und die der Kapillaroberfläche ausgelöst. Taucht man zum Beispiel ein dünnes Röhrchen in eine Flüssigkeit, führt der Kapillareffekt zu einem kleinen Anstieg der Flüssigkeit im Röhrchen. Kapillarporösen Baustoffen kommt dieser „saugenden“ Wirkung große Bedeutung in Hinblick auf die Feuchtigkeitsaufnahme zu.

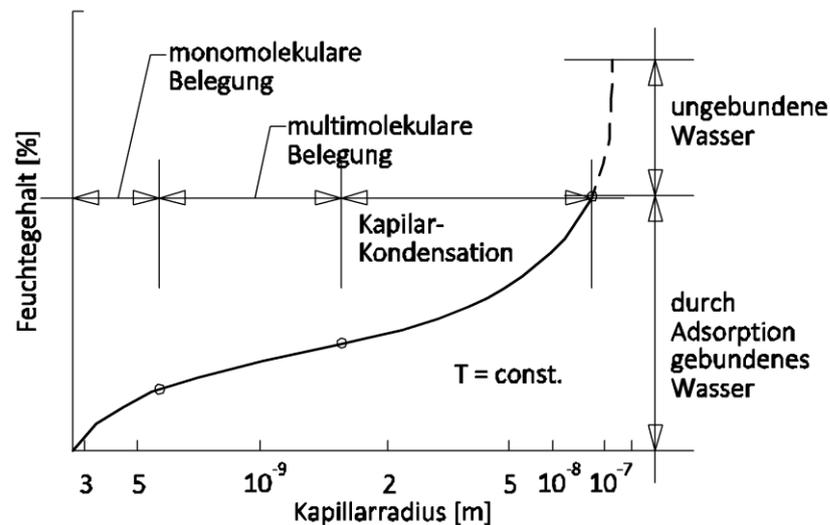


Abbildung 2.41: Sorptionstherme hygroskopischer poröser Stoffe in Abhängigkeit der Porenradien (schematisch) (9)

### Kapillarwasserbereich

Bei 95% relativer Luftfeuchte steigen die Sorptionstherme so stark an, dass keine eindeutige Zuordnung des Wassergehaltes zur Luftfeuchte mehr möglich ist und somit der Kapillarwasserbereich beginnt. Die freie Wassersättigung von kapillarporösen Baustoffen liegt aufgrund von eingeschlossenen Luftporen immer unterhalb des durch den Porenraum möglichen Wassergehaltes und stellt einen wichtigen Kennwert von Baustoffen dar.

Solange isotherme Verhältnisse herrschen, ist bei Vorhandensein eines Partialdampfdruckgefälles immer ein gleich orientierter Dampf- und Flüssigkeitstransport gegeben. Bei nicht isothermen Bedingungen stellt sich ein entgegengesetzter Gradient der relativen Feuchte und des Wassergehaltes ein. Dadurch verlaufen auch die Diffusion und der Flüssigtransport in entgegengesetzte Richtung (siehe Abbildung 2.38).

Für bauphysikalische Berechnungen ist es daher sinnvoll, von einem stofffeuchteunabhängigen Diffusionskoeffizienten auszugehen. Des Weiteren sollte bei der Berechnung des Flüssigtransportes auch die Oberflächendiffusion berücksichtigt werden. Die Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass sich Dampf- und Flüssigkeitstransport nicht beeinflussen. Da hauptsächlich die Porengröße die Diffusionsgeschwindigkeit und der Flüssigtransport unabhängig davon über den sorbierten Wasserfilm der Mikroporen stattfindet, ist diese Voraussetzung, für die meisten Baustoffe, im Sorptionsbereich gegeben. Im Kapillarbereich ist der Kapillartransport um vieles größer als die Diffusion, weswegen sich ändernde Diffusionskoeffizienten nur geringe Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse haben.

**Feuchtespeicherung (14)**

Um den Schutz vor Tauwasserbildung zu erhöhen, ist es in Räumen wünschenswert ein, möglichst großes Feuchte-Speichervermögen bereitstellen zu können. Somit kann Oberflächenkondensat aufgenommen, und in Beruhigungszeiten wieder abgegeben werden. Die Feuchtespeicherung dient also zum Ausgleich von Belastungsspitzen.

Um die Wassermenge in einem Baustoff zu ermitteln, können diese wie folgt angegeben werden:

$$w = \frac{m_w}{V_B} [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (64)$$

$$\psi = \frac{V_w}{V_B} [-] \quad (65)$$

$$u = \frac{m_w}{m_B} [-] \quad (66)$$

Es bedeuten:

$m_w$ .....Masse des Wassers [kg]

$m_B$ .....Masse des Baustoffs [kg]

$V_B$ .....Volumen des Baustoffs [ $\text{m}^3$ ]

$V_w$ .....Volumen des Wassers [ $\text{m}^3$ ]

$w$ .....baustoffvolumenbezogene Masse des Wassers [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ]

$\psi$ .....baustoffvolumenbezogenes des Wassers [-]

$u$ .....baustoffvolumenbezogenes Masse des Wassers [ $\text{m}^3$ ]

Grundsätzlich lassen sich die Wassergehaltsbereiche in feinporigen Baustoffen in drei Bereiche einteilen:

- Bereich niedriger Feuchte (hygroskopischer Bereich)  
In diesem Bereich wird der Feuchtetransport durch Diffusionsvorgänge bestimmt und die Wasserspeicherung durch Absorptionsvorgänge.
- Bereich hoher Feuchte (Kapillarwasserbereich)  
Der Wassertransport erfolgt durch die ungesättigte Porenwasserströmung und durch die Oberflächenspannung des Wassers, wobei der dabei entstehende Kapillardruck das Wasser entscheidend beeinflusst.
- Übersättigungsbereich  
Im übersättigten Bereich liegt die relative Luftfeuchte bei 100%. Ein echter Gleichgewichtszustand zwischen Luft und Wasser ist hier nicht mehr möglich.
- Gleichgewichtsfeuchte

Für Baustoffe lassen sich nun folgende charakteristische Feuchtwerte angeben:

- Gleichgewichtsfeuchte  $u_\phi$ :  
Die hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte wird durch den Index derjenigen relativen Luftfeuchte gekennzeichnet, mit der sie im Gleichgewicht stehen soll. Eine Gleichgewichtsfeuchte von  $u_{50}$  entspricht also dem Wassergehalt bei 50% relativer Luftfeuchte. Für die Festlegung der Wärmeleitfähigkeitswerte  $\lambda$  von Baustoffen wird der Begriff Ausgleichfeuchtegehalt verwendet.
- freie Wassersättigung  $u_f$ :  
Setzt man einen Stoff drucklosen Wassers aus, stellt sich, nach einiger Zeit, die freie Wassersättigung ein. Bei grobporigen Baustoffen würde sich dann rasch eine vollständige Durchfeuchtung einstellen ( $u_f = u_{\max}$ ). Bei feinporigen Stoffen, stellt sich hingegen eine Teildurchfeuchtung ein, welche im Laufe vieler Jahre jedoch über den Wert  $u_f$  ansteigt und schließlich den Wert  $u_{\max}$  erreichen wird, da sich die eingeschlossene Luft in den Poren löst und

somit entweicht. Der Unterschied zwischen freiem und maximalem Wassergehalt ist für die Frostbeständigkeit von Baustoffen von großer Bedeutung.

- maximale Wassersättigung  $u_{max}$ :

Der Wassergehalt entspricht der vollständigen Füllung aller dem Wasser zugänglichen Poren.

In Abbildung 2.42 sind die möglichen Wassergehalte von absoluter Trockenheit bis hin zur völligen Porenfüllung mit Wasser schematisch dargestellt.

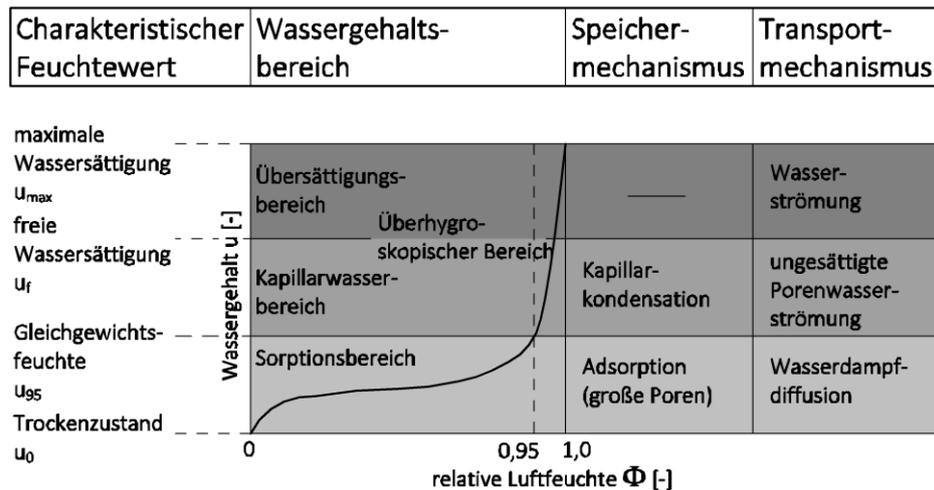


Abbildung 2.42: mögliche Wassergehaltsbereiche (14)

Abbildung 2.43 zeigt Sorptionsisotherme verschiedener Hölzer und Kork. Üblicherweise wird bei Messungen zur Bestimmung von Sorptionsthermen entweder die relative Luftfeuchte allmählich gesteigert oder aber erniedrigt. Durch dieses Vorgehen erhält man zwei verschiedene Isotherme, den sogenannten Adsorptionsast und den Desorptionsast und spricht von Hysterese (siehe auch Abbildung 2.38).

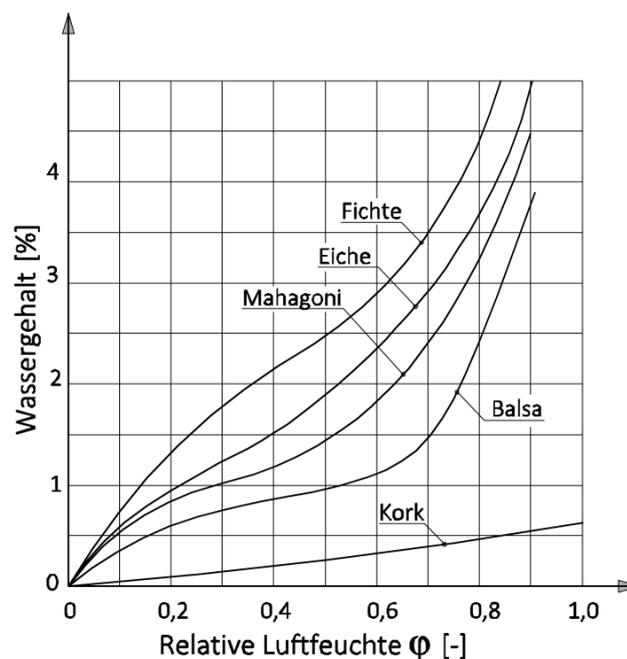


Abbildung 2.43: Adsorptionsisotherme verschiedener Holzarten (14)

## 2-2.4 FEUCHTETECHNISCHE KENNGRÖßEN

### 2-2.4.1 Oberflächentemperatur von Bauteilen

Neben den Wärmeverlusten und dem dadurch bedingten zusätzlichen Heizenergiebedarf, kann es bei Wärmebrücken aufgrund der geringeren Oberflächentemperatur auch zur Schimmelpilzbildung kommen. Um dieses Risiko beurteilen zu können, müssen die Feuchteverhältnisse an Bauteiloberflächen bzw. in Bauteilen bekannt sein. Die Oberflächentemperatur wird dabei nicht in Grad Celsius angegeben, da diese nur unter bestimmten Randbedingungen für Außen- und Innenlufttemperatur Gültigkeit besäße. Stattdessen wird gemäß ÖNORM B 8110-2:2003 zur Kennzeichnung der Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  verwendet. Dieser Temperaturfaktor setzt sich aus der relativen Temperaturdifferenz zwischen innerer Oberflächentemperatur und Außenlufttemperatur zusammen und wird auf die Temperaturdifferenz zwischen Innenluft- und Außenlufttemperatur bezogen. Der Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  ist eine bauspezifische Größe und ist unabhängig von der gegenwärtigen Temperaturdifferenz zwischen außen und innen. Je höher also der  $f_{Rsi}$ -Faktor ist, umso höher sind auch der Wärmeschutz der Konstruktion und umso geringer damit das Risiko von Schimmelbildung. Da es im Fall von Wärmebrücken nicht möglich ist einen Wärmedurchgangskoeffizienten, und damit den ortsabhängigen Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  zu berechnen, muss dieser mit Hilfe von geeigneten Softwareapplikationen (numerische Rechenverfahren) ermittelt werden.

#### Bemessungs-Temperaturfaktor für die raumseitige Oberfläche

Zur Vermeidung von Oberflächenkondensation an der inneren Bauteiloberfläche, darf die innere Oberflächentemperatur  $\theta_{si}$  nicht die Sättigungstemperatur  $\theta_{sat}$  die bei 80% relativer Feuchtigkeit der Innenluft entsprechende Temperatur unterschreiten. Daher gilt:

$$\theta_{si} \geq \theta_{sat} \quad \text{bzw.} \quad \theta_{si} - \theta_e \geq \theta_{sat} - \theta_e \quad (67)$$

Bezugnehmend auf die Gesamttemperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft gilt:

$$\frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \geq \frac{\theta_{sat} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (68)$$

und

$$\theta_{sat} = -\varphi_i^{\frac{1}{8}} \cdot (110 + \theta_i) - 110 \quad (69)$$

Es bedeuten:

$\theta_i$ .....Innenlufttemperatur [°C]

$\theta_e$ .....Außenlufttemperatur [°C]

$\theta_{si}$ .....innere Oberflächentemperatur [°C]

$\theta_{sat}$ .....Sättigungstemperatur [°C]

Da die Taupunkttemperatur an Oberflächen nicht erreicht werden darf, ist die Temperaturdifferenz zwischen Innenlufttemperatur und innerer Oberflächentemperatur, bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Innenluft- und Außenlufttemperatur, zu begrenzen. Diese Differenz wird als Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  bezeichnet. Der Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  für das Norm-Innenklima darf höchstens 0,69 [-] betragen und hängt nur von der Art und dem Wärmeschutz der Bauteilkonstruktion ab. Somit können Bauteile, bei Kenntnis der Lufttemperaturen bzw. Oberflächentemperaturen über den Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  beurteilt werden. In Hinblick auf Schimmelbildung sind hier jedoch strengere Maßstäbe anzusetzen. Der Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  wird hier deswegen auf 0,71 [-] angehoben.

Somit gilt mit dem Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  und dem Bemessungsfaktor  $f_{Rsi,min}$ :

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} [-] \quad (70)$$

und

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} [-] \quad (71)$$

Für das Norminnenklima von  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$  und  $\theta_e = -5^\circ\text{C}$  bei einer relativen Feuchtigkeit von 50% für Kondensatbildung und 80% für Schimmelpilzbildung ergeben sich die  $f_{Rsi}$ -Werte zu:

$$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min} = 0,69 \text{ bzw. } 0,71 [-] \quad (72)$$

Es bedeuten:

$f_{Rsi}$  .....Temperaturfaktor [-]

$f_{Rsi,min}$  .....Bemessungsfaktor [-]

In Hinblick auf die Vermeidung von Kondensation und der damit verbundenen Schimmelpilzbildung ist die, im Innenraum  $k$ , kleinste Oberflächentemperatur  $\theta_{Si,k}^*$  bzw. der kleinste Temperaturfaktor  $f_{Rsi}^*$  für die Bauteilbemessung heranzuziehen.

$$f_{Rsi}^* = \frac{\theta_{Si,k}^* - \theta_e}{\theta_{i,k} - \theta_e} \quad (73)$$

Je nach Innenluftbedingungen und den vom Standort des Gebäudes abhängigen Außenluftbedingungen ist der Bemessungs-Temperaturfaktor jeweils zu ermitteln. Die kleinsten zulässigen Temperaturen ergeben sich wie folgt:

- Zur Vermeidung von Kondenswasserbildung ist jene Temperatur maßgebend, bei der die Raumluft 100% relative Luftfeuchtigkeit erreicht.
- Um die Bildung von Schimmelpilz zu vermeiden ist jene Temperatur maßgebend, bei der die Raumluft 80% relative Luftfeuchtigkeit erreicht.

Der Bemessungs-Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  ist für eine Innenluft von  $20^\circ\text{C}$  und einer relativen Feuchtigkeit von 40% bis 70%

- zur Vermeidung von Kondenswasserbildung in Abbildung 2.44 und
- zur Vermeidung von Schimmelbildung in Abbildung 2.45

nach ÖNORM B 8110-2:2003 dargestellt. Die Kurve W stellt dabei den Bemessungs-Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für Wohngebäude und Gebäude vergleichbarer Widmung dar. Abbildung 2.46 zeigt den höchsten Bemessungs-Temperaturfaktor  $f_{Rsi,min}$  in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsbelastung des Innenraumes  $\varphi_{i,0}$  bei  $20^\circ\text{C}$  Innenlufttemperatur.  $\varphi_{i,0}$  ist dabei die relative Feuchte der Innenluft in % bei einer Innenlufttemperatur von  $20^\circ\text{C}$  und einer Außenlufttemperatur  $\theta_e \geq 0^\circ\text{C}$ . Für Außentemperaturen  $\theta_e \leq 0^\circ\text{C}$  gilt:

$$\varphi_i = \varphi_{i,0} - (0 - \theta_e) \quad (74)$$

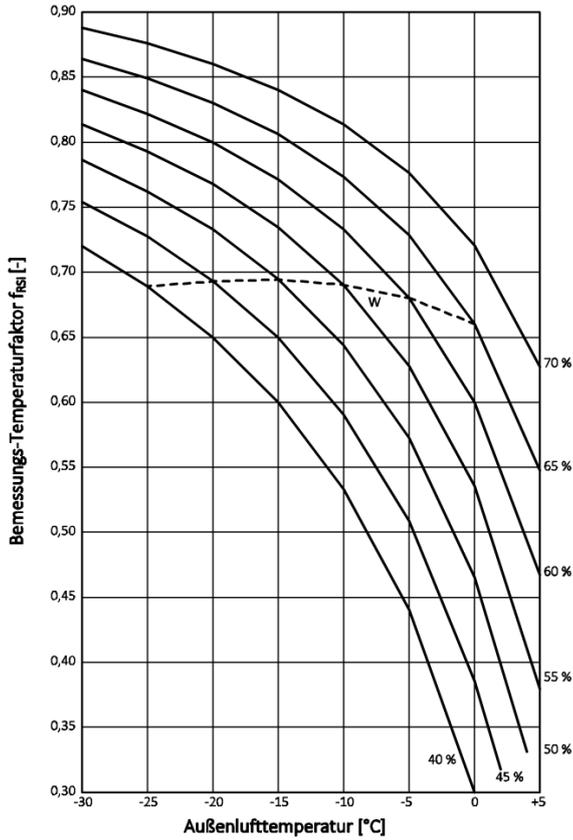


Abbildung 2.44:  $f_{RSi}$  zur Vermeidung von Kondensat

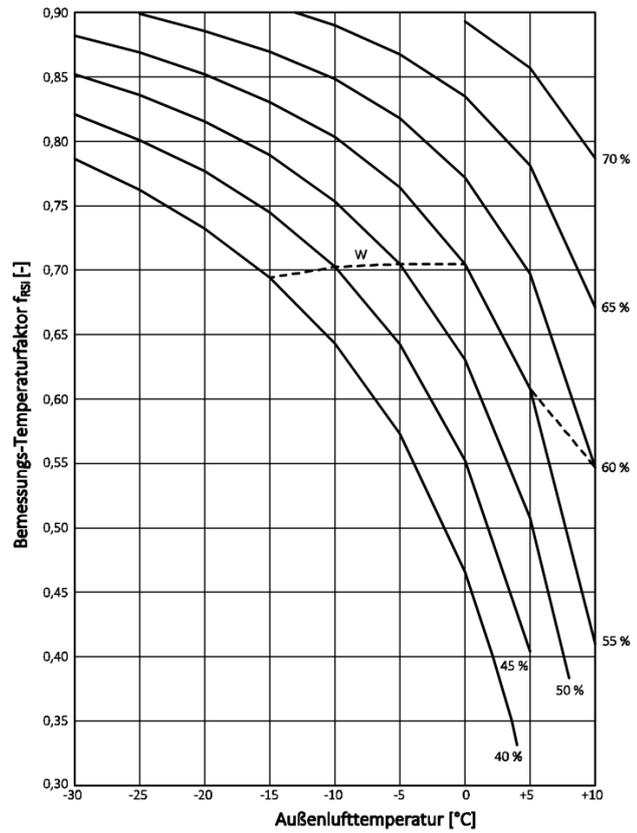


Abbildung 2.45:  $f_{RSi}$  zur Vermeidung von Schimmel

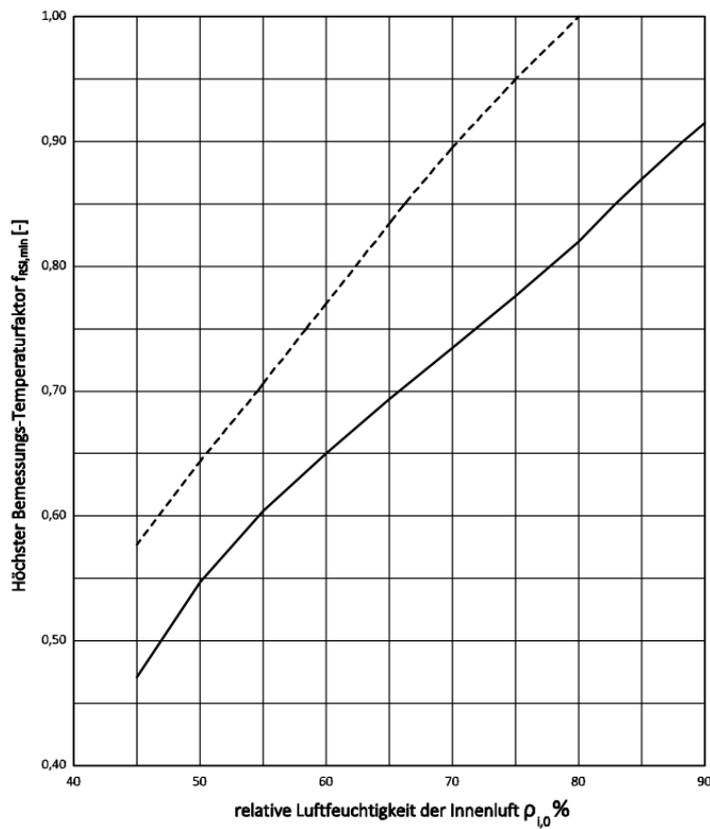


Abbildung 2.46:  $f_{RSi,min}$

## 2-2.4.2 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (14)

Wie schon in Kapitel 2-2.3.3 erwähnt, handelt es sich bei Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  um eine Verhältniszahl. Sie ist das Maß für die Dampfdichtheit eines Stoffes. Es ist also eine Vergleichszahl, die angibt, um wie viel der Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion in einer Schicht größer ist als in einer gleich dicken Luftschicht (Luft = 1 [-]). Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wird durch den Quotient aus Wasserdampfdiffusionskoeffizienten der Luft  $\delta_a$  und dem Wasserdampfdiffusionskoeffizienten  $\delta$  gebildet.

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} [-] \quad (75)$$

Es bedeuten:

$\delta_a$ .....Wasserdampfdiffusionskoeffizient der Luft [mg / mhPa]

$\delta$  .....Wasserdampfdiffusionskoeffizient eines Stoffes [mg / mhPa]

$\mu$  .....Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]

Als Grund für die Beziehung zwischen dem Diffusionswiderstand eines Stoffes und dem von Luft kann folgendes angeführt werden: Man stelle sich einen dichten Stoff vor und entmaterialisiere diesen gedanklich durch Vergrößerung des Porenraumes. Dann würde die Widerstandszahl von einem anfangs großen Wert immer kleiner werden. Verschwindet das Festkörpergerüst nun ganz, steht den Wassermolekülen nur noch die ruhende Luft entgegen. In der Erdatmosphäre bildet Luft den kleinst möglichen Widerstand gegen diffundierende Wassermoleküle. Es liegt also nahe, Luft als Bezugspunkt mit dem Wert  $\mu = 1$  zu wählen. Daraus folgt:

$$1 \leq \mu \leq \infty \quad (76)$$

Allerdings nehmen im Bauwesen nur Metalle und Gläser Werte gegen unendlich an, alle anderen Baustoffe sind mehr oder weniger wasserdampfdurchlässig.

Da aber nicht nur die Art des Baustoffes (Material, Dichte, Struktur der Poren) sondern auch die Schichtdicke für die Dichtigkeit maßgebend ist, genügt die Angabe der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl nicht, um den tatsächlichen Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion zu beschreiben. Eine sehr einfache Definition, welche den Widerstand kennzeichnet, ist die sogenannte „äquivalente Luftschichtdicke  $s_d$ “. Diese setzt sich aus dem Produkt von Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  und der jeweiligen Schichtdicke  $d$  zusammen.

$$S_d = \mu \cdot d \quad (77)$$

Es bedeuten:

$d$ .....Schichtdicke [m]

$S_d$  .....äquivalente Luftschichtdicke [m]

Die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke ist also jene Dicke einer Luftschicht, die denselben Widerstand wie die Schicht eines Stoffes mit der Dicke  $d$  und der Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  aufweist.

In der folgenden Tabelle sind für einige Baustoffe die  $\mu$ -Werte und für gängige Schichtdicken die zugehörigen  $S_d$ -Werte angegeben. Ab einem  $S_d$ -Wert von 1500 m gelten Baustoffe als dampfdicht.

**Tab.: 9: Wasserdampfdiffusionswiderstandswerte (7)**

Baustoff	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ -Wert [-]	Schichtdicke d [m]	$S_d$ -Wert [m]
Beton	2400	50	0,25	12,5
Stahl	7800	9999999	0,005	50000
Holz (Fichte)	500	50	0,10	5
Brettsperrholz (Fichte)	500	50 - 200	0,10	5 - 20
Mineralwolle	10 - 100	1	0,20	0,2

### 2-2.4.3 Abhängigkeit der Dampfdiffusion von Holz (24)

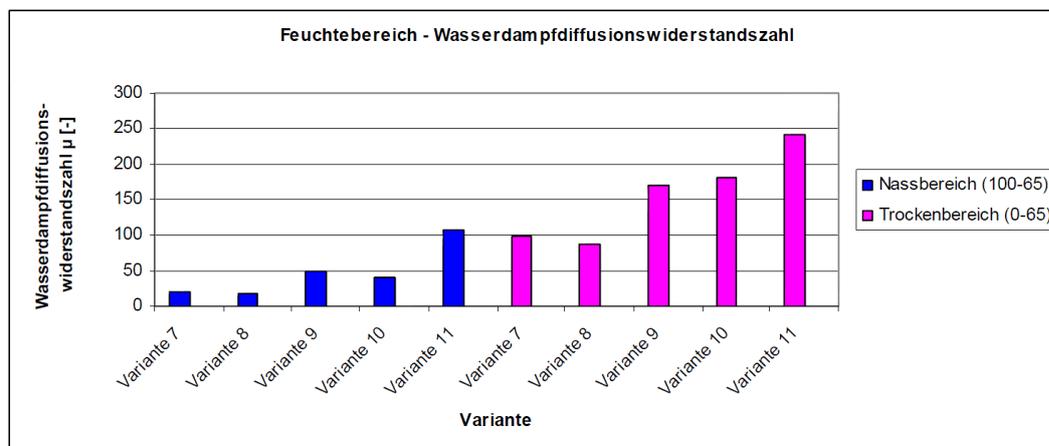
Die wichtigsten Einflussgrößen der Wasserdampfdiffusion für Holz sind:

- Feuchtebereich
- Temperatur
- Standort

Eine steigende Holzfeuchte hat ein Absinken der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl zufolge. Durch Versuche konnte allerdings gezeigt werden, dass sich auch durch die Anzahl der Schichten und die Verteilung des Klebstoffes, die Wasserdampfdiffusion ändert. Der Widerstand bei Vollholz ist im Vergleich zu Brettsperrholz mit geschlossenen Klebstoffugen relativ gering. Je mehr Klebeschichten die Massivplatte aufweist, desto höher steigt die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Des Weiteren hat auch die Jahrringlage einen großen Einfluss auf die Wasserdampfdiffusion.

$$\mu_{\text{Vollholz}} < \mu_{\text{BSP eine Fuge}} < \mu_{\text{BSP zwei Fugen}} < \mu_{\text{BSP drei Fugen}} < \mu_{\text{BSP fünf Fugen}}$$

In Abbildung 2.47 sind die Versuchsergebnisse von (23) dargestellt. Untersucht wurden jeweils fünf Probekörper (Variante 7 bis Variante 11) wobei die Zahl der Klebefugen mit der Variantennummer zunimmt. Dementsprechend weist Variante 7 null Klebeschichten und Variante 11 fünf Klebeschichten auf. Außerdem wurden die Wasserdampfdiffusionswiderstände für zwei Feuchtebereiche ermittelt.


**Abbildung 2.47: Einfluss der Anzahl der Klebefugen auf den Wasserdiffusionswiderstand (24)**

Des Weiteren wurde bei den Untersuchungen von (23) auch eine Abhängigkeit der Jahrringlage auf den Diffusionswiderstand festgestellt. Die Diffusion findet demnach in axialer Richtung bedeutend schneller statt als quer zur Faser. Und in radialer Richtung schneller als in tangentialer Richtung. In Abbildung 2.48 bis Abbildung 2.50 sind die Messergebnisse des Wasserdampfdiffusionswiderstandes  $\mu$  für Fichte und Buche in Abhängigkeit der Jahrringlage und bei verschiedenen relativen Luftfeuchten dargestellt.

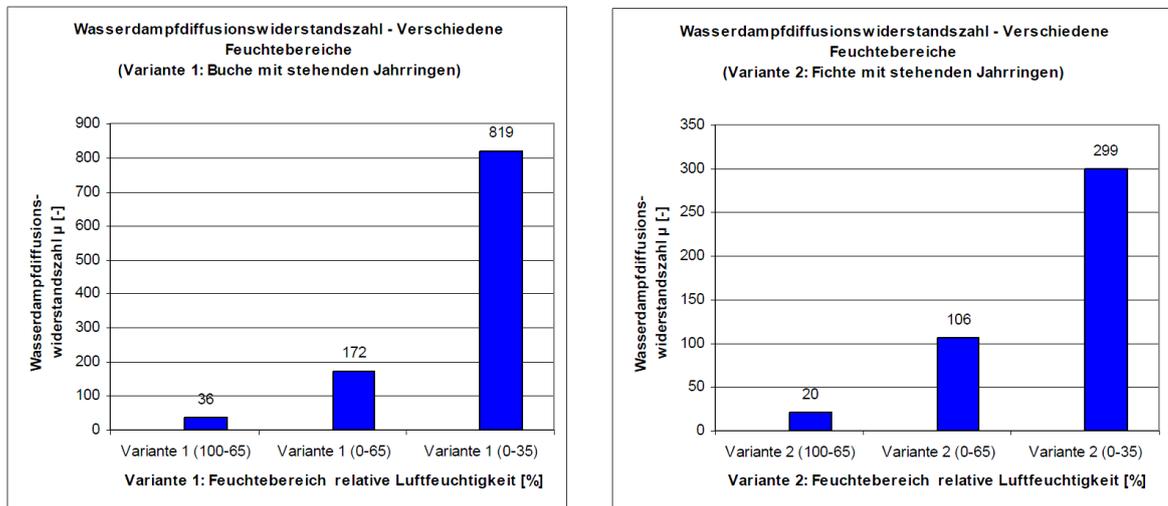


Abbildung 2.48:  $\mu$ -Werte bei Buche und Fichte mit stehenden Jahrringen (tangente Diffusion) (24)

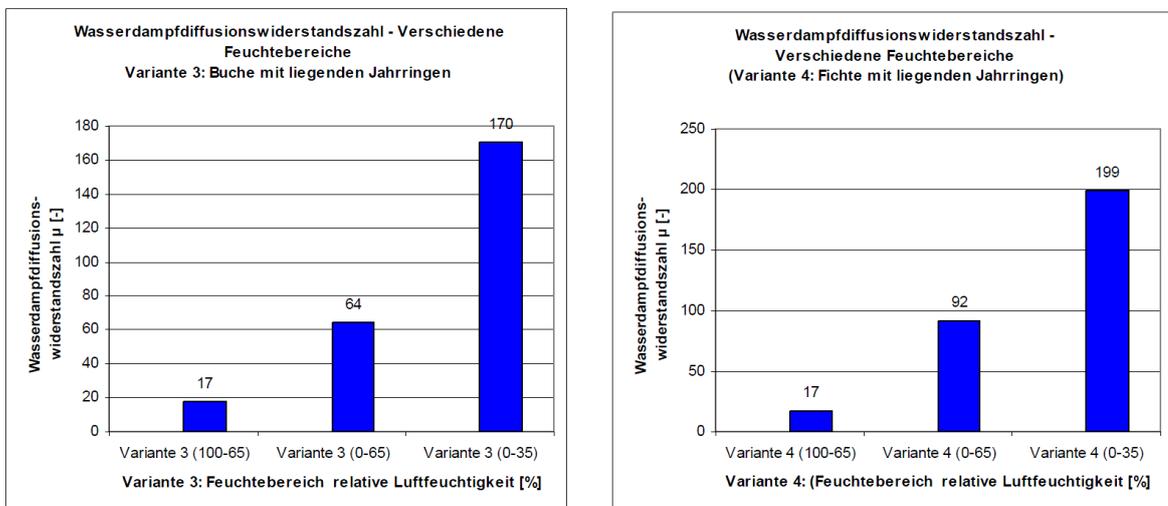


Abbildung 2.49:  $\mu$ -Werte bei Buche und Fichte mit liegenden Jahrringen (radiale Diffusion) (24)

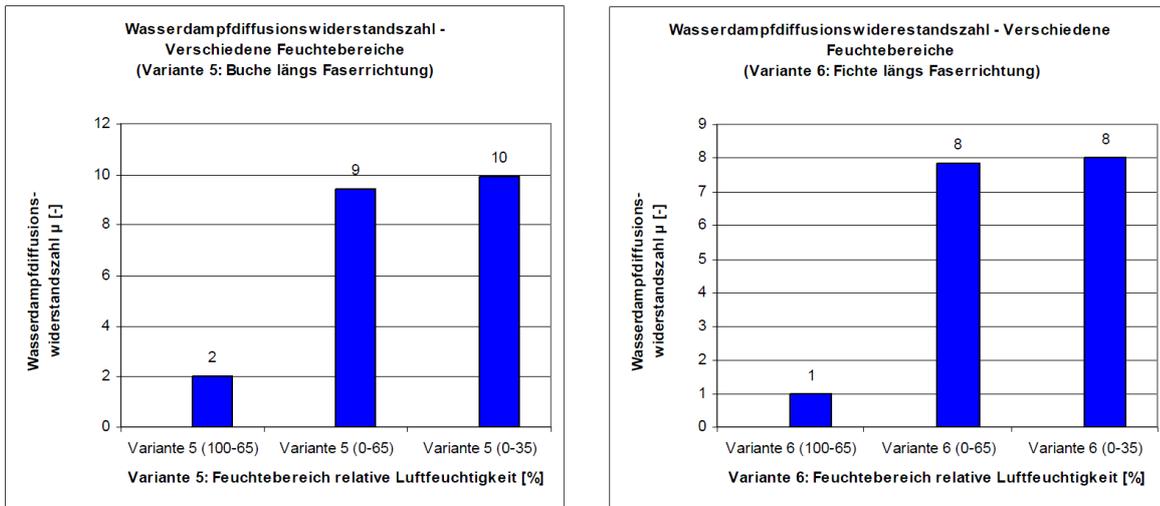


Abbildung 2.50:  $\mu$ -Werte bei Buche und Fichte in Faserrichtung (axiale Diffusion) (24)

Die Diagramme zeigen, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen  $\mu$  in radialer (liegende Jahrringe), tangentialer (stehende Jahrringe) und axialer (in Faserrichtung) mit steigendem Feuchtegehalt stets abnehmen. Weiters zeigt sich auch, dass der Widerstand in Faserrichtung weit geringer ist als in radialer und tangentialer Richtung.

Näherungsweise verhalten sich die Wasserdampf Widerstandszahlen wie folgt:

$$\mu_{tangential} : \mu_{radial} : \mu_{axial} = 15 : 10 : 1 \quad (78)$$

Aus den obigen Abbildungen können nun folgende Verhältnisse für die jeweiligen Feuchtebereiche herausgelesen werden (siehe Tabelle 10).

Tab.: 10: Wasserdampfdiffusionsverhältnis (23)

Holzart	Feuchtebereich [%]	$\mu_{tangential}$	$\mu_{radial}$	$\mu_{axial}$	Verhältnis
Buche	100 - 65	36	17	2	18,0 : 8,5 : 1
	0 - 65	172	64	9	19,1 : 7,1 : 1
	0 - 35	819	170	10	81,9 : 17,0 : 1
Fichte	100 - 65	20	17	1	20 : 17,0 : 1
	0 - 65	106	92	8	13,3 : 11,5 : 1
	0 - 35	299	199	8	37,4 : 24,9 : 1

Eine mögliche Ursache für dieses Diffusionsverhalten sind die Einflüsse von Holzstrahlen und Spätholz (Vanek and Teischinger 1989). Holz kann außerdem aufgrund seiner Struktur mehr Wasser in Faserrichtung aufnehmen als senkrecht dazu. Hinzu kommt, dass bei Fichte die Wasseraufnahme durch Tüpfelverschluss stark reduziert wird, während bei Buche die für Laubbölzer typische Verthyllung auftritt, was zu einer vergleichweisen höheren Feuchteaufnahmefähigkeit führt.

## 2-2.5 SCHIMMELPILZBILDUNG

### 2-2.5.1 Allgemein (24)

Ein besonders wichtiges Thema im Holzbau ist aus bauphysikalischer Sicht der Schimmelpilzbefall. Schimmelpilze zersetzen im Vergleich zu holzerstörenden Pilzen nicht das Holz, sondern sie lösen hygienische Probleme aus. Die Sporen der Schimmelpilze können gesundheitliche Auswirkungen haben und stellen daher eine Gefahr für den Menschen dar. Schimmelpilzbefall ist im Bauwesen generell inakzeptabel und sollte durch geeignete Vorhersagen schon bei der Planung untersucht werden.

Schimmelpilze benötigen zur Bildung neben dem Substrat als Nährboden auch bestimmte Umgebungsbedingungen wie eine bestimmte Luftfeuchtigkeit bei gewissen Temperaturen. Genau diese Voraussetzungen sind in bewohnten Innenräumen sehr oft gegeben und erklären daher auch das häufige Auftreten von Schimmel im Wohnbau. Die Bildung von Schimmelpilz kann einerseits durch ein falsches Nutzerverhalten entstehen, und andererseits durch Ausführungs- und Planungsfehler, also Baumängel. Letztere gilt es durch gewisse Strategien, welche die komplexen bauphysikalischen Vorgänge schon bei der Planung einkalkulieren, zu verhindern um Baumängel so auszuschließen.

### 2-2.5.2 Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen (25)

Seit der Energiekrise in den 70er Jahren war man stets bedacht, die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste zu reduzieren. Doch gerade die Kombination aus luftdichter Bauweise und unzureichendem Lüftungsverhalten stellt ein Risiko in Bezug auf Schimmelbildung dar, da dies eine gesteigerte Feuchtigkeitsbelastung zur Folge hat.

Um eine aussagekräftige Vorhersage von Schimmelpilzbefall treffen zu können ist es notwendig, von instationären Randbedingungen auszugehen. Als Bewertungsmethode eignet sich hierfür das sogenannte biohygrothermische Verfahren in Verbindung mit dem Isoplethenmodell. Während das biohygrothermische Teil-Modell das Verhalten der Pilzsporen bis zur Auskeimung beschreibt, werden im Isoplethen Teil-Modell die Sporenauskeimung und das Myzelwachstum mit der Temperatur und der relativen Luftfeuchte verknüpft. Dieses Vorhersagemodell soll es ermöglichen eine Aussage zu treffen, unter welchen Randbedingungen es nun zur Pilzbildung kommt und wird in Kapitel 3-4.6 näher beschrieben.

#### Ursachen für Schimmelpilzbildung

Wie bereits erwähnt kann es entweder durch Baumängel oder aber auch durch falsches Nutzerverhalten zu Schimmelpilzschäden kommen. Hervorgerufen werden kann dies dann durch:

- Feuchtigkeit in Innenräumen
- Oberflächenkondensat
- zu geringe Raumtemperatur
- unzureichendes Lüftungsverhalten
- Undichtheiten im Gebäude
- Feuchtigkeitseintrag durch Schlagregen
- Baufeuchtigkeit

Die wesentlichen Einflussgrößen sind dabei:

- Temperatur
- Feuchte
- Substrat (Nährstoff und Salzgehalt)
- Milieu (pH-Wert)
- Zeit
- Atmosphäre (Sauerstoffgehalt)

Zur Schimmelpilzbildung kann es sowohl im Bauteilinneren aber auch an Bauteiloberflächen kommen. Die Pilzbildung an Oberflächen hängt von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Oberflächentemperatur ab.

Die Oberflächentemperatur  $\theta_{si}$  kann mit folgenden Formeln berechnet werden:

$$\theta_{si} = \theta_i - U \cdot R_{si} \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (79)$$

$$\theta_{si} = \theta_i - \frac{R_{si}}{R_{si} + \sum R + R_{se}} (\theta_i - \theta_e) \quad (80)$$

Es bedeuten:

$\theta_i$ .....Innenlufttemperatur [ $^{\circ}C$ ]

$\theta_e$ .....Außenlufttemperatur [ $^{\circ}C$ ]

$\theta_{si}$ .....innere Oberflächentemperatur [ $^{\circ}C$ ]

$R_{si}$ .....Wärmewiderstandskoeffizientinnen [ $m^2K / W$ ]

$U$ .....Wärmedurchgangskoeffizient [ $W / m^2K$ ]

### Ursachen für Schimmelpilzbildung in Baukonstruktionen

Im Gegensatz zu der durch erhöhte Feuchtigkeit an Bauteiloberflächen bedingten Schimmelbildung, kann es im Bauteilinneren durch andere Ursachen zu erhöhter Materialfeuchte kommen. Durch fehlerhafte Ausführung von Abdichtungen, Drainagen oder WU-Beton kann durch das Erdreich aufsteigende Feuchtigkeit oder drückendes Wasser in das Bauteil eindringen und dort zu einem Schimmelpilzbefall führen. Auch bei ungedämmten Fundamenten kann es zu einer Auskühlung und somit zur Bildung von Tauwasser kommen. Des Weiteren sind defekte Dachabdichtungen und undichte Rohrleitungen ein Garant für erhöhte Feuchtigkeit im Bauteilinneren. In den Sommermonaten kann es außerdem durch Umkehrdiffusion zur Tauwasserbildung an der Dampfbremse kommen.

Um Schimmelbildung im Inneren von Bauteilen mit mehreren Schichten vorherzusagen, muss man sich den bereits erwähnten hygrothermischen Berechnungsverfahren bzw. einer dafür entwickelten Softwareapplikation (z.B. *WUFI*) bedienen. Über das Lösungsverfahren selbst wird in Kapitel 3-4.4 näher eingegangen.

# **KAPITEL 3: ANFORDERUNGEN UND BERECHNUNGSMETHODEN**

## 3-1 WÄRMESCHUTZ IM HOCHBAU (ÖNORM B 8110-2:2003)

### 3-1.1 ALLGEMEIN (15)

Aus der Alltagspraxis sind bauliche Folgeschäden durch erhöhte Kondensatbildung im Bauteilinneren und schwere bauphysikalische Mängel durch Wasserdampfkondensation an Bauteiloberflächen und der damit verbundenen Schimmelpilzbildung nur allzu gut bekannt. ÖNORM 8110-2 :2003 gibt, um solchen Funktionsminderungen von Gebäuden zu vermeiden, folgende Grundlagen und Hinweise:

- Grundlagen für den wasserdampfkondensatfreien Entwurf von Bauteilkonstruktionen an Innenwandoberflächen unter Beachtung des Schimmelpilzrisikos und ohne Bildung schädlicher Wasserdampfkondensation im Bauteilinneren.
- die Grundlagen zur Führung bauphysikalischer Nachweise der Gebrauchstauglichkeit von Baukonstruktionen mittels definierter Innenluftbedingungen laut Raumwidmung
- Nutzungshinweise zu Vermeidung zu feuchter Innenluftbedingungen

ÖNORM B 8110-2:2003 definiert den Kondensationsschutz im Hochbau als:

*„...alle baulichen Maßnahmen, die unter den kennzeichnenden Betriebsbedingungen des Innenraumes (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) und den maßgebenden Außenluftbedingungen (Temperatur und Luftfeuchtigkeit)*

- *eine solche Temperatur an der inneren Oberfläche der Außenbauteile sichern, dass*
  - (a) keine Wasserdampfkondensation erfolgt und*
  - (b) Schimmelbildung hintangehalten wird*
- *eine schädliche Wasserdampfkondensation im inneren von Außenbauteilen verhindern...“*

### 3-1.2 ANFORDERUNGEN (15)

Bauteile die an die Außenluft grenzen bzw. Bauteile die Räume mit verschiedenen Luftverhältnissen (Temperatur und relative Luftfeuchte) trennen, sind so zu bemessen, dass Kondenswasserbildung an der Innenseite von Oberflächen vermieden wird. Außerdem darf es auch im inneren von Bauteilen zu keiner schädlichen Wasserdampfkondensation, verursacht durch Wasserdampfdiffusion, kommen.

Das Eindringen von Raumluft in die Bauteilkonstruktion ist durch entsprechende Maßnahmen (konvektionsdichte Verklebung an Bauteilstößen) zu verhindern.

Des Weiteren darf die innere Oberflächentemperatur nicht unter die Taupunkttemperatur fallen, um somit Kondenswasserbildung zu vermeiden. Zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung darf die innere Oberflächentemperatur nicht unter jene Temperatur fallen, bei der die Innenluft 80% relative Feuchtigkeit erreicht.

Schädliches Kondensat liegt vor wenn:

- anfallendes Kondenswasser nicht mehr gespeichert werden kann
- der Feuchtigkeitsgehalt einer Bauteilschicht so stark erhöht wird, dass die Wärmedurchlasswiderstand um  $\geq 10\%$  verringert wird
- Kondensat die Baustoffe schädigt (Korrosion, Pilzbefall, Frostzerstörung). Des Weiteren ist für Holz und Holzwerkstoffe eine Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts um  $\geq 3\%$  unzulässig.
- in der Austrocknungsphase das angesammelte Kondenswasser nicht mehr vollständig austrocknen kann und dadurch eine fortlaufende Feuchtigkeitsanreicherung auftritt.

### 3-1.3 KLIMABEDINGUNGEN (15)

#### Innenluftbedingungen

Der bauphysikalischen Bemessung liegen durch die Raumwidmung festgelegte Innenluftbedingungen zu Grunde. Die Innenluftbedingungen von Wohnungen und Räumen mit ähnlicher Widmung werden wie folgt festgelegt:

- Die Innenlufttemperatur  $\theta_i$  beträgt  $20^\circ\text{C}$
- Die relative Feuchtigkeit der Innenluft wird in 2 Stufen eingeteilt.
  - 1.) Für die Bemessung zur Vermeidung von Kondensat:

$$t_e < \pm 0^\circ\text{C} \quad \varphi_i = 65 - |t_e| \quad (81)$$

$$\pm 0^\circ\text{C} < t_e < 10^\circ\text{C} \quad \varphi_i = 65 \quad (82)$$

$$ab + 10^\circ\text{C} \quad \varphi_i = 65 + (t_e - 10) \quad (83)$$

- 2.) Für die Bemessung zur Verminderung des Risikos von Schimmelbildung:

$$t_e < \pm 0^\circ\text{C} \quad \varphi_i = 55 - |t_e| \quad (84)$$

$$\pm 0^\circ\text{C} < t_e < 5^\circ\text{C} \quad \varphi_i = 55 \quad (85)$$

$$+5^\circ\text{C} < t_e < 10^\circ\text{C} \quad \varphi_i = 55 + (t_e - 5) \quad (86)$$

$$ab + 10^\circ\text{C} \quad \varphi_i = 55 + 1,5 * (t_e - 10) \quad (87)$$

#### Außenluftbedingungen

Der Planung sind die Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur zugrunde zu legen. Diese mittlere monatliche Lufttemperatur wird im Wesentlichen von der Seehöhe bestimmt, wobei Österreich nach der Klimatographie in sieben unterschiedliche Regionen eingeteilt wird und jede Region mit einem mittleren vertikalen Temperaturgradienten versehen wird. Die regionalen Unterschiede bestehen hier aus dem eher maritim beeinflussten Westen und dem kontinentalen Osten des Landes, dem nördlichen Alpenhauptkamm zwischen Föhngebieten und solchen ohne Föhneinfluss, durch die alpine zentrale Lage und die Beckenlandschaften im Süden bzw. die Hügellandschaften am Alpenostrand (siehe Abbildung 3.1).

ÖNORM B 8110-2:2003 verwendet für das angegebene Dreischichten-Regressionsmodells Koeffizienten,

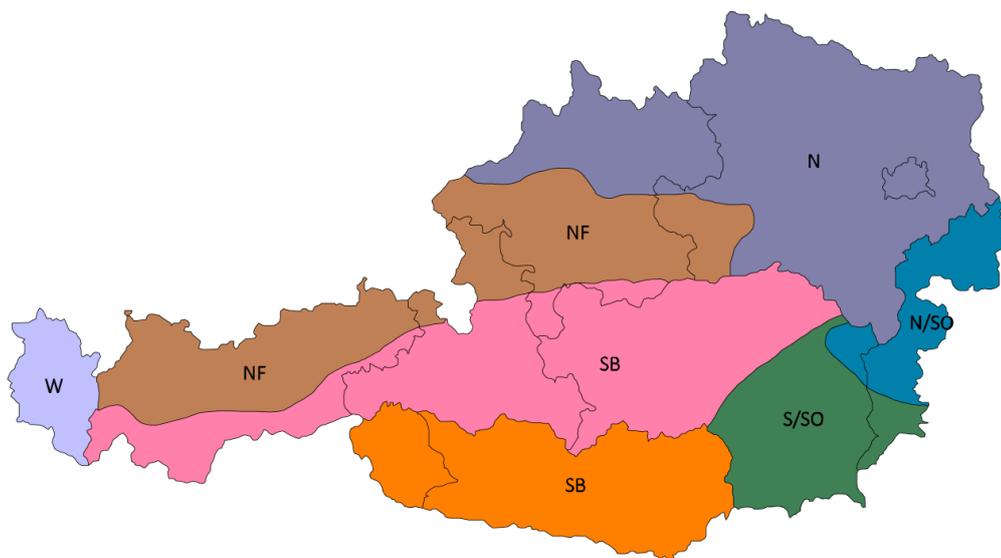


Abbildung 3.1: Temperaturregionen Österreichs

die aus Datensätzen der Lufttemperatur abgeleitet wurden, wobei die Daten aus Messungen zwischen 1961 und 1990 stammen. Innerhalb jeder Region wird zwischen drei Höhenlagen unterschieden (Dreischichtenmodell). In allen Fällen handelt es sich dabei um eine lineare Regression der Form

$$\theta = a + b \cdot H \tag{88}$$

Es bedeuten:

$\theta$ .....Monatsmittelwert [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$H$ .....Seehöhe in 100m [m]

$a, b$ .....Regressionskoeffizienten des Dreischichten- Regressionsmodells [-]

Beispiel:

Es soll die Außenlufttemperatur für ein Wohnhaus in Graz ermittelt werden. Graz liegt in der Zone S/SO auf einer Seehöhe von ca. 360 m. Tabelle 11 zeigt einen Auszug aus dem Regressionsmodell.

**Tab.: 11: Dreischichten-Regressionsmodell (15)**

Region Südost-südlicher Teil (S/SO)		Jan	Feb	März	April	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
Schicht 1 (unter 750m)	a	-1,014	1,616	5,898	11,038	15,595	18,797	20,384	19,767	16,023	10,519	5,106	1,088
	b	-0,423	-0,458	-0,521	-0,613	-0,602	-0,610	-0,597	-0,607	-0,495	-0,413	-0,486	-0,566
Schicht 2 (750m bis 1499m)	a	-2,377	0,955	5,575	10,697	15,291	18,475	19,971	19,201	15,572	9,919	4,048	-0,761
	b	-0,069	-0,292	-0,443	-0,534	-0,531	-0,533	-0,496	-0,466	-0,385	-0,264	-0,211	-0,081
Schicht 3 (ab 1500m)	a	4,306	5,056	8,576	12,727	17,504	20,902	23,084	22,546	19,627	15,011	8,872	5,006
	b	-0,528	-0,563	-0,641	-0,695	-0,707	-0,715	-0,704	-0,684	-0,645	-0,581	-0,544	-0,503

$$\theta = a + b \cdot H = -1,014 + (-0,423) * 360/100 = -2,50^{\circ}\text{C}$$

Mit Hilfe der Tabellen können nun für jeden beliebigen Punkt in Österreich das Monatsmittel der Lufttemperatur bis auf  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  genau ermittelt werden. Für eine generelle Bemessung sind jedoch die Werte der Regression SB (Beckenlandschaften im Süden) einzusetzen. Die relative Luftfeuchte kann dabei für alle Standorte mit 80% angesetzt werden, bis auf die Monate Mai, Juni, Juli, August mit 75%. Geht es um die Abschätzung des Risikos einer Kondenswasserbildung an Außenbauteilen mit geringer Speicherkapazität (z.B. Fenster und der Rahmen) sind als Außenlufttemperatur die durchschnittlichen Tagesmitteltemperaturen heranzuziehen.

### Erdberührte Außenwände

Bei erdberührten Außenwänden, die mehr als 1,5 m unter der Geländeoberkante liegen, und für erdberührte Fußböden ist eine fiktive Bodentemperatur  $\theta_B$  einzusetzen. Diese errechnet sich durch folgende Gleichung:

$$\theta_B = \frac{\theta_e + 12}{2} \text{ [}^{\circ}\text{C]} \tag{89}$$

Es bedeuten:

$\theta_B$ .....Bodentemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\theta_e$ .....Außentemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Jedoch darf hier maximal eine Temperatur von  $+12^{\circ}\text{C}$  angenommen werden.

### 3-1.4 BERECHNUNG ZUR VERMEIDUNG VON KONDENSATION AN DER INNEREN BAUTEILOBERFLÄCHE (15)

Zur Vermeidung von Kondenswasserbildung bzw. um das Risiko von Schimmelbildung zu minimieren, sind Außenbauteile so zu bemessen, dass die Oberflächentemperatur an der Innenseite nicht unter die Taupunkttemperatur bzw. die 80% relativer Feuchtigkeit entsprechende Temperatur absinkt. Diese Bemessung erfolgt mit dem in Kapitel 2-2.4.1 erläuterten Temperaturfaktor  $f_{RSi}$ .

### 3-1.5 BERECHNUNG DER KONDENSATION IM INNEREN VON BAUTEILEN

#### Verfahren nach Glaser (9)

Als einfaches, grafisches Verfahren zur Ermittlung des Kondensatausfalles bei Kühlhausdämmungen, unter stationären Bedingungen, wurde das sogenannte „Glaser-Verfahren“ entwickelt. Für Bauteile und Baustoffkombinationen, bei denen Sorptions- und Kapillareffekte eine untergeordnete Rolle spielen, hat sich dieses Verfahren durchaus bewährt. Im Allgemeinen liegt der damit ermittelte Feuchtegehalt weit unter jenem Wert, bei welchem ein kapillarer Feuchteausgleich einsetzt. Da die Verteilung der lokalen Feuchtigkeitsspitzen weder durch die sorptive Aufnahmefähigkeit, noch durch den kapillaren Feuchtetransport berücksichtigt wird, liegen die Ergebnisse auf der sicheren Seite.

Stellt man nun die einzelnen Schichten anstatt ihres Dickenverhältnisses, entsprechend ihren äquivalenten Luftschichtdicken dar, verläuft der Partialdampfdruck in geschichteten Bauteilen linear. Sind die Wasserdampfpartialdrücke an beiden Seiten bekannt, kann durch lineare Verbindung dieser Partialdrücke  $p_i$  und  $p_e$ , der Verlauf des Wasserdampfpartialdruckes ermittelt werden. Das Glaserverfahren wurde zwar schon 1958 entwickelt, jedoch stellt es bis heute noch immer den Stand der Technik dar. Damit ein Verfahren den anerkannten Regeln der Technik entspricht, muss es allgemein bekannt sein, theoretisch richtig in Normen dokumentiert und anhaltend praktisch bewährt sein. Diese Bedingungen erfüllt das Verfahren nach Glaser im Vergleich zu moderneren Methoden wie zum Beispiel instationären Simulationen mittels geeigneter Softwareapplikationen.

Beispiel:

Um die Lage des Taupunktes innerhalb einer Konstruktion zu bestimmen ist es zunächst notwendig, die Temperaturverteilung zu bestimmen. Dazu muss zuerst der U-Wert berechnet werden. Anschließend erfolgt die Temperaturberechnung für die einzelnen Schichten mit nachstehenden Formeln.

$$t_{0/1} = t_i - U \cdot R_{si} \cdot (t_i - t_e) [^{\circ}\text{C}] \quad (90)$$

$$t_{1/2} = t_{0/1} - U \cdot \frac{d_1}{\lambda_1} \cdot (t_i - t_e) [^{\circ}\text{C}] \quad (91)$$

Die Berechnung erfolgt dabei von Schicht zu Schicht fortschreitend. Mit der ermittelten Temperaturverteilung kann der Sättigungsdampfdruck (z. B. aus einer Tabelle) bestimmt werden. Tabelle 12 zeigt die Berechnungstabelle mit dem U-Wert, der Temperaturverteilung und dem zugehörigen Sättigungsdampfdruck.

Im nächsten Schritt wird mit diesen Daten ein Diagramm erstellt. Auf der Abszisse werden Bauteilschichten entsprechend ihrer wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken ( $S_d$ -Werte) aufgetragen. Die linke Ordinate repräsentiert den Sättigungsdampfdruck und die rechte die Oberflächentemperatur.

Nun kann das Temperatur- und das Sättigungsdampfdruckprofil eingezeichnet werden. Des Weiteren werden die Wasserdampfpartialdrücke  $p_i$  und  $p_e$  eingetragen und linear miteinander verbunden, da sich der Dampfdruck in den einzelnen Schichten linear mit der Wandtiefe ändert, sofern die Diffusionszahlen in den Schichten als temperaturunabhängig betrachtet werden.

Die Wasserdampfpartialdrücke errechnen sich wie folgt.

Innen: Lufttemperatur 20°C, relative Luftfeuchtigkeit 50%

$$p_i = p_{s,20^\circ C} \cdot \varphi_i = 2337 \cdot 0,50 = 1169 \text{ [pa]} \quad (92)$$

Außen: Lufttemperatur -10°C, relative Luftfeuchtigkeit 80%

$$p_e = p_{s,-10^\circ C} \cdot \varphi_i = 259 \cdot 0,80 = 207 \text{ [pa]} \quad (93)$$

Es bedeuten:

$p_i$ .....Wasserdampfpartialdruck innen [pa]

$p_e$ .....Wasserdampfpartialdruck außen [pa]

$p_s$ .....Sättigungsdampfdruck [pa]

$\varphi_i$ .....relative Luftfeuchte [%]

Wenn die lineare Verbindung zwischen den Schichten möglich ist, ohne den Polygonzug des Sättigungsdampfdruckes zu schneiden, entspricht der theoretische lineare Wasserdampfdruck dem tatsächlichen. In diesem Fall kommt es in keiner Schicht zu Kondenswasserbildung und der Bauteilnachweis gilt als erbracht.

Wenn hingegen die Verbindung der beiden Dampfdruckwerte den Polygonzug schneidet, muss der tatsächliche Dampfdruckverlauf durch Tangentenbildung ermittelt werden. Eine geeignete Methode stellt die sogenannte „Seilregel“ dar. Dazu stellt man sich ein gespanntes Seil, ausgehend von  $p_i$  und  $p_e$  vor, welches sich zum einen Teil an die Knickpunkte des Sättigungsdampfdruckprofils anschmiegt und zum anderen Teil geradlinig und berührungsfrei verläuft. An den Berührungsstellen entsteht Bauteilkondensat und die weitere Beschreibung wird in Folge für diese Konstruktionsebene vorgenommen. Die Nachweise sind allerdings für alle Konstruktionsebenen zu führen.

**Tab.: 12: Berechnungstabelle**

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$s_d = \mu \cdot d$	$\lambda$	$R, R_{si}, R_{se}$	$U = 1/R$	$\Theta$	$P_s$
		m		m	W/(m*k)	$m^2 \cdot (K/W)$	$1/m^2 \cdot (K/W)$	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,13		19,4	2252
1	Holzverkleidung	0,020	50,0	1	0,110	0,182	5,500	18,6	2142
2	Hinterlüftung	0,020	-	-	0,133	0,150	6,650	17,9	2050
3	Luft	0,025	-	-	0,026	0,954	1,048	13,6	1557
4	diffusionsoffene Folie	0,002	0,1	0,0002	0,230	0,009	115,000	13,5	1547
5	Steinwolle	0,050	1,0	0,05	0,040	1,250	0,800	7,9	1065
6	Steinwolle	0,075	1,0	0,075	0,040	1,875	0,533	-0,6	581
7	Brettsper Holz	0,090	70,0	6,3	0,120	0,750	1,333	-4,0	437
8	Steinwolle	0,050	1,0	0,05	0,040	1,250	0,800	-9,7	266
9	Gipsfaserplatte	0,010	13,0	0,13	0,320	0,031	32,000	-9,8	264
	Wärmeübergang außen					0,04		-10	259
	gegeben		$\sum S_d =$	7,605	RT =	6,621			
	berechnet				1/RT =	0,151			

Im Diagramm ist ersichtlich, dass der theoretische Wasserdampfdruck (dreimal) den Sättigungsdampfdruck schneidet. Dies bedeutet, dass die Kondenswasserbildung zwischen den Schichten S5 und S8 stattfinden wird. Die Schichten S2 und S3 sind Luftschichten und weisen keinen  $S_d$ -Wert auf, weshalb sie hier auch nicht dargestellt werden. Trägt man nun die Seillinie ein, wird der Berührungspunkt erkennbar, an dem sich das Tauwasser bilden wird. Dieser liegt im Schichtübergang zwischen den Schichten S6 und S7. Mit dem Glaserverfahren kann auch die anfallende Kondensatmenge bestimmt werden. Dies erfordert jedoch ein Kondensatmengen-Jahresbilanz-Diagramm für den jeweiligen Standort, welches für eine weitere Berechnung nicht erstellt wurde, da dieses Beispiel nur exemplarisch das prinzipielle Vorgehen zeigen soll.

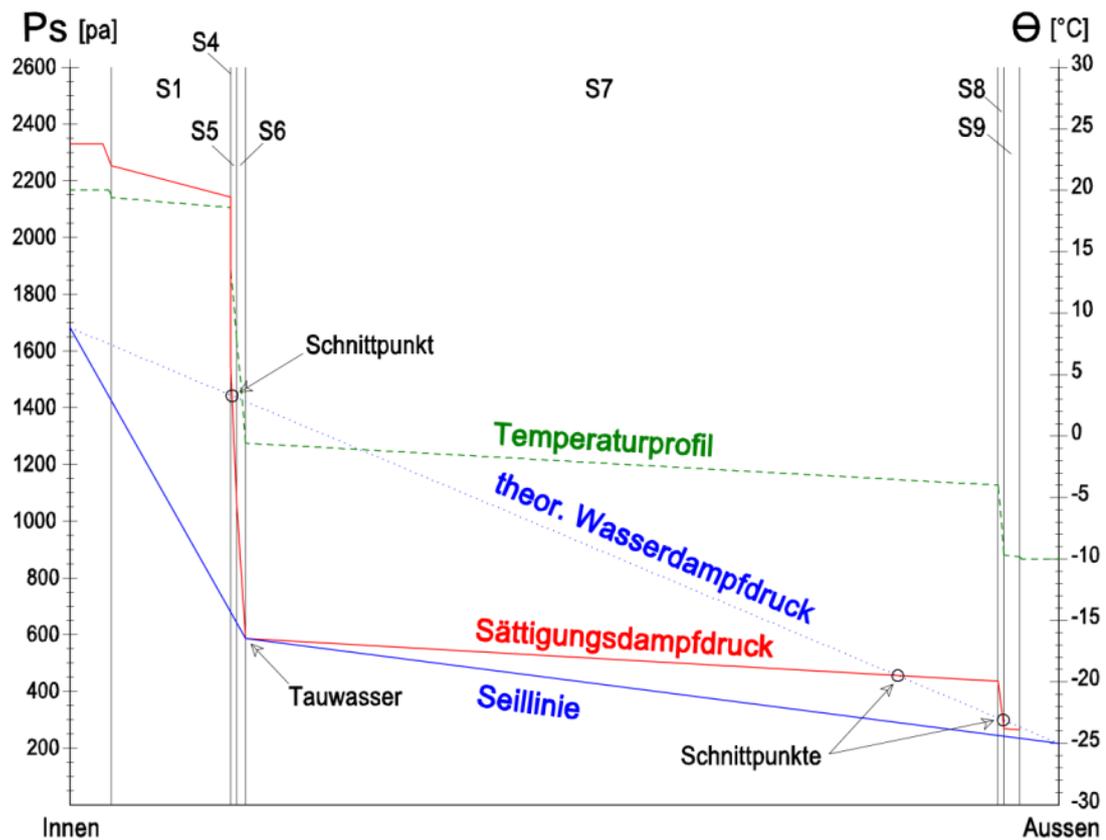


Abbildung 3.2: Glaserdiagramm

## 3-2 . WÄRMEBRÜCKEN (ÖNORM EN ISO 10211)

### 3-2.1 MODELLHAFTE ABBILDUNG DER KONSTRUKTION (27)

#### 3-2.1.1 Allgemeines

Laut ÖNORM EN ISO 10211 sind Wärmebrücken Bereiche in einer Gebäudehülle, in denen der sonst gleichförmige Wärmedurchlasswiderstand verändert wird. Auf welche Weise dies geschehen kann und wie die rechnerische Erfassung erfolgt ist in Kapitel 2-1.7 beschrieben. In diesem Kapitel wird lediglich auf die Modellierung, Eingabedaten und Berechnungsverfahren eingegangen. Da sich diese Arbeit ausschließlich mit ein- und zweidimensionalen Wärmebrücken beschäftigt, wird in weiterer Folge auf Erläuterungen von dreidimensionalen Wärmebrücken verzichtet.

#### 3-2.1.2 Begriffe

Zweidimensionale Wärmebrücken werden auch linienförmige Wärmebrücken genannt, da diese einen einheitlichen Querschnitt in eine der drei orthogonalen Achsen aufweisen. Ein zweidimensional-geometrisches Modell ist also ein von Bauplänen abgeleitetes geometrisches Modell, in welchem sich eine der senkrecht zu den orthogonalen Achsen geführten Querschnitte innerhalb der Grenzen des Modells nicht ändert. Bauteile können dabei auch von anderen Bauteilen flankiert werden und werden dann als zweidimensional-flankierendes Element bezeichnet. Die Grenzen solcher Modelle werden durch Schnittebenen festgelegt, die das Modell von der restlichen Konstruktion trennen.

#### 3-2.1.3 Regeln für die modellhaft Abbildung

Im Allgemeinen ist es unmöglich, ein komplettes Gebäude mit einem einzigen geometrischen Modell naturgetreu abzubilden. Um diese Problematik zu umgehen, behilft man sich mit Schnittebenen die es erlauben, ein vollständiges Gebäude in einzelne Teilabschnitte zu unterteilen. Dies muss allerdings so erfolgen, dass sämtliche Differenzen in den Berechnungsergebnissen zwischen dem unterteilten Gebäude und dem als Ganzen betrachteten Gebäude vermieden werden. In den folgenden Abbildungen sind die Schnittebenen für einige Modelle dargestellt, wobei diese rot eingezeichnet wurden. Der Mindestabstand zur Schnittebene beträgt demnach entweder das 3-fache des flankierenden Bauteiles oder ein Meter.

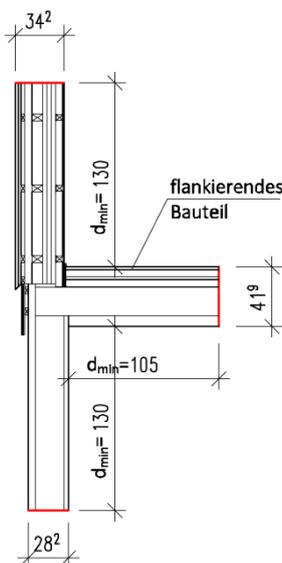


Abbildung 3.6: Modell Sockel

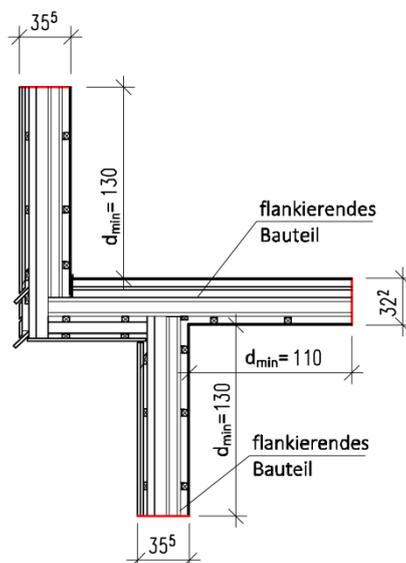


Abbildung 3.5: Modell Auskragung

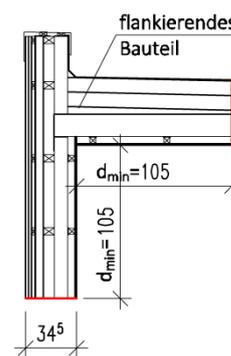


Abbildung 3.3: Modell Flachdach

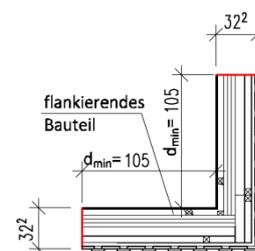


Abbildung 3.4: Modell Außenecke

## 3-2.2 EINGABE- UND AUSGABEDATEN (27)

### 3-2.2.1 Eingabedaten

Bauphysikalische Analysen von Gebäuden sollten in Form eines Berichtes zusammengefasst werden und müssen folgendes enthalten:

- (a) Beschreibung der Konstruktion
  - Konstruktionspläne, inklusive aller Maße und Materialien
  - für bereits bestehende Gebäude sämtliche konstruktiven Änderungen und/oder Ergebnisse von physikalischen Messungen und Detailergebnisse von Kontrollen
  - Sonstige relevante Bemerkungen
- (b) Beschreibung des geometrischen Modells
  - 2-D-Modell mit Maßen
  - Eingabedaten (Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Materialien)
  - Randbedingungen (Temperatur)
  - Wärmeübergangswiderstände und jene Oberflächen für die sie gelten
  - gegebenenfalls durchgeführte Maßkorrekturen
  - Angabe aller quasihomogenen Schichten
  - sonstige verwendete nicht genormte Werte und Begründung für deren Verwendung

### 3-2.2.2 Ausgabedaten

Die folgenden Berechnungsergebnisse sind als von den Temperatur-Randbedingungen unabhängige Werte anzugeben:

- der thermische Leitwert  $L_{2D}$  zwischen zwei benachbarten Räumen, sofern diese den Wärmedurchgang beeinflussen
- der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient  $\Psi$  der linienförmigen Wärmebrücke unter Angabe, ob Innen- oder Außenmaße verwendet wurden
- der Temperaturfaktor  $f_{RSi}$  für jene Punkte mit der niedrigsten Oberflächentemperatur in jedem beteiligten Raum (einschließlich der Lager dieser Punkte)

## 3-3 ANFORDERUNGEN AN DEN FEUCHTIGKEITSSCHUTZ (ÖNORM B 2320:2010)

---

### 3-3.1.1 Allgemeines (28)

Grundlegendes zum Feuchteschutz wurde schon in Kapitel 2-2 behandelt. In diesem Kapitel wird daher nur auf normative Anforderungen bezüglich des Feuchtigkeitsschutzes und im speziellen auf das Thema Schlagregen eingegangen.

Dem Feuchtigkeitsschutz ist im Holzbau größte Aufmerksamkeit zu schenken, um die Dauerhaftigkeit von Holzkonstruktionen zu gewährleisten. Ebenso sind erhöhte Feuchtigkeitsschwankungen aufgrund des hygroskopischen Verhaltens, also dem Bestreben Feuchtigkeit aus der Umgebung aufzunehmen, zu vermeiden. Feuchtigkeitsschwankungen können sehr rasch zu Quell- und Schwinderscheinungen führen und somit ungewollte Verformungen oder auch eine Zerstörung des Holzes hervorrufen.

### 3-3.1.2 Feuchtigkeit aus dem Baugrund (28)

Da Holz und Holzwerkstoffe laut (28) niemals mit dem Erdreich in Berührung kommen dürfen, müssen Wohnhäuser aus Holz immer auf geeignete Unterbauten gestellt werden. Solche Unterbauten können beispielsweise gemauert oder auch betoniert werden. Dabei ist, unter Berücksichtigung der Geländeform und der Lage des Bauplatzes, stets eine Sockelhöhe von 30 cm sicherzustellen. Dieses Maß darf nur unter gewissen Vorkehrungen (z.B. Drainage, Verblechungen, Dachvorsprünge) zum Schutze des Holzes unterschritten werden. Unumgänglich ist dabei ein Mindestmaß von 10 cm zum Erdreich und 5 cm zur wasserführenden Schicht. Bei Ausführungen mit Fußschwelle, darf diese nicht unter dem Außenniveau eingebaut werden, außer die wasserführende Schicht wird lokal abgesenkt und ein Wasserabtransport gesichert. Abbildung 3.7 bis Abbildung 3.12 zeigen verschiedene empfohlenen Ausführungsvarianten nach (28).

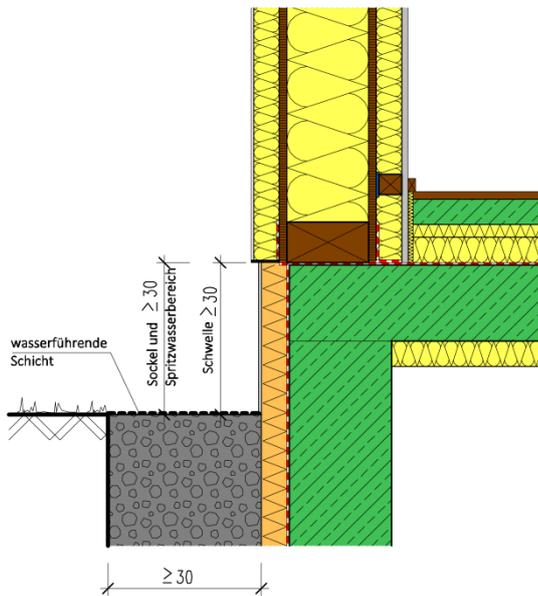


Abbildung 3.7: Variante „Standardausführung“

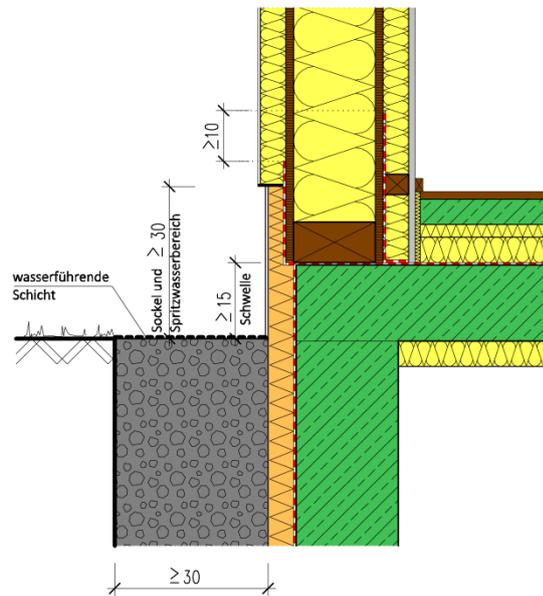


Abbildung 3.8: Variante „reduzierte Höhe“

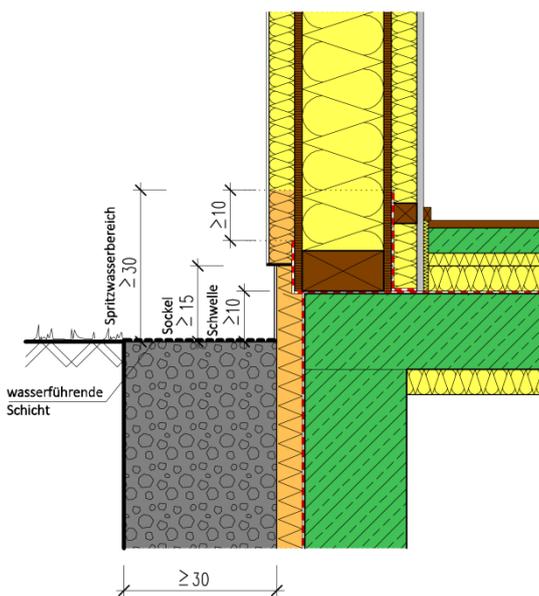


Abbildung 3.9: Variante „Mindesthöhe“

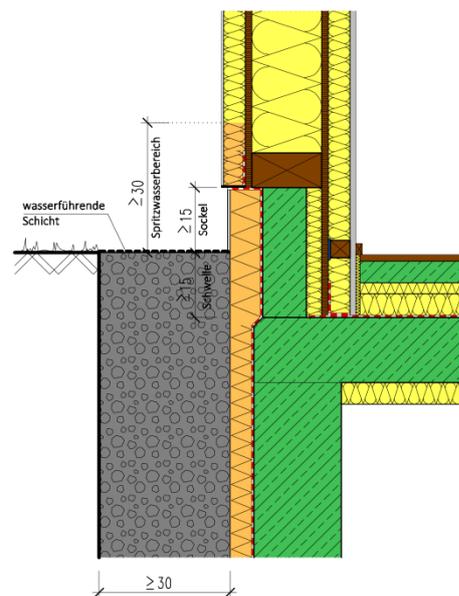


Abbildung 3.10: Variante „Betonsockel“

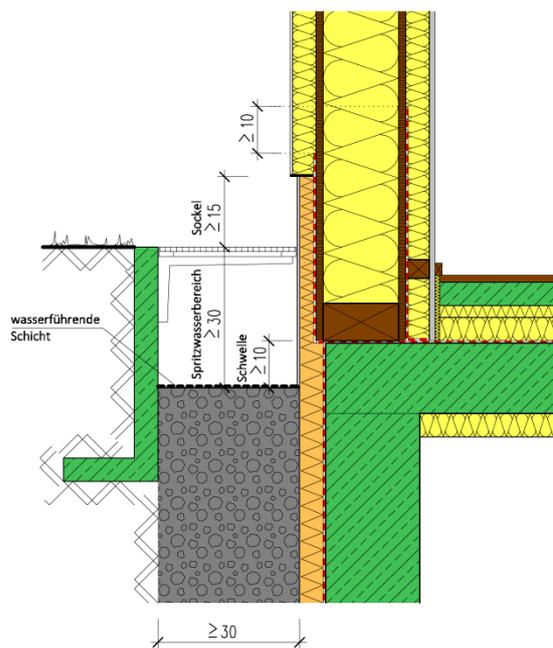


Abbildung 3.11: Variante „Gitter“

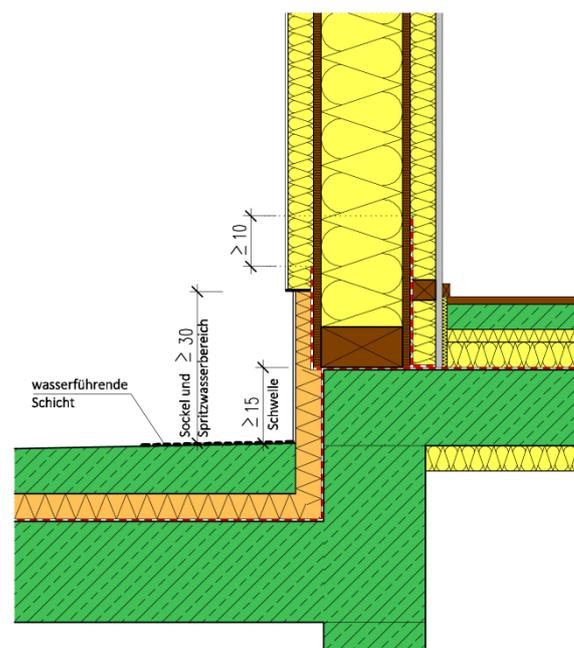


Abbildung 3.12: Variante „abgesetzte Decke“

### 3-3.1.3 Niederschlagswasser (28)

Niederschlagswasser ist durch Dachrinnen und Fallrohre bzw. Speier direkt und wirksam abzuleiten. Speziell an der Wetterseite liegende Wände, sind besonders vor Niederschlagswasser zu schützen, wobei das anfallende Wasser rasch und zur Gänze abzuführen ist. Aus diesem Grund sollte man bei Fassaden wasserableitende Profilierungen ausbilden. Wandkonstruktionen sind so auszubilden, dass aus den Umfassungswänden herausragende Bauteile wie z.B. Balkone, Wintergärten, Deckenauskragungen sowie Durchdringen und Elektroinstallationen ein Eindringen von Regenwasser in die Wandkonstruktion ausgeschlossen ist. Weiters sind Wetterschenkel, Gesimse, Sohlbänke und Fensterbänke mit einer Neigung von min. 5° nach außen auszuführen. Bauteilanschlüsse, Fenster- und Türanschlüsse müssen ebenfalls gegen das Eindringen von Wasser, auch bei Winddruck, geschützt werden.

### 3-3.1.4 Schlagregen (29)

#### Schlagregen: Definition

Als Schlagregen bezeichnet man jenen Regen, der durch den zur selben Zeit auftretenden Wind aus seiner lotrechten Fallrichtung gebracht wird und dadurch auf vertikale Oberflächen „schlagen“ kann.

#### Einwirkung des Schlagregens auf Fassaden

Das Verhalten von Außenbauteilen in Bezug auf die Feuchtigkeit wird stark durch die schlagregenbedingte Wasseraufnahme der Oberflächen beeinflusst. Schlagregen kann zu einer erhöhten Baustofffeuchte führen und so die Baustoffverwitterung bzw. –schädigung vorantreiben. Außerdem wird dadurch auch die Wärmedämmung indirekt beeinflusst, da sich mit steigender Feuchte die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  erhöht und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  sinkt (siehe Kapitel 2-2.1.2). Die Ausbildung einer Fassade sollte sich daher nach der standortabhängigen Schlagregenbelastung richten.

Ausschlaggebend für die Schlagregenbelastung ist nicht nur die Niederschlagsmenge, sondern vor allem die Niederschlagsdauer. Bei einer schwächeren, aber länger andauernden Regenbelastung nimmt ein

poröser Baustoff mehr Wasser auf als bei einer kürzeren, da überschüssiges Niederschlagswasser von der Fassade abprallen oder ablaufen kann.

### Näherungsweise Ermittlung der Schlagregenbelastung

Auswertungen von Wetterdaten haben gezeigt, dass sie Umströmungsverhältnisse eines Gebäudes, unabhängig von den Witterungsverhältnissen, ähnliche Muster aufweisen. Die Schlagregenbelastung kann somit mit nachstehender Formel abgeschätzt werden.

$$R_S = r_S \cdot v \cdot R_N \quad (94)$$

Es bedeuten:

$R_S$  ..... Schlagregen senkrecht zur Gebäudeoberfläche [mm / h]

$R_N$  ..... Normalregen [mm / h]

$v$  ..... Widgeschwindigkeit senkrecht zur Gebäudeoberfläche [m / s]

$r_S$  ..... positionsabhängiger Proportionalitätsfaktor [s / m]

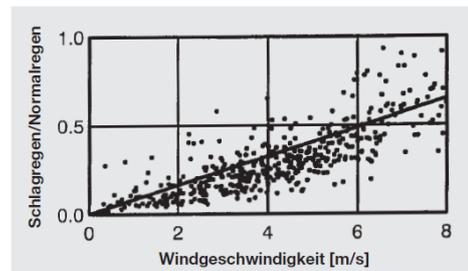


Abbildung 3.13: Schlagregenbelastung in Abh. der Widgeschwindigkeit (29)

Die Schwierigkeit zur Abschätzung der Schlagregenbelastung liegt nun in der Bestimmung von  $r_S$ . Dieser Proportionalitätsfaktor  $r_S$  ist abhängig von der Position der betreffenden Stelle am Gebäude. Abbildung 3.14 zeigt den Zusammenhang zwischen Schlagregenbelastung und Position und die sich daraus ergebenden Unterschiede am Beispiel einer Hochhausfassade.

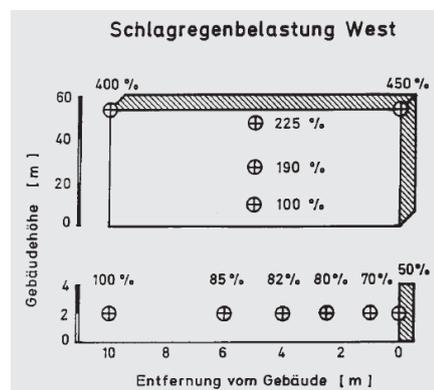


Abbildung 3.14: Schlagregenbelastung an einer Hausfassade (29)

Der Proportionalitätsfaktor  $r_S$  sollte im besten Fall immer vor Ort bestimmt werden, da dieser stark variieren kann. Sollte eine solche Bestimmung nicht möglich sein, muss  $r_S$  abgeschätzt werden. Bei Gebäuden mit eher unbeeinflusster Position (z.B. freistehende) kann  $r_S$  mit 0,2 [m/s] angenommen werden. Befindet sich das Gebäude jedoch an einer weniger exponierten Stelle sollte mit  $r_S = 0,07$  [m/s] gerechnet werden.

### Abhängigkeit des Schlagregens von der Jahreszeit (30)

Messungen über mehrere Jahre, in Graz und am Schöckl, haben gezeigt, dass die Schlagregenhäufigkeit in den Sommermonaten ab Juni stark zunimmt. Die Schlagregenhäufigkeit ist jedoch abhängig von den zuvor angenommen Grenzwerten. Im konkreten Fall betragen diese für den Grenzwert der Niederschlagsmenge 4,5 [mm/h] und für die Widgeschwindigkeit 8 [m/s]. Abbildung 3.15 und

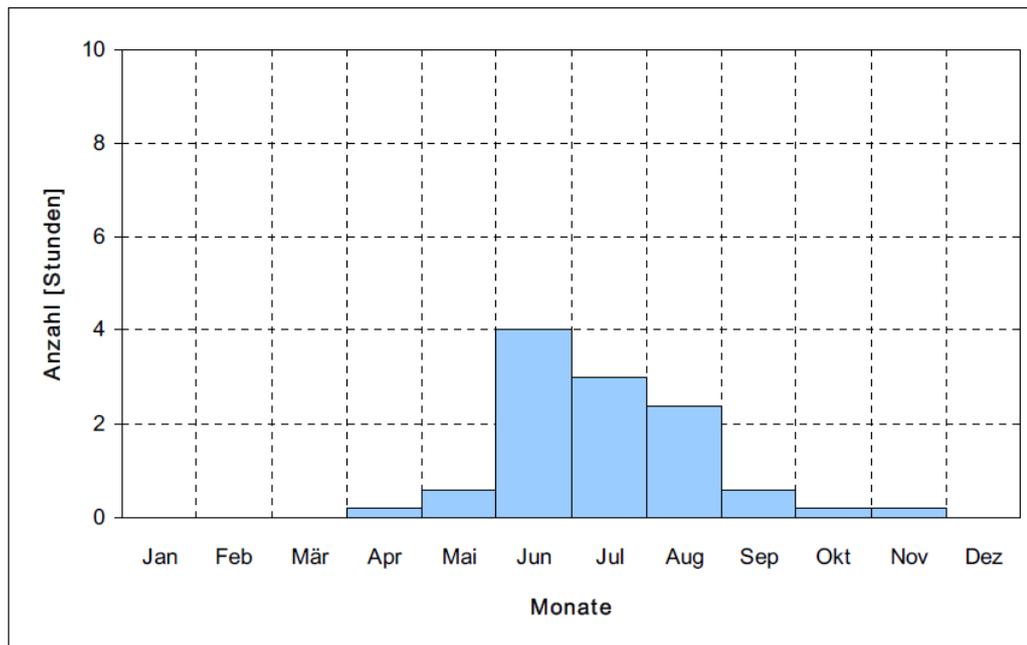


Abbildung 3.15: Durchschnittliche Zahl der Stunden mit Schlagregen, Graz 1996 – 2000 (ZAMG)

Abbildung 3.16 zeigen den durchschnittlichen Jahresverlauf der beobachteten Standorte Graz und

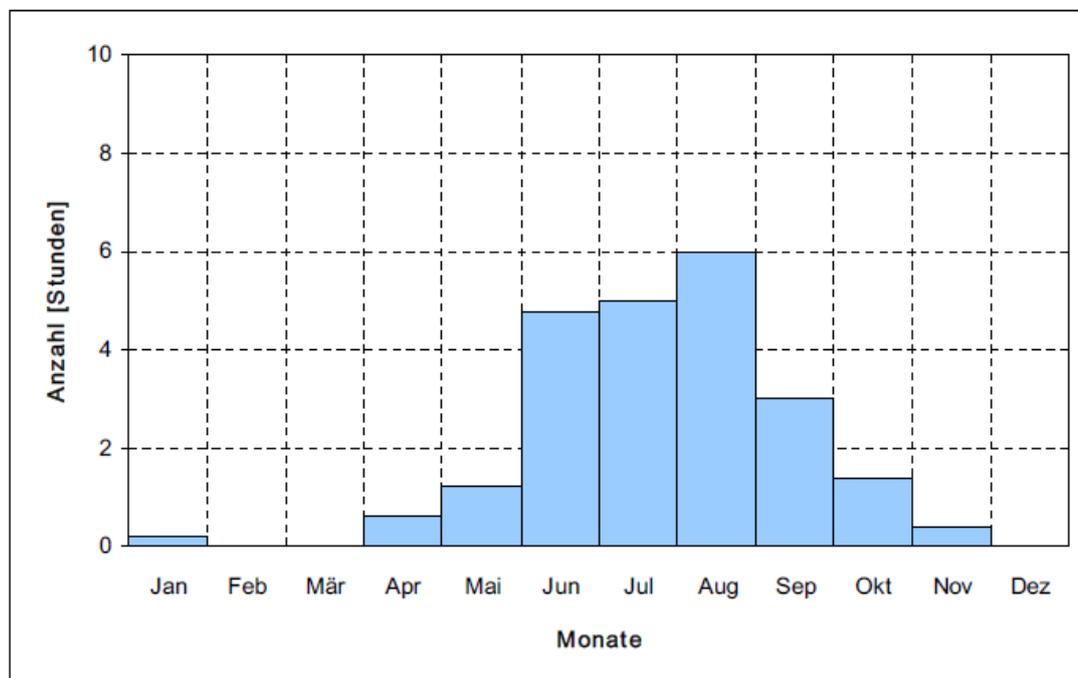


Abbildung 3.16: Durchschnittliche Zahl der Stunden mit Schlagregen, Schöckl 1996 – 2000 (ZAMG)

Schöckl.

## 3-4 BERECHNUNGSMETHODEN

### 3-4.1 ALLGEMEINES

Meist stehen bei thermischen Berechnungen die zu erwartenden Wärmeverluste im Vordergrund, da diese einerseits als Grundlage zur Dimensionierung der Heizungsanlage dienen und andererseits, um mit einem dementsprechenden Wärmeschutz die normativen Nachweise zu erfüllen. Derartige Berechnungen finden im Allgemeinen unter stationären Bedingungen (siehe Kapitel 3-4.2) statt. Das bedeutet, dass die Wärmemenge, die durch ein Bauteil strömt, über die Zeit konstant bleibt. Aber auch die Berechnung von Oberflächentemperaturen im Hinblick auf Oberflächenkondensat und Schimmelpilzbildung ist von großer Bedeutung. Bei zu geringen Oberflächentemperaturen kann es zu einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur kommen und somit zum Kondensatausfall. Aber auch eine zu hohe relative Luftfeuchte kann dazu führen.

Solange die Oberflächentemperaturen in ungestörten Bereichen interessieren, sind solche Berechnungen ohne großen Aufwand zu bewerkstelligen. In Bereichen von Wärmebrücken kommt es allerdings zu mehrdimensionalen Wärme- und Feuchtetransportvorgängen die eine numerische Lösung der Transportgleichungen erfordern. Dies kann mit Hilfe von verschiedenen Softwareapplikationen wie *THERM*, *HTFlux* oder *WUFI* erfolgen.

Numerische Verfahren verlangen eine Diskretisierung des betrachteten Objektes, wobei hier eine Reihe von Regeln, zur Aufstellung eines Systems von Gleichungen, zu beachten sind. Diese Gleichungssysteme können mittels des finiten Element-, finiten Differenz-, oder Wärmebilanzverfahrens gelöst werden.

### 3-4.2 STATIONÄRE UND INSTATIONÄRE WÄRMELEITUNG (9)

Grundsätzlich unterscheiden sich stationäre und instationäre Berechnungen durch zeitlich konstante bzw. veränderliche Randbedingungen. Für den 1-dimensionalen Wärmetransport kann im stationären Zustand die Wärmestromdichte, unter Berücksichtigung aller Transportmechanismen, relativ einfach mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$q_x = \lambda_x \cdot \left(-\frac{dT}{dx}\right) [W / m^2] \quad (95)$$

Es bedeuten:

$q_x$ .....Wärmestromdichte  $[W / m^2]$

$\lambda_x$ .....Wärmeleitfähigkeit in  $x$ -Richtung  $[W / mK]$

$-\frac{dT}{dx}$ .....Temperaturgefälle in  $x$ -Richtung  $[-]$

Dieser eindimensionalen und stationären Wärmeleitung sind zwei Festlegungen zugrunde gelegt. Zum einen ist das Verhältnis von Objektlänge zu Objektstärke sehr groß und es kann von einem Wärmestrom in Dickenrichtung ausgegangen werden. Zum Anderen führen die zeitlich unveränderten Randbedingungen zu einem konstanten Temperaturgefälle.

Man kann sich nun aber leicht vorstellen, dass solche gleichbleibenden Randbedingungen im Allgemeinen nicht gegeben sind, sondern sich je nach Tageszeit (Innenraumklima) und Jahreszeit (Außenklima) ständig ändern. In Abbildung 3.17 sind die instationären Einflussgrößen auf das Wärmeverhalten eines Bauteiles schematisch dargestellt.

Die instationären Randbedingungen setzen sich wie folgt zusammen:

- veränderliche Solarstrahlung und Außenlufttemperatur im Tagesgang
- variable interne Wärmequellen im Tagesgang
- unterschiedliches Lüftungsverhalten
- unterbrochener Heizbetrieb (Nachtabstaltung oder -absenkung)

Durch diese veränderlichen Einflüsse ist es notwendig, den Wärmetransport unter Berücksichtigung des Wärmespeicherterms zu beschreiben. Für die 1-dimensionale Form der Fourier'schen Differenzialgleichung ohne Quellterm gilt:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (96)$$

Die Lösung dieser Differenzialgleichung bildet eine gedämpfte Sinusschwingung in nachstehender Form:

$$T_{(x,t)} = \theta_m + (\theta_{\max} - \theta_m) \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t}} \cdot x} \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{\theta} \cdot t - x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t}} \right) \quad (97)$$

Es bedeuten:

$T_{(x,t)}$  ..... Phasenlänge [z.B. 24h]

$\theta_m$  ..... mittlere Temperatur [K]

$\theta_{\max}$  ..... maximale Temperatur [K]

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$  ..... Temperaturleitzahl [ $m^2 / s$ ]

### 3-4.3 STATIONÄRER UND INSTATIONÄRER WASSERDAMPFTRANSPORT (14)

Bei zeitlich unveränderlichen Bedingungen, also in einem zeitlich konstanten Wasserdampffeld, wird der Diffusionsvorgang durch das „1.Fick'sche Gesetz“ beschrieben.

$$g = -D \cdot \left( \frac{\Delta v}{\Delta x} \right) \quad (98)$$

Es bedeuten:

$D$  ..... Diffusionskoeffizient [ $m^2 / h$ ]

$\frac{\Delta v}{\Delta x}$  ..... Konzentrationsgefälle [ $g / m^2$ ]

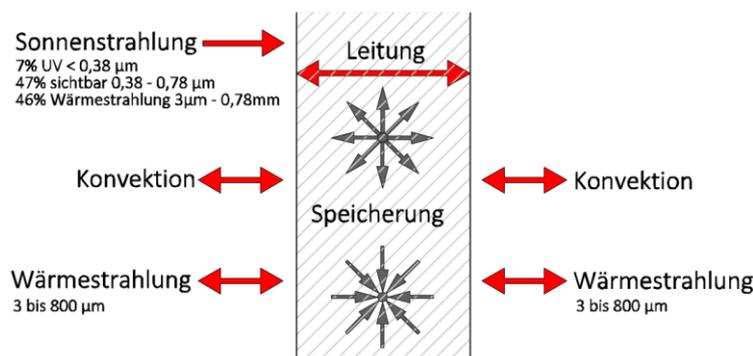


Abbildung 3.17: Einflussgrößen auf das Wärmeverhalten (14)

Das Konzentrationsgefälle gibt die Änderung der volumenbezogenen Luftfeuchte längs des Weges  $x$  an. Der Diffusionskoeffizient  $D$  steht für Durchlässigkeit eines Mediums gegenüber den darin diffundierenden Teilchen.  $D$  hängt also nicht nur von der Art des Mediums ab, sondern auch von der Art der diffundierenden Teilchen.

Für das Bauwesen sind folgende Varianten der Diffusion von Bedeutung:

- Wasserdampfdiffusion
- Effusion
- Lösungsdiffusion

### Wasserdampfdiffusion

Grundlegend wurde auf den Vorgang der Wasserdampfdiffusion schon in Kapitel 2-2.3.3 eingegangen. An dieser Stelle wird deswegen nur Ergänzendes zur Berechnung der Dampfdiffusion behandelt.

Beim Diffundieren von Wassermolekülen entspricht der dabei zurückgelegte Weg einem polygonartigen Linienzug, wobei die Knickpunkte dabei den Ort eines Zusammenstoßes mit anderen Teilchen bzw. mit Bauteilgrenzen darstellen. Der Abstand zwischen diesen Knicken wird als „mittlere freie Weglänge  $\bar{\lambda}$ “ bezeichnet (siehe Abbildung 3.18). Sie ist sowohl von der Temperatur als auch vom Gesamtdruck abhängig, und wird mit fallender Temperatur und steigendem Druck kleiner. Bei einer Lufttemperatur von  $20^\circ\text{C}$  und unter Atmosphärendruck (1 bar) beträgt die Weglänge  $\bar{\lambda} = 40 \text{ nm}$ .

### Effusion

In Baustoffen mit Poren deren Durchmesser kleiner ist als die freie Weglänge, ist der Widerstand durch Zusammenstöße mit den Bauteilgrenzen größer als jener Widerstand der durch Zusammenstöße mit anderen Molekülen verursacht wird. Ist dies der Fall, spricht man von Effusion. Die Massenstromdichte  $g$  die dabei auftritt, wird durch folgende Beziehung beschrieben, wenn man voraussetzt, dass die Poren eine kreiszylindrische Form mit dem Durchmesser  $2 \cdot r$  besitzen.

$$g = \left( \frac{8}{3} \cdot r \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \rho \cdot R}} \cdot \sqrt{\frac{M}{T}} \right) \cdot \frac{dp}{dx} = E \cdot \frac{dp}{dx} \quad (99)$$

Es bedeuten:

- $r$ .....Porendurchmesse [nm]  
 $R$ .....universelle Gaskonstante [8,315 kJ / (kmol \* K)]  
 $M$ .....relative Molmasse [g]  
 $T$ .....thermodynamische Temperatur [K]  
 $E$ .....Effusionskoeffizient [-]

### Lösungsdiffusion

Die Bewegung kleiner Teilchen in einem flüssigen oder quasi-flüssigen Medium in dem sie gelöst sind, bezeichnet man als Lösungsdiffusion. Die mittlere freie Weglänge beträgt bei dieser Art der Diffusion ungefähr dieselbe Größe wie die Teilchendurchmesser des Lösungsmittels. In Abbildung 3.18 sind die drei verschiedenen Diffusionsarten schematisch dargestellt.

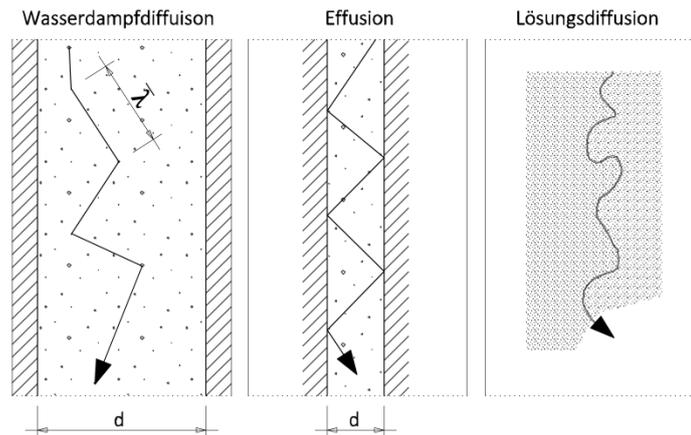


Abbildung 3.18: Diffusionsarten (14)

### 3-4.3.1 Transportgesetz der Wasserdampfdiffusion (14)

Wie in Kapitel 3-4.2 erläutert, kennzeichnet der Diffusionskoeffizient  $D$  im 1. Fick'schen Gesetz die Durchlässigkeit gegenüber durchdiffundierenden Teilchen, wobei der Zahlenwert den Betrag der Massenstromdichte bei einem Konzentrationsgefälle von „1“ angibt. Wendet man Gleichung (97) in ruhender Luft an, so wird der Diffusionskoeffizient derjenige für Wasserdampf in Luft zu  $D_0$ .

$$g = D_0 \cdot \left( \frac{\Delta v}{\Delta x} \right) \quad (100)$$

Es bedeutet:

$D_0$ .....Diffusionskoeffizient für Wasserdampf in Luft [–]

Die Beweglichkeit der Wassermoleküle in Luft steigt mit der Zunahme der Temperatur und dem Sinken des Luftdruckes. Je größer also der Diffusionskoeffizient  $D_0$  ist, desto größer auch die Beweglichkeit der Moleküle.

Betrachtet man nun Luft als ideales Gas, so ist es erlaubt, statt der Wasserdampfkonzentration den Wasserdampfpartialdruck einzusetzen.

$$g = \frac{D_0}{R_v \cdot T} \cdot \left( \frac{\Delta p}{\Delta x} \right) = \delta_a \cdot \left( \frac{\Delta p}{\Delta x} \right) \quad (101)$$

Dabei hat der Diffusionsleitkoeffizient  $\delta_a$  für Wasserdampfdiffusion dieselbe Bedeutung wie der Diffusionskoeffizient  $D_0$ , allerdings ist  $\delta_a$  dann anzuwenden, wenn die Ursache der Diffusion durch ein Wasserdampfpartialdruckgefälle ausgelöst wird. Im Gegensatz dazu findet  $D_0$  dann Anwendung, wenn der Diffusionsvorgang durch ein Konzentrationsgefälle verursacht wird. So lange die Temperatur etwa gleich groß bleibt, sind beide Betrachtungen physikalisch gesehen gleichwertig. Es wird also das gleiche geschehen, jedoch nur mit anderen Begriffen beschrieben. Bei instationären Vorgängen der Lösungsdiffusion ist die Betrachtung als Folge von Konzentrationsunterschieden zweckmäßiger, während bei einer stationären und instationären Wasserdampfdiffusion in porösen Baustoffen die Behandlung auf Basis des Wasserdampfpartialdruckes stattfindet.

### 3-4.4 HYGROTHERMISCHES BERECHNUNGSVERFAHREN (31)

#### Hygrothermisches Berechnungsverfahren mittels WUFI

Um Vorhersagen über die mögliche Bildung von Schimmelpilz treffen zu können, müssen die biologischen Wachstumsvoraussetzungen (Sollwerte) den hygrothermischen Bedingungen gegenübergestellt werden. Dabei werden zur Ermittlung dieser „Ist-Werte“ alle relevanten bauphysikalischen Vorgänge berücksichtigt. Für eine bauphysikalische Betrachtung sind nachstehende Transportmechanismen von Bedeutung.

- Dampfdiffusion
- Oberflächendiffusion
- Lösungsdiffusion
- Kapillarleitung

#### Transportgleichungen

Die Berechnung des nichtisothermen Feuchtetransportes in porösen Stoffen benötigt zwei unabhängige treibende Potentiale. Einerseits sind diese durch den Dampfdruck, und andererseits durch den über die Kelvin-Beziehung in die relative Feuchte umgewandelten Kapillardruck. Die relative Feuchte und der Dampfdruck stellen so leicht zu messende Feuchtetransportpotentiale dar.

Betrachtet man nun ein Volumenelement, so wird die Änderung der Feuchtemenge bzw. der Enthalpie durch die Abweichung der Feuchte- und Wärmeströme durch die Elementoberfläche und die Feuchte- bzw. Wärmequellen oder –senken bestimmt. Daraus ergeben sich die Bilanzgleichungen für Wärme und Feuchte.

#### Wärmebilanzgleichung:

$$\frac{\delta H}{\delta t} = -\nabla q + S_h \quad (102)$$

Es bedeuten:

$H$ .....Gesamtenthalpie [ $J / m^3$ ]

$q$ .....Wärmestromdichte [ $W / m^2$ ]

$S_h$ .....Wärmequelle oder Quelle [ $g$ ]

#### Feuchtebilanzgleichung:

$$\frac{\delta w}{\delta t} = -\nabla (g_w + g_v) + S_w \quad (103)$$

Es bedeuten:

$w$ .....Wassergehalt des Baustoffes [ $kg / m^3$ ]

$g_w$ .....Flüssigtransportstromdichte [ $kg / (m^2s)$ ]

$g_v$ .....Dampfdiffusionsstromdichte [ $kg / (m^2s)$ ]

$S_w$ .....Feuchtequelle oder –senke [ $kg / (m^3s)$ ]

**Resultierendes Gleichungssystem:**

$$\frac{\delta H}{\delta \vartheta} \cdot \frac{\delta \vartheta}{\delta t} = \nabla(\lambda \nabla \vartheta) + h_v \nabla[\varrho_p \nabla(\varphi p_{sat})] \quad (104)$$

$$\frac{\delta w}{\delta \varphi} \cdot \frac{\delta \varphi}{\delta t} = \nabla[D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{sat})] \quad (105)$$

Es bedeuten:

$dH / d\vartheta$ .....differentielle Wärmespeicherfähigkeit des feuchten Baustoffs [ $J / (m^3 K)$ ]

$dw / d\varphi$ .....differentielle Feuchtespeicherfunktion des Baustoffs [ $kg / m^3$ ]

$\lambda$ .....Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs [ $W / (mK)$ ]

$D_\varphi$ .....Flüssigkeitskoeffizient des Baustoffs [ $kg / (ms)$ ]

$h_v$ .....spezifische Verdunstungsenthalpie des Wassers [ $J / kg$ ]

$p_{sat}$ .....Sättigungsdampfdruck [ $Pa$ ]

Dieses gekoppelte Gleichungssystem kann mit der Softwareapplikation *WUFI* numerisch gelöst werden. Die damit berechneten Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe dienen als Eingangsdaten für die weitere Berechnung des biohygrothermischen Modells. Tabelle 13 zeigt eine Übersicht der notwendigen Eingabedaten zur Berechnung der Vorhersage von Schimmelpilzbildung an und in Bauteilen.

**Tab.: 13: Übersicht: Eingabedaten für WUFI (29)**

Eingabeparameter	Erforderliche Datensätze oder Angaben
Geometrie	Aufbau des zu berechnenden Bauteils
	numerische Gitter
Thermische und hygrische Stoffkennwerte sowie -funktionen	Rohdichte und Porosität
	spezifische Wärmekapazität
	feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
	evtl. Feuchtespeicherfunktion
	evtl. richtungsabhängige Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterverteilung
Klimaparameter	Temperatur
	relative Luftfeuchte
	kurzweilige Strahlung (nur außen)
	Niederschlag auf die Bauteiloberfläche (nur außen)
Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen	Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient
	Strahlungsabsorptionsgrad
	Regenfaktor (nur außen)
Steuerparameter	Zeitschritte
	Rechengenauigkeit
	Form der Anfangsbedingungen (z.B. Startzeitpunkt)

### 3-4.5 FUNKTIONSWEISE DES ISOPLETHENMODELLS (31)

Durch ein Isoplethensystem werden die hygrothermischen Wachstumsvoraussetzungen von Pilzen beschrieben. Dieses System besteht aus einem Kurvensystem, welches von der Temperatur und der relativen Feuchte abhängig ist. Isoplethen sind Linien gleichen Wachstums oder gleicher Sporenauskeimungszeit. Mit Hilfe des Isoplethensystems können Sporenauskeimzeiten und das Myzelwachstum ermittelt werden, wobei auch der Substrateinfluss berücksichtigt wird. Alle drei Voraussetzungen, Temperatur, relative Feuchte und Substrat müssen gleichzeitig über einen gewissen Zeitraum vorhanden sein, um Pilzwachstum zu ermöglichen.

Bei der Entwicklung der Isoplethensysteme wurden nur die für die Bauphysik relevanten Pilze berücksichtigt (etwa 200 Arten). Die sich dadurch ergebenden Grenzen potentieller Pilzaktivität werden als LIM (Lowest Isopleth of Mould) bezeichnet. Zur Berücksichtigung des Einflusses auf eine eventuelle Schimmelbildung werden Isoplethensysteme für zwei Substratgruppen LIM1 und LIM2 vorgeschlagen.

Die Substratgruppen werden wie folgt unterteilt:

- Substratgruppe 0: Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien)
- Substratgruppe 1: Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus biologisch vertretbaren Rohstoffen, Materialien aus dauerelastischen Fugen
- Substratgruppe 2: poröse Baustoffe wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe, Hölzer und Dämmstoffe aus nicht abbaubaren Rohstoffen

Die zuvor ermittelten zeitlichen Verläufe von relativer Feuchte und Temperatur dienen als Eingangsdaten (Wachstumsbedingungen) und werden mit den Sporenauskeimungszeiten bzw. dem Myzelwachstum verglichen. Liegen die Wachstumsbedingungen für eine gewisse Zeit über der LIM – Kurve, kann es zur Schimmelbildung kommen.

### 3-4.6 FUNKTIONSWEISE DES BIOHYGROTHERMISCHEN MODELLS (31)

#### Funktionsweise des biohygrothermischen Modells

Da das Isoplethenmodell eine Austrocknung bzw. ein Absterben der Sporen nicht berücksichtigen kann, muss dieser Effekt durch das auf dem Isoplethenmodell aufbauende biohygrothermische Modell beschrieben werden.

Hier wird davon ausgegangen, dass ab einem bestimmten Wassergehalt (Grenzwassergehalt) die Spore zu keimen beginnt. Bis zu diesem Zeitpunkt kann die Spore als nicht lebendes Material betrachtet werden, welche mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden kann. Durch das biohygrothermische Modell wird die Entwicklung der Spore bis zu diesem Zeitpunkt betrachtet. Aufgrund der Sporenabmessungen kann die Spore isotherm betrachtet werden und Flüssigtransportvorgänge, wie z. B. kapillares Saugen, der Diffusion zugeschlagen werden. Als Eingangsdaten für die Berechnung des Feuchtehaushaltes einer Spore sind nur die Feuchtespeicherfunktion und der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Sporenwand notwendig. Abbildung 3.19 zeigt eine schematische Darstellung einer Modells pore.

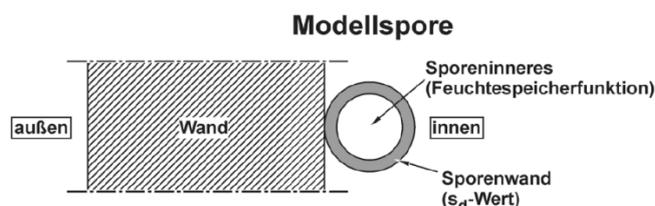


Abbildung 3.19: Modells pore (29)

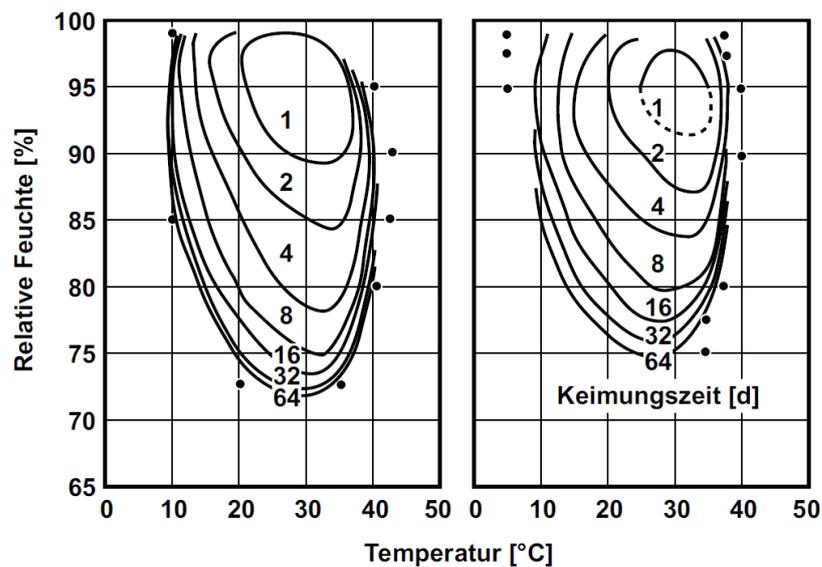


Abbildung 3.20: Linien gleicher Keimungszeit (29)

### Sporenauskeimung und Myzelwachstum

Um die Wachstumsvoraussetzungen (Temperatur und Feuchtigkeit) genauer zu betrachten, ist eine Überlagerung dieser beiden Einflüsse notwendig. Aufgrund dessen werden die Isoplethensysteme für Sporenauskeimung und Myzelwachstum in Abhängigkeit der Temperatur und der relativen Feuchte als Funktion der Zeit aufgetragen. Das daraus entstehende Diagramm zeigt Linien gleicher Keimungszeit bzw. gleichen Wachstums (siehe Abbildung 3.20).

### Substrat

Abgesehen von Temperatur und relativer Feuchte ist der Nährstoffgehalt des Substrates, also der Untergrund auf dem der Pilz wächst, die wichtigste Einflussgröße. Untersuchungen, betreffend des temperatur- und feuchteabhängigen Pilzwachstums, haben ergeben, dass auch Verschmutzungen wie z.B. Fette oder Staub das Wachstum entscheidend beeinflussen können. Das bedeutet, dass Verunreinigungen und Ausdünstungen durch den Menschen, aber auch Luftverschmutzung, auf sterilen Medien eine relativ substratreiche Schicht bilden können.

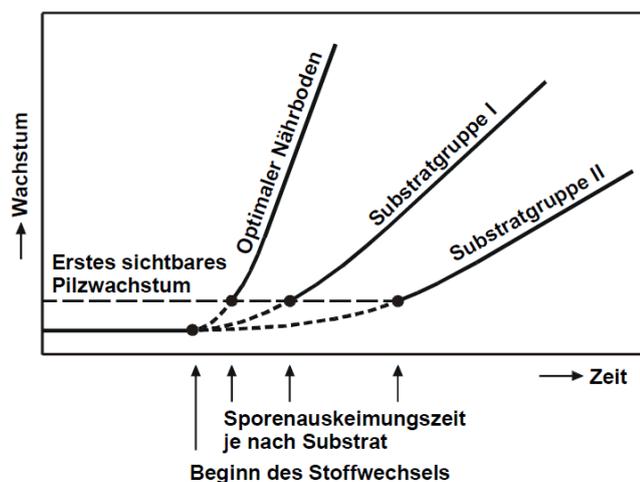


Abbildung 3.21: Pilzwachstum in Abhängigkeit der Zeit und der Substratgruppe (30)

## Zeit

Außenbauteile unterliegen im Regelfall stets schwankenden Umgebungsbedingungen. Dabei können sich Temperatur und relative Luftfeuchte stündlich ändern. Daher ist es bei bauphysikalischen Untersuchungen in Hinblick auf Schimmelbildung notwendig die Zeit, also wie lange ein Bauteil einem gewissen Milieu ausgesetzt ist, zu berücksichtigen.

## Ablauf des Pilzwachstums

Das Pilzwachstum einer Kolonie lässt sich in drei Phasen unterteilen, wobei die ersten zwei (Sporenceimung und Myzelwachstum) zum vegetativen Wachstum zählen. Die letzte Phase, die Sporulation (Bildung von neuen Sporen), dient der Reproduktion. Durch Transportvorgänge die durch Mensch, Tier und Wind verursacht werden, sind Schimmelpilzsporen praktisch überall zu finden. Die Verbreitung von Sporen stellt eine sehr gute Möglichkeit dar, genetisches Material zu verbreiten. Je nach Pilzart können Sporen ein- oder mehrzellig und in unterschiedlicher Anzahl auftreten. Zur Beschreibung der Keimung wird der Wassergehalt herangezogen, welcher jedoch von den spezifischen Eigenheiten der betrachteten Pilzart abhängt. Sind nun entsprechende Klimabedingungen vorhanden, kommt es zur Auskeimung der Spore und zur Bildung von Myzel. Im Myzel finden die Nahrungsaufnahme, Stoffwechselprozesse und die Reproduktion statt. Durch die Reproduktion entstehen in den Fruchtkörpern neue Sporen (siehe Abbildung 3.22).

Um die Keimungszeit zu bestimmen, wurden Versuche durchgeführt und die gewonnenen Messergebnisse, in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte, in einem Isoplethenmodell für Sporenceimung dargestellt. Ist die Sporenceimung beendet, fängt der Pilz mit dem Myzelwachstum an. Zur Keimung von Pilzen kommt es nur dann, wenn die Bedingungen für ein Weiterwachsen gegeben sind (Überlebensstrategie). Dementsprechend sind die minimalen Feuchtebedingungen für das Auskeimen höher als die für vegetatives Wachstum bzw. Sporulation. Auch für das Myzelwachstum sind die Wachstumsraten, in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte, in Isoplethensystemen dargestellt.

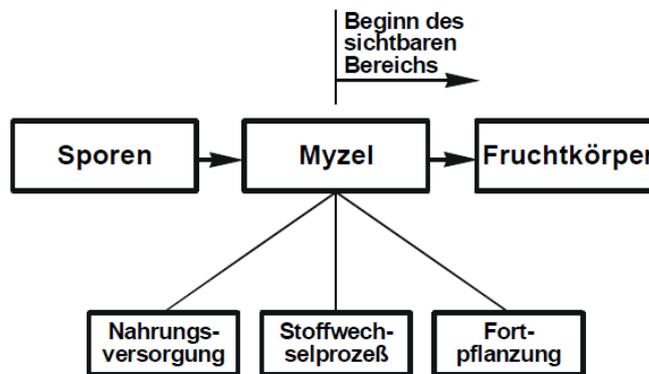


Abbildung 3.22: Pilzwachstum (28)

## 3-4.7 LOWEST ISOPLETH FOR MOULD (31)

Zur Ermittlung der Isoplethensysteme für alle Pilze müssten grundsätzlich unterschiedliche Spezies betrachtet werden. Um Pilzwachstum aber generell ausschließen zu können bildet man nun für alle bekannten Schimmelpilze die minimalen Wachstumsvoraussetzungen. Dadurch erhält man eine Einhüllende, die sogenannte „Lowest Isopleth for Mould“, bei dessen Unterschreitung keine Pilzaktivität auftreten kann. Der LIM ist also so zu verstehen, dass auf dieser Linie Sporenceimungszeit unendlich groß ist bzw. das Wachstum gegen Null geht. Der LIM für Sporenceimung liegt, vor allem bei niedrigen Temperaturen, um wenige Prozent relative Luftfeuchte über dem des Myzelwachstums. Dies bedeutet, dass es erst zu einer Sporenceimung kommt, wenn ein Weiterwachsen gewährleistet ist.

Mathematisch gesehen entsprechen die LIM-Kurven einer hyperbolischen Cosinus-Funktion, die für den bauphysikalischen relevanten Bereich zwischen 0°C und 30°C verwendet wird. Abbildung 3.24 zeigt die Isoplethen für Sporenauskeimung, gültig für alle Pilze der Substratgruppe 1 und 2.

$$\varphi = a * \cosh(\vartheta - \vartheta_{opt}) + b \quad (106)$$

Es bedeuten:

$a, b$ .....Koeffizienten [-]

$\vartheta_{opt}$ .....optimale Temperatur für Pilzbildung [°C]

$\lambda$ .....Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs [W/(mK)]

### Das Rechenverfahren

Die Struktur des Rechenverfahrens beruht auf der Verbindung des Isoplethenmodells mit dem biohygrothermischen Modells, wobei die Eingangsdaten mittels der Softwareapplikation *WUFI* berechnet werden. Danach muss eine Substratgruppe festgelegt werden, wodurch eine Abschätzung der Sporenauskeimung ermöglicht wird. Kommt es laut dieser Abschätzung zur Pilzbildung, kann mit dem biohygrothermischen Modell eine weitere Prognose erstellt werden, welche das Austrocknen der Pilze berücksichtigt. In Abbildung 3.23 ist das Rechenverfahren als Flussdiagramm dargestellt.

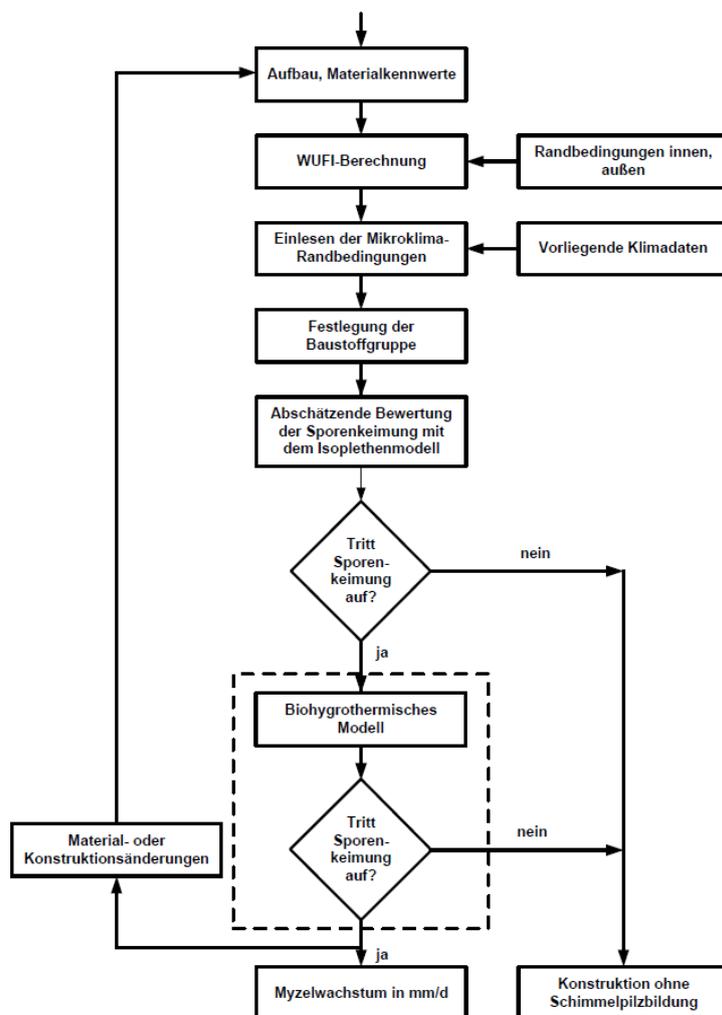


Abbildung 3.23: Flussdiagramm Rechenverfahren (28)

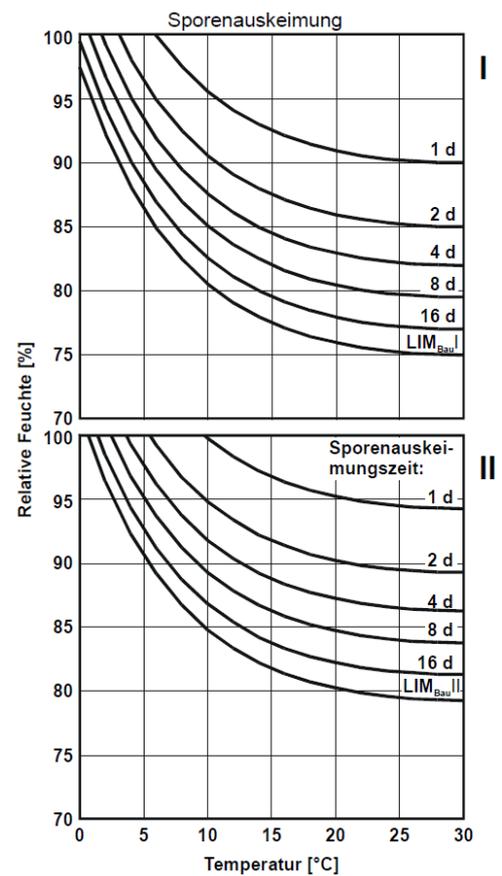


Abbildung 3.24: Isoplethen (28)

## Der Mould-Index

Zur Beschreibung von Schimmelwachstum wurden von Viitanen, Ritschkoff und Hukka Laboruntersuchungen an verschiedenen Materialien durchgeführt. Der Schwerpunkt lag hierbei auf Fichten- und Kiefernholz. Für die Beurteilung des Schimmelwachstums wurde von Viitanen eine neue Bezeichnung eingeführt, der sogenannte „Mould-Index“.

Viitanen gibt für den maximal erreichbaren Mould-Index (MI) nachstehende Näherungsgleichung an.

$$MI_{max} = 1 + \frac{7 * (\varphi_{krit} + \varphi)}{\varphi_{krit} - 100} - 2 * \left( \frac{\varphi_{krit} + \varphi}{\varphi_{krit} - 100} \right)^2 \quad (107)$$

Die kritische relative Feuchte ergibt dabei durch:

$$\varphi_{krit} = -0,00267 * \vartheta^3 + 0,160 * \vartheta^2 - 3,13 * \vartheta + 100,0 \quad (108)$$

wenn  $\vartheta \leq 20$  °C, sonst: 80%

Viitanen beschreibt den Mould-Index mit folgenden Gleichungen:

$$\frac{dM}{dt} = -0,00267 * \vartheta^3 + 0,160 * \vartheta^2 - 3,13 * \vartheta + 100,0 \quad (109)$$

## Einschränkungen des Modells

Um die Sicherheit der Prognosen besser einschätzen zu können, werden im Folgenden die Einschränkungen bzw. Unschärfen dieses Modells kurz erläutert.

Da Einflüsse wie pH-Wert, Salzgehalt, Licht, Sauerstoffgehalt und Oberflächenbeschaffenheit nicht berücksichtigt werden, fallen die ermittelten Auskeimzeiten geringer bzw. die Wachstumsraten größer aus. Bei Anwendung in der Praxis haben die Ergebnisse also einen eher präventiven Charakter. Des Weiteren können durch die Pauschalisierung der verschiedenen Substrate in Substratgruppen die ermittelten Werte nicht für jedes einzelne Material vorhergesagt werden. Da bei der biohydrothermischen Berechnung die Substrate nicht direkt berücksichtigt werden können, wird deren Einfluss jedoch durch unterschiedliche LIM-Kurven miteinbezogen. Im Grenzfall bzw. bei Unkenntnis sollte daher stets die kritischere Substratgruppe verwendet werden.

Schimmelpilze besitzen die Eigenschaft, größere Temperaturschwankungen über einen längeren Zeitraum zu überstehen. Das bedeutet, dass durch ungünstige Bedingungen das Wachstum zwar verlangsamt bzw. zum Erliegen gebracht werden kann, eine einmal vorliegende Kontamination kann dadurch jedoch nicht zerstört werden. Sobald die günstigen Bedingungen wieder vorhanden sind, beginnt das Wachstum des Pilzes von neuem. Dies hat zur Folge, dass zur Beurteilung eines jährlichen Myzelwachstums die Wachstumszeiten, bei denen günstige Bedingungen vorherrschen, addiert werden müssen.

### 3-4.8 NUTZUNGSKLASSEN (33)

Holz besitzt die Eigenschaft, Feuchtigkeit aus seiner Umgebung aufzunehmen und zu binden. Solche sogenannten hygroskopischen Eigenschaften führen zu Veränderungen der charakteristischen Eigenschaften des Holzes. Die Holzfeuchte stellt sich dabei im Laufe der Zeit der umgebenden Luftfeuchtigkeit ein und wird Ausgleichs- oder Gleichgewichtsfeuchte genannt. Die Nutzungsklassen berücksichtigen diese sich ändernden physikalischen Eigenschaften und ermöglichen eine Zuordnung der verschiedenen Bauteile entsprechend der zu erwartenden Gleichgewichtsfeuchte am jeweiligen Standort. Aus der schwankenden Holzfeuchte resultiert:

- Abnahme der Festigkeitskennwerte
- Abnahme der Steifigkeitskennwerte
- Volumenänderung (Quellen und Schwinden)
- Zunahme der Wärmeleitfähigkeit
- Abnahme des Wasserdampfdiffusionswiderstandes

Nach ÖNORM EN 1995 – 1 – 1:2014 sind die Nutzungsklassen wie folgt definiert:

#### **Nutzungsklasse 1**

Diese Klasse ist durch eine Holzfeuchte gekennzeichnet die sich bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % einstellt, wobei diese nur für einige Wochen pro Jahr überschritten werden darf. In Nutzungsklasse 1 wird in den meisten Fällen eine mittlere Holzgleichsfeuchte von 12 % nicht überschritten.

#### **Nutzungsklasse 2**

Nutzungsklasse 2 wird durch jene Holzfeuchte charakterisiert, die sich bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 85 % der umgebenden Luft einstellt, wobei diese nur für einige Wochen pro Jahr überschritten werden darf. In Nutzungsklasse 2 wird in den meisten Fällen eine mittlere Holzgleichsfeuchte von 20 % nicht überschritten.

#### **Nutzungsklasse 3**

Sie berücksichtigt all jene Klimabedingungen welche die Holzfeuchte aus Nutzungsklasse 2 übersteigen.

### 3-4.9 GEFÄHRDUNGSKLASSEN (33)

Da Holzwerkstoffe aus verschiedenen Zusammensetzungen bestehen und auch deren Herstellung sich unterscheidet, können der Feuchtegehalt und das Befallrisiko in einer bestimmten Umgebung von demjenigen für das Vollholz abweichen, aus dem die Platten hergestellt wurden.

#### **Gefährdungsklasse 1**

Sperrhölzer haben in dieser Umgebung jenen Feuchtegehalt, der sich während der Gebrauchsdauer bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65% einstellen würde. Sie werden daher als trocken bezeichnet und sind der Gefahr eines Schimmelpilzbefalles oder eines Befalls holzverfärbender bzw. holzerstörender Pilze nicht ausgesetzt. Jedoch ist ein Befall von holzerstörenden Insekten möglich, wobei dieses Risiko von der geographischen Lage abhängig ist.

#### **Gefährdungsklasse 2**

Der Feuchtegehalt von Sperrhölzern in dieser Umgebung kann gelegentlich denjenigen erreichen oder überschreiten, der sich bei einer Lufttemperatur von 20°C und einer relativen Feuchte von 90% einstellen würde. Das bedeutet, dass der Feuchtegehalt einen Wert erreichen kann, bei dem das Wachstum holzerstörender Pilze ermöglicht werden kann. Bei Sichtplatten ist durch das mögliche Wachstum von Oberflächenschimmelpilzen und holzverfärbenden Pilzen mit einer Beeinträchtigung zu rechnen. Das Risiko eines Insektenbefalls ist dabei ähnlich wie für Gefährdungsklasse 1.

### Gefährdungsklasse 3

In dieser Klasse können Sperrhölzer häufig einen Feuchtegehalt von 20% übersteigen und sind dementsprechend oft einem Angriff holzerstörender Pilze ausgesetzt. Bei Platten die auch eine dekorative Funktion erfüllen, können durch holzverfärbende Pilze beeinträchtigt werden. Das Risiko eines Insektenbefalls ist dabei ähnlich wie für Gefährdungsklasse 1.

### Gefährdungsklasse 4

Sperrhölzer in Gefährdungsklasse 4 sind ständig einem Feuchtegehalt von über 20% und daher einem Befall von holzerstörenden Pilzen ausgesetzt. Sperrhölzer sind deswegen nur dann zur Verwendung geeignet, wenn die gegebenen und/oder erzielten Eigenschaften ausreichend sind.

### Gefährdungsklasse 5

Hier sind Sperrhölzer einem ständigen Feuchtegehalt von über 20% ausgesetzt und befinden sich zusätzlich, teilweise oder auch zur Gänze, im Meerwasser. Das Hauptproblem liegt daher im Angriff durch im Meerwasser befindlichen Holzschädlingen, die vor allem in wärmeren Gewässern erhebliche Schäden verursachen können. Darüber hinaus können Sperrhölzer in dieser Klasse auch dem Angriff von holzerstörenden Pilzen ausgesetzt sein. Tabelle 14 zeigt eine Zusammenfassung der Gefährdungsklassen.

**Tab.: 14: Zusammenfassung der Gefährdungsklassen (33)**

Gefährdungs- klasse	Gebrauchs- bedingung	Feuchte- niveau	Organismen					
			holzerstörende Pilze		holzverfärbende Pilze 4)	Insekten		Holz- schädlinge im Meer wasser
			Basidio- myceten	Moder- fäule	Bläue	Käfer (1)	Termiten	
1	ohne Erdkontakt abgedeckt (trocken)	trocken 2)	-	-	-	U	L	-
2	ohne Erdkontakt abgedeckt (Risiko einer Befeuchtung/ feuchte Bedingungen)	gelegentlich erhöht 3)	U	-	U	U	L	-
3	ohne Erdkontakt, nicht abgedeckt (Außenbe- dingungen)	häufig über 20%	U	-	U	U	L	-
4	In Kontakt mit Erde oder Süßwasser 5)	ständig über 20%	U	U	U	U	L	-
5	Im Meerwasser 5)	ständig über 20%	U	U	U	U	L	U

U: Tritt universell in ganz Europa auf.

L: Tritt lokal in ganz Europa auf.

1): Das Befallsrisiko kann bei bestimmten Einsatzbedingungen unbedeutend sein.

2): Entsprechend einer Lufttemperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65% ausgesetzt.

3): Gelegentlich kann ein Feuchtegehalt erreicht oder überschritten werden, der demjenigen entspricht, der sich bei einer Lufttemperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 90% einstellen würde.

4): Schimmel: Ein Schutz gegen Schimmelpilze kann ebenfalls berücksichtigt werden.

5): Für die Anwendung von Sperrhölzern in diesen Gefährdungsklassen siehe die Anmerkungen zu den Abschnitten 4.2.4 bzw. 4.2.5 in ÖNORM EN 335-3

### 3-4.10 GEBRAUCHSKLASSEN (34)

#### Allgemeines

Die Gefahr des Insekten- und Pilzbefalls in unterschiedlichsten Einbausituationen wird nach ÖNORM 3802 – 1:2015 durch die Gebrauchsklassen (GK) berücksichtigt. Die Zuordnung eines Holzbauteils erfolgt dabei über die zu erwartende Holzfeuchtigkeit die aus Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und/oder Bewitterung resultiert.

Für den Fall, dass ein Holzbauteil bestimmungsgemäß mehreren Gebrauchsklassen zugeordnet werden kann, ist jeweils die höchste in Betracht kommende maßgebend, wenn keine unterschiedliche Behandlung eines Bauteils möglich ist.

#### Gebrauchsklasse 0

Gebrauchsklasse 0 umfasst jene Einbausituationen, in denen die Holzfeuchtigkeit ständig maximal 20 % aufweist. Die relative Luftfeuchtigkeit darf dabei maximal 85 % betragen, wobei diese nur kurzfristig überschritten werden darf. In dieser Gebrauchsklasse ist das Risiko durch Pilzbefall nicht gegeben. Die Gefahr des Befalls holzerstörender Insekten in beheizten Innenräumen ist unbedeutend und das Risiko demnach als akzeptabel einzustufen.

Die Gefahr eines Befalls durch holzerstörende Organismen, ist im Wohnbereich mit üblichen Wohnklima nicht gegeben. Ausnahmen bilden nur stärkereiche Laubhölzer (Abachi, Esche, Eichensplintholz) durch Splintholzkäfer.

#### Gebrauchsklasse 1

Gebrauchsklasse 1 fasst alle Einbausituationen zusammen, bei der die Holzfeuchtigkeit über die gesamte Gebrauchsdauer maximal 20 % bei einer relativen Luftfeuchte von 85 % beträgt. Die relative Luftfeuchte darf dabei kurzfristig überstiegen werden.

Der Befall holzerstörender Insekten ist möglich.

#### Gebrauchsklasse 2

In dieser Gebrauchsklasse werden alle Einbausituationen zusammengefasst, welche eine Holzfeuchtigkeit von 20 % kurzfristig überschreiten und bei der die mittlere relative Luftfeuchtigkeit über 85 % liegt.

Ein Befall durch holzerstörende Insekten oder Pilze ist möglich.

#### Gebrauchsklasse 3

Gebrauchsklasse 3 hat jene Einbausituationen zum Inhalt, in welchen die Holzfeuchtigkeit gelegentlich bzw. häufig 20 % übersteigen kann, wobei das Holz außerdem Niederschlagsbelastungen ausgesetzt ist. Das Holz hat in dieser Klasse keinen Kontakt zur Erde und keinen ständigen Wasserkontakt. Ein Befall holzerstörender Insekten und durch Pilze ist möglich. Sollte der Fall eintreten, dass sich das Holz auch ohne andauernden Erd- und/oder Wasserkontakt mit Wasser und Schmutz anreichern kann, ist eine Zuordnung in die Gebrauchsklasse 4 erforderlich.

#### Gebrauchsklasse 3.1

Die Gebrauchsklasse 3.1 beinhaltet alle Einbausituationen, in denen eine rasche Wasserableitung und Rücktrocknung vorausgesetzt wird. Somit kann die Holzfeuchtigkeit in dieser Klasse gelegentlich 20 % übersteigen.

#### Gebrauchsklasse 3.2

Die Gebrauchsklasse 3.2 beinhaltet alle Einbausituationen, in denen eine rasche Wasserableitung und Rücktrocknung nicht sichergestellt werden kann. Durch die Gefahr der Bildung von Feuchtenestern, ist ein Übersteigen der Holzfeuchtigkeit von 20 % häufig möglich.

**Gebrauchsklasse 4**

Ein vorwiegendes bis ständiges Überschreiten der Holzfeuchte von 20 % ist in den Einbausituationen der Gebrauchsklasse 4 zusammengefasst. Der Befall durch holzerstörende Pilze, Moderfäule und holzerstörende Insekten ist zu erwarten.

*Tab.: 15: Zusammenfassung der Gebrauchsklassen (34)*

GK	Holzfeuchtigkeit	Einbausituation <sup>a</sup>	Gefährdung durch		
			Insekten	Pilze <sup>b</sup>	Moderfäule
0	Holzfeuchtigkeit ständig maximal 20 %; mittlere relative Luftfeuchtigkeit maximal 85 %; relative Luftfeuchtigkeit nur kurzfristig über 85 %	Holz in Räumen mit üblichem Wohnklima oder vergleichbaren Räumen verbaut	Nein	Nein	nein
1	Holzfeuchtigkeit ständig maximal 20 %; mittlere relative Luftfeuchtigkeit maximal 85 %; relative Luftfeuchtigkeit nur kurzfristig über 85 %	Holz unter Dach, nicht der Bewitterung und keiner Befeuchtung ausgesetzt	Ja	Nein	Nein
2	Holzfeuchtigkeit gelegentlich kurzfristig über 20 % mittlere relative Luftfeuchtigkeit über 85 %	Holz unter Dach, nicht der Bewitterung ausgesetzt; eine hohe Umgebungsfeuchtigkeit oder Feuchteintrag, z. B. aus Kondensation, kann zu gelegentlicher Befeuchtung führen	Ja	Ja	Nein
3	3.1 Holzfeuchtigkeit gelegentlich über 20 %	Holz nicht unter Dach, der Bewitterung ausgesetzt, ohne ständigem Erd- und/oder Wasserkontakt; rasche Wasserableitung bzw. eine gute Belüftung und somit eine rasche Rücktrocknung sichergestellt	Ja	Ja	Nein
	3.2 Holzfeuchtigkeit häufig über 20 %; keine langfristige/ständige Durchfeuchtung	Holz nicht unter Dach, der Bewitterung ausgesetzt, ohne ständigem Erd- und/oder Wasserkontakt; rasche Wasserableitung bzw. eine rasche Rücktrocknung, zB konstruktionsbedingt, nicht sichergestellt	Ja	Ja	Nein
4	Holzfeuchtigkeit vorwiegend bis ständig über 20 %	Holz in ständigem Erd- und/oder Wasserkontakt	Ja	Ja	Ja
<sup>a</sup> Bei Einhaltung besonderer baulicher Maßnahmen gemäß ÖNORM B 3802-2 dürfen Holzbauteile, die einer höheren Gebrauchsklasse zuzuordnen wären, in eine niedrigere Gebrauchsklasse eingestuft werden.					
<sup>b</sup> holzerstörende Pilze (ausgenommen Moderfäulepilze) und holzverfärbende Pilze					

## 3-5 SOMMERLICHER WÄRMESCHUTZ

---

### 3-5.1 ALLGEMEIN (9)

Die thermischen Vorgänge, die das sommerliche Wärmeverhalten von Gebäuden wesentlich beeinflussen, können auf Basis der Raumbilanz in Zusammenhang mit der Bauteilbilanz von Fenstern nachvollzogen und beschrieben werden. Die Sonnenstrahlung die durch Absorptionsvorgänge in Wärme umgewandelt werden, bestehen aus direkter, diffuser und reflektierter Strahlung. Trifft die Solarstrahlung auf die Gebäudehülle, wird diese zum einen Teil reflektiert und zum anderen absorbiert. Der absorbierte Teil wird dabei durch Konvektion und Abstrahlung an die Außenluft abgegeben. Ferner wirken auf ein Gebäude noch die Außenlufttemperatur sowie innere Wärmequellen wie beispielsweise Personen oder elektronische Geräte.

Durch starke und über einen längeren Zeitraum wirkende Sonneneinstrahlung, können in einem Gebäude hohe Innenlufttemperaturen entstehen, die der Mensch als sehr unbehaglich empfindet. Deshalb sollten bereits bei der Planung Maßnahmen getroffen werden, die einer Überhitzung von Aufenthalts- oder Arbeitsräumen entgegen wirken. Solche Maßnahmen können sein:

- Abschattungen zur Verringerung der Einstrahlung
- Orientierung des Gebäudes
- Reduzierung der Fensterflächen
- große speicherwirksame Massen
- Lüftung

Unter „sommerlichen Wärmeschutz“ versteht man also alle planerischen Vorkehrungen die das Eindringen von Wärmeenergie in ein Gebäude zu verhindern, wobei die Qualität von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Gesamtenergiedurchlass von transparenten Außenbauteilen
- Sonnenschutz von Außenbauteilen
- Fensterflächenanteil und deren Orientierung (Himmelsrichtung und Neigungswinkel)
- Anzahl und Intensität der Luftwechsel
- Raumgeometrie
- Wärmespeicherfähigkeit raumabschließender Bauteile

Im Gegensatz zum „winterlichen Wärmeschutz“ gestaltet sich der „sommerliche Wärmeschutz“ deutlich komplexer, da das Raumklima im Sommer von mehreren bautechnischen und bauphysikalischen Größen bestimmt wird. Abgesehen von den oben genannten Einflussfaktoren, entsteht durch den Tagesverlauf ein instationärer Wärmetransport, der nur mit Hilfen von dynamischen Simulationsrechenverfahren ermittelt werden kann.

Nach ÖNORM B 8110-3:2012 gilt der „sommerliche Wärmeschutz“ als vermieden wenn die Tagestemperatur im kritischsten Raum des Gebäudes 27°C nicht übersteigt. Die Raumtemperatur in der Nacht darf hingegen 25°C nicht überschreiten. Der Nachweis selbst gilt als erbracht, wenn die mittlere Tagesaußentemperatur maximal 23°C beträgt, sämtliche Fenster dabei offen gehalten werden können und der Sonnenschutz, die speicherwirksame Masse sowie der stündliche Luftvolumenstrom den Anforderungen folgender Tabelle genügen. Der Anwendungsbereich dieser ÖNORM ist für Räume anzuwenden, die einem dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen. Zu diesen Räumen zählen alle Räume in Wohnungen bzw. Büroräumen und deren Verbindungswegen, Schulklassen inklusive dem Gangbereich und Patientenräumen. Des Weiteren sind Regelungen für Nebenräume enthalten wie z.B.: Laubengänge, Wintergärten, Treppenhäuser, Atrien und Aulen.

**Tab.: 16: mindesterforderliche immisionsflächenbezogene speicherwirksame Masse (9)**

Immissionsflächenbezogener stündlicher Luftvolumenstrom $V_{L,s}$ [ $m^3/hm^2$ ]	Immissionsflächenbezogene speicherwirksame Masse $m_{w,l}$ <sup>2)</sup> [ $kg/m^2$ ]
$\geq 100$	$\geq 2000$
75	$\geq 4000$
50 <sup>1)</sup>	$\geq 8000$
<sup>1)</sup> Immissionsbezogene Luftvolumenströme von weniger als 50 $m^3/hm^2$ führen zu einem hohen Überwärmungsrisiko und sind daher grundsätzlich zu vermeiden. <sup>2)</sup> im Bedarfsfall zu interpolieren	

Tabelle 11 kann aber auch über die folgende Gleichung ermittelt werden.

$$m_{w,l} = \frac{m_w}{A_i} = 32000 \cdot 2^{-\frac{V_{L,s}}{25}} [kg / m^2] \quad (110)$$

Es bedeuten:

- $m_{w,l}$ .....immisionsflächenbezogene speicherwirksame [ $kg / m^2$ ]
- $m_w$ .....speicherwirksame Masse [ $kg$ ]
- $A_i$ .....Immissionsfläche [ $m^2$ ]

bzw.

$$V_{L,s} = n_L \cdot \frac{V}{A_i} [m^3 / hm^2] \quad (111)$$

Es bedeuten:

- $V_{L,s}$ .....immisionsflächenbezogener stündlicher Luftvolumenstrom [ $m^3 / hm^2$ ]
- $n_L$ .....Luftwechselzahl [ $1 / h$ ]
- $V$ .....Volumen des Raumes [ $m^3$ ]

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick verschiedener Luftwechselzahlen in Räumen und Raumverbänden in Abhängigkeit der Lage der Fenster unter Sommerbedingungen.

**Tab.: 17: Luftwechselzahlen (9)**

Anzahl der Fassaden oder Dachebenen mit Lüftungsöffnungen	$n_L$ bei voller Öffnung der Lüftungsflügel
1 Fassadenebene	1,5
2 Fassadenebenen	2,5
3 Fassadenebenen (Reihenhaus)	3
4 Fassadenebenen (freistehendes Einfamilienhaus)	3

### 3-5.2 IMMISIONSFLÄCHE (9)

Die Immissionsfläche ist eine fiktive Fläche, mit der sich die durch Sonnenenergiezufuhr hervorgerufenen Wärmequellen quantifizieren lassen. Sie errechnet sich aus der Fläche aller transparenten Teile der Gebäudehülle, multipliziert mit deren Gesamtenergie-Durchlassgrad und dem Abminderungsfaktor einer Beschattungseinrichtung. Außerdem werden noch Orientierung und Neigungswinkel der transparenten Flächen über einen Orientierungs- und Neigungsfaktor berücksichtigt.

Für den Fall, dass auf der Mindestbelichtungsfläche ein Sonnenschutzsystem mit einem niedrigeren  $F_C$  – Wert als 0,15 [-] für außenliegenden Sonnenschutz, 0,25 [-] für zwischenliegenden und 0,5 [-] für innenliegenden Sonnenschutz in der Berechnung berücksichtigt wird, muss die Unabhängigkeit von der Anzahl der anwesenden Personen gewährleistet sein und ein etwaiger Wärmeeintrag wie etwa der Beleuchtung bei den inneren Lasten berücksichtigt werden.

$$A_I = A_g \cdot Z_{ON} \cdot (g \cdot z) + A_S + A_T \text{ bzw. } A_g \cdot Z_{ON} \cdot g \cdot F_C \cdot F_{SC} \text{ und } A_g = A_{AL} \cdot f_g \quad (112)$$

Es bedeuten:

$A_g$ .....Glasfläche [ $m^2$ ]

$A_{AL}$ .....Architekturlichte [ $m^2$ ]

$A_I$ .....interne Wärmequelle: 500W  $\equiv$  1m<sup>2</sup> Immissionsfläche [ $m^3$ ]

$f_g$ .....Glasflächenanteil [-]

$g$ .....Gesamtenergiedurchlassgrad [-]

$Z_{ON}$ .....Orientierung – und Neigungsfaktor [-]

$Z$ .....Abminderungsfaktor einer Abschattungseinrichtung [-]

$F_C$ .....Abminderungsfaktor [-]

Beispiele für Z-Faktoren:	Außenjalousie	$Z = 0,27$
	Vordächer, Markisen	$Z = 0,32 - 0,43$
	Zwischenjalousie	$Z = 0,53$
	Innenjalousie	$Z = 0,43 - 0,75$

Die folgende Tabelle enthält  $Z_{ON}$ -Faktoren in Abhängigkeit der Orientierung und Neigung.

**Tab.: 18:  $Z_{ON}$ -Faktoren (9)**

Neigung	S 180°	SW/SO 225/135°	W/O 270/90°	NW/NO 315/90°	N 0°
0°	1,00	1,14	1,13	0,82	0,54
30°	1,69	1,70	1,54	1,15	0,85
45°	1,93	1,90	1,73	1,40	1,26
60°	2,08	2,04	1,89	1,68	1,61
90°	2,06				

### 3-5.3 SPEICHERWIRKSAME MASSE (9)

Die speicherwirksame Masse ist jene Masse, die zur Kennzeichnung der wirksamen Wärmespeicherkapazität von Bauteilen für eine Periode von 24 Stunden herangezogen wird und mit folgender Formel zu ermittelten ist (ÖNORM B 8110-3:2012).

Mit der Referenzspeicherkapazität  $C_0 = 1046,7$  [J/kg] ergibt sich somit die flächenbezogene speicherwirksame Masse gemäß nachstehender Formel:

$$m_{W,B,A} = \frac{\chi}{c_0} \quad (113)$$

mit

$$\chi = \frac{T}{2 \cdot \pi} \left( \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right) \text{ wobei } Z = Z_i \cdot \dots \cdot Z_2 \cdot Z_1 \quad (114)$$

Es bedeuten:

$\chi$ .....flächenbezogene wirksame Wärmespeicherkapazität des Bauteils [J / (Km<sup>2</sup>)]

$Z$ .....Wärmeübergangsmatrix, gemäß ÖNORM EN 13786 [m<sup>2</sup>]

$T$ .....Periodendauer [s]

$m_{W,B,A}$ .....flächenbezogene speicherwirksame Masse des Bauteils [kg / m<sup>2</sup>]

$C_0$ .....Referenz - Wärmespeicherkapazität [J / (Km<sup>2</sup>)]

Die speicherwirksame Masse für einen Raum ist also die Summe der speicherwirksamen Massen aller raumbegrenzenden Bauteile inklusive der Speichermassen von Einrichtungsgegenständen und wird wie folgt berechnet.

$$m_W = \sum m_{W,B} + m_{W,E} \quad (115)$$

Es bedeuten:

$m_W$ .....gesamte speicherwirksame Masse eines Raumes [kg]

$m_{W,B}$ .....speicherwirksame Masse eines Bauteils [kg]

$m_{W,E}$ .....speicherwirksame Masse der Einrichtung [kg]

Durch Multiplikation der flächenbezogenen speicherwirksamen Masse mit der Bauteilfläche, erhält man nun die gesamte speicherwirksame Masse. Für die Bauteilfläche sind allerdings Innenabmessungen heranzuziehen.

$$m_{W,B} = m_{W,B,A} \cdot A \quad (116)$$

Es bedeutet:

$A$ .....Bauteilfläche (Innenfläche) [m<sup>2</sup>]

# KAPITEL 4: DETAILS UND ERGEBNISSE

## 4-1 SOCKELVARIANTE „STANDARD AUSFÜHRUNG“ (MIT HINTERLÜFTUNG)

In diesem Kapitel wird ein herkömmlicher Sockelanschluss untersucht, wie dieser in der Literatur zu finden ist (Standardlösung nach ÖNORM B 2320:2010). Der konventionelle Sockelanschluss stellt eine bewährte Lösung mit einem sehr guten konstruktiven Holzschutz dar, der durch eine ausreichende Anschlusshöhe in der Spritzwasserzone erreicht wird. Der Keller wird dabei in Stahlbetonbauweise ausgeführt und mit einer bituminösen Feuchtigkeitsabdichtung gegen Feuchtigkeit geschützt. Der Wärmeschutz wird durch eine 8 cm starke Perimeterdämmung gewährleistet. Das tragende Element der Außenwand besteht aus einer dreischichtigen BSP-Wand, welche auf einer Mörtelausgleichsschicht aufgelagert und an der unteren Stirnseite durch eine Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit geschützt wird. Die Dämmung erfolgt über eine außen- und innenliegende Mineralwolle die zwischen einer Holzlattung angeordnet ist. Die Konvektionsdichtheit wird durch eine diffusionsoffene Windsperre erreicht. Eine Hinterlüftung dient dazu, Feuchtigkeit durch etwaig anfallendes Kondensat möglichst schnell wieder abzuführen. Die abschließend vorgehängte Fassade schützt die dahinter liegende Konstruktion vor Schlagregen. Abbildung 4.1 zeigt einen Vertikalschnitt des Sockelanschlusses mit Bezeichnung der Bauteile.

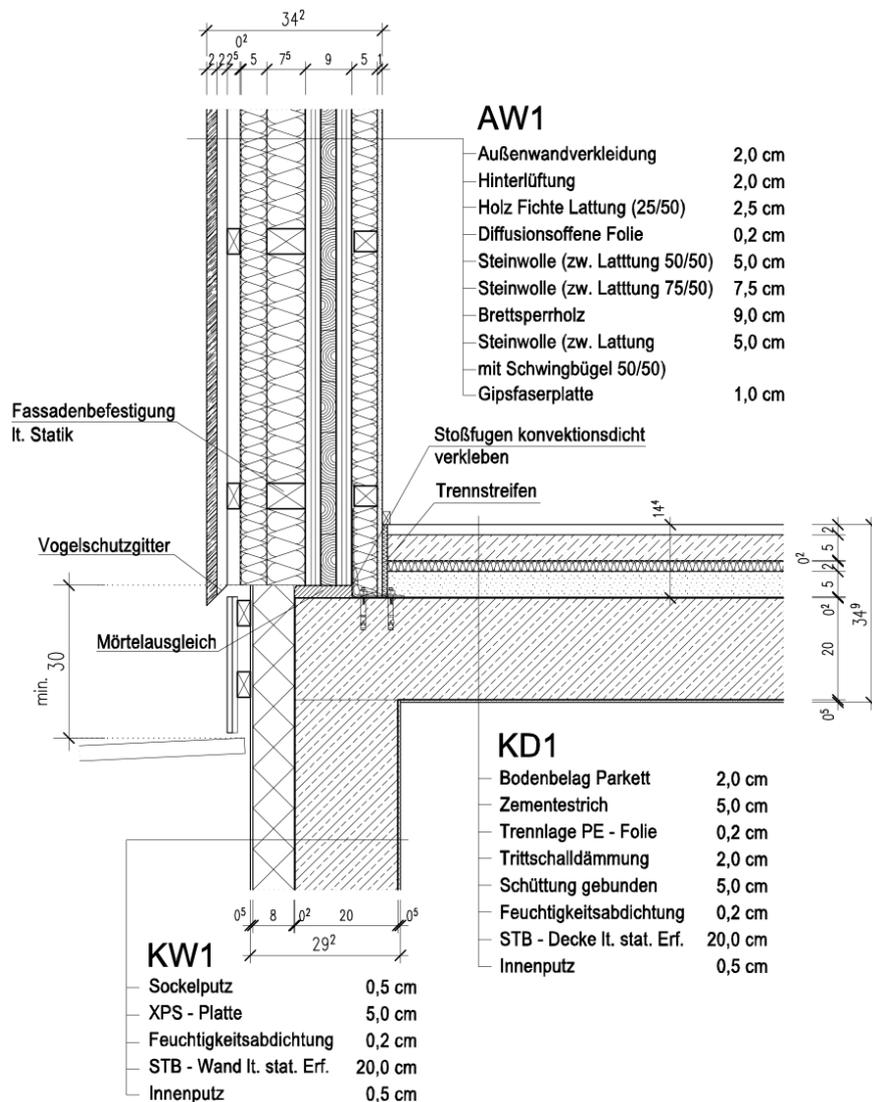


Abbildung 4.1: Sockelanschluss „Standardausführung“

## 4-1.1 BAUTEILAUFBAUTEN

Der Sockel stellt den Anschluss aus drei grundlegend verschiedenen Bauteilen dar. Hier treffen Kellerwand (Stahlbeton), Außenwand (Brettsperrholz) und die Kellerdecke (Stahlbeton) aufeinander. In den folgenden Tabellen sind die jeweiligen Aufbauten mit ihren entsprechenden bauphysikalischen Materialeigenschaften aufgelistet.

**Tab.: 19: Aufbau Außenwand AW1**

Außenwand AW 1									
Nr.	Material	d	$\rho$	$m = d \cdot \rho$	$\lambda$	R	$\mu$	Sd	c
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[W/(mK)]	[(m <sup>2</sup> K)/W]	[-]	[m]	[J/(kgK)]
	Innen								
1	Gipsfaserplatte	1,25	850	1065,05	0,2	0,06	8,3	0,10	850
2	Mineralwolle	5,00	60	300,00	0,04	1,25	1,3	0,07	850
3	Brettsperrholz	9,00	410	3690,00	0,10	0,75	300/60	27	1300
4	Mineralwolle	7,50	60	450,00	0,04	1,88	1,3	0,10	850
5	Mineralwolle	5,00	60	300,00	0,04	1,25	1,3	0,07	850
6	Diffusionsoffene Folie	0,07	343	24,01	0,22	0,00	28,5	0,02	1260
7	Holz Fichte Lattung	2,50	500	1250,00	0,14	0,18	40	1,00	1600
8	Hinterlüftung	2,00	1,23	2,46	0,16	0,13	1	0,02	1008
9	Außenwandverkleidung	2,00	500	1000,00	0,14	0,14	40	0,80	1600
	Außen								

**Tab.: 20: Aufbau Kellerwand KW1**

Kellerwand KW 1									
Nr.	Material	d	$\rho$	$m = d \cdot \rho$	$\lambda$	R	$\mu$	Sd	c
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[W/(mK)]	[(m <sup>2</sup> K)/W]	[-]	[m]	[J/(kgK)]
	Innen								
1	Innenputz	0,50	1300	650,00	0,70	0,01	10/6	0,05	1000
2	Stahlbeton	20,00	2300	46000,00	2,30	0,09	130/80	26,00	1080
3	Feuchtigkeitsabd.	0,50	1100	550,00	0,23	0,02	50000	250,00	1000
4	XPS	5,00	35	175,00	0,033	1,52	150	7,50	1450
5	Sockelputz	0,50	2000	1000,00	1,00	0,01	30/6	0,15	2000
	Außen								

**Tab.: 21: Aufbau Kellerdecke KD1**

Kellerdecke KD 1									
Nr.	Material	d	$\rho$	$m = d \cdot \rho$	$\lambda$	R	$\mu$	Sd	c
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[W/(mK)]	[(m <sup>2</sup> K)/W]	[-]	[m]	[J/(kgK)]
	Innen								
1	Parkett	2,00	740	1480,00	0,16	0,13	0	0,00	1600
2	Zementestrich	5,00	2100	10500,00	1,60	0,03	15	0,75	850
3	Trennlage PE-Folie	0,20	410	82,00	0,33	0,01	35000	70,00	1260
4	Trittschalldämmung	2,00	60	120,00	0,04	0,50	1	0,02	1450
5	Schüttung geb.	5,00	350	1750,00	0,70	0,07	7	0,35	1000
6	Feuchtigkeitsabd.	0,20	1100	220	0,23	0,01	102000	204,00	1260
7	STB-Decke	20,00	2400	48000,00	2,30	0,09	50	10,00	1116
8	Innenputz	0,50	1150	1725,00	0,47	0,01	10	0,05	1000
	Außen								



## 4-2.1 BAUTEILAUFBAU

Der Außen- und Kellerwandaufbau entsprechen bei diesem Sockeldetail den Aufbauten AW1 und KW1 aus Kapitel 4-1.1. Aus diesem Grund wird hier nur der Bauteilaufbau des Betonsockels angeführt.

*Tab.: 22: Aufbau Sockelwand AW2*

Außenwand AW 2 (Sockel)									
Nr.	Material	d [cm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m = d * \rho$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	R [(m <sup>2</sup> K)/W]	$\mu$ [-]	Sd [m]	c [J/(kgK)]
Innen									
1	Gipsfaserplatte	1,25	850	1065,05	0,2	0,06	8,3	0,10	850
2	Schaumglas	5,00	125	625,00	0,053	0,94	10000	500,00	900
3	STB - Sockel	20,00	2400	48000,00	2,3	0,09	50	10,00	1116
4	Feuchtigkeitsabd.	0,20	2	0,40	0,23	0,01	102000	204,00	1260
5	XPS-R	8,00	32	256,00	0,035	2,29	150	12,00	1429
6	Betonfertigteile	5,00	2400	12000,00	2,3	0,02	50	2,50	1116
Außen									

## 4-3 SOCKELVARIANTE „STANDARDVARIANTE“(MIT WDVS)

Diese Variante unterscheidet sich von der in Kapitel Abbildung 4.1 „Standardvariante“ (mit Hinterlüftung) nur durch eine Außendämmung mittels Wärmedämmverbundsystem (WDVS), den Wegfall der Hinterlüftung und die damit verbundene Holzfassade als konstruktiven Witterungsschutz. Beim Wärmedämmverbundsystem wird der Witterungsschutz durch einen herkömmlichen Kalk-Zementputz auf einem geeigneten Putzträger bewerkstelligt. Wärmedämmverbundsysteme bestehen grundsätzlich aus drei miteinander kombinierten Baustoffen welche entweder geklebt, gedübelt oder mit Schienen bzw. Profilbefestigungen montiert werden können. Putz und Putzträger werden dabei von der Dämmung selbst getragen, welche vorwiegend als Platten versetzt werden. Die dafür verwendeten Materialien können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die Gruppe der synthetisch organischen Dämmstoffe werden aus den Materialien Polystyrol, Polyurethan und Phenolharz gebildet. Die Hauptvertreter der natürlich organischen Gruppe bestehen aus expandierten Kork, Holzfaserdämmstoffen, Hanf und Schilf. Abbildung 4.2 zeigt den Sockelanschluss im Vertikalschnitt.

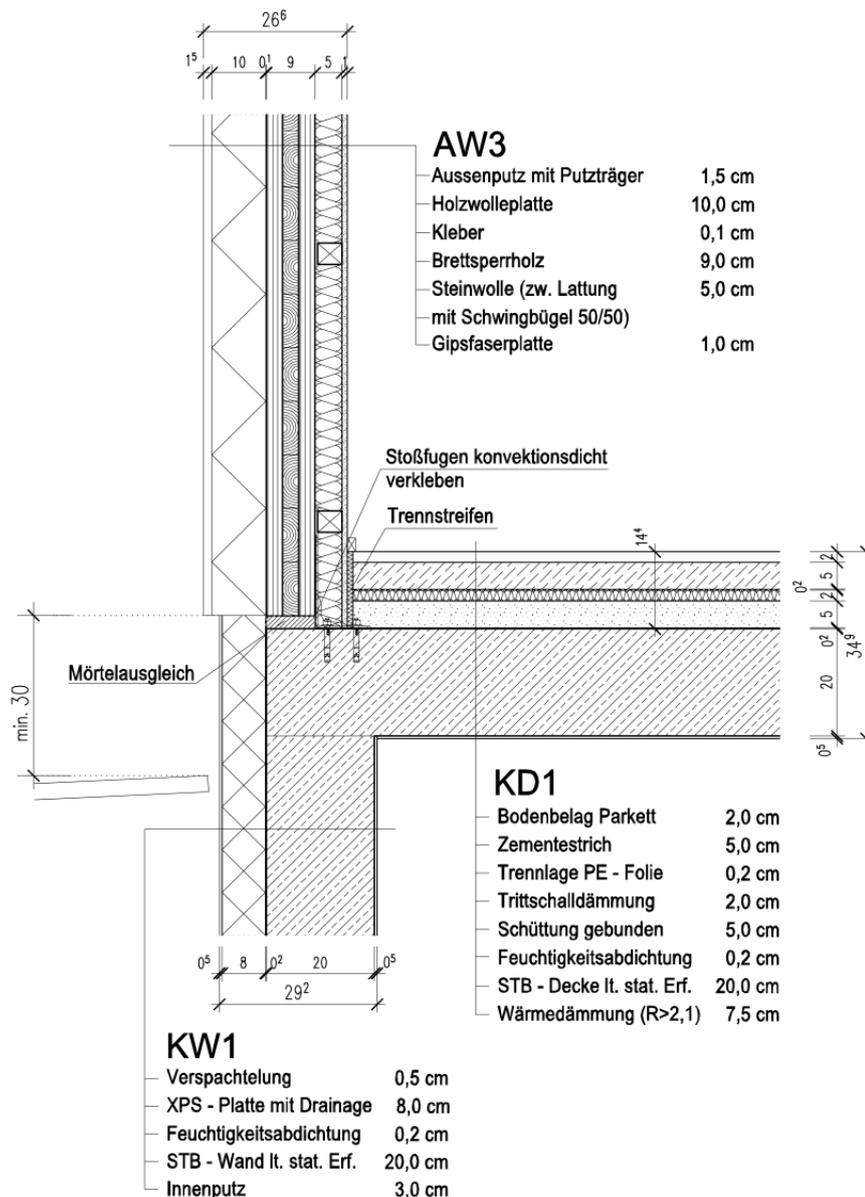


Abbildung 4.3: Sockelanschluss „Standardvariante“ (mit WDVS)

## 4-3.1 BAUTEILAUFBAU

Wie im vorangegangenen Kapitel 4-2.1 wird hier auf die bereits bekannten Bauteilaufbauten verzichtet und nur der Aufbau der Außenwand AW3 angegeben.

Tab.: 23: *Aufbau Sockelwand AW3*

Außenwand AW 3									
Nr.	Material	d	$\rho$	$m = d * \rho$	$\lambda$	R	$\mu$	Sd	c
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[W/(mK)]	[(m <sup>2</sup> K)/W]	[-]	[m]	[J/(kgK)]
	Innen								
1	Gipsfaserplatte	1,25	850	1065,05	0,2	6,27	8,3	0,10	850
2	Mineralwolle	5,00	60	300,00	0,04	125,00	1,3	0,07	850
3	Brettsperrholz	9,00	410	3690,00	0,12	75,00	50	4,50	1300
4	Kleber	0,50	1650	825,00	0,51	0,98	15	0,08	1
5	Holzfaserverplatte	10,00	150	1500,00	0,04	250,00	10	0,10	1030
6	Außenputz (mit Putzträger)	1,00	1300	1300,00	0,8	1,25	8	0,08	0
	Außen								

## 4-4 STATIONÄRE BERECHNUNGEN

### 4-4.1 RANDBEDINGUNGEN

Für das Innenklima wurde den stationären Berechnungen das Norminnenklima zugrunde gelegt. Im Innenraum beträgt die Temperatur  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$  bei einer relativen Feuchtigkeit von 50 % für die Berechnung von Kondensatbildung und 80% für das Risiko von Schimmelpilzbildung. Der Keller wurde als konditionierter Raum mit denselben Randbedingungen berücksichtigt.

Für ein generelles Projekt in Österreich müssen laut ÖNORM B 8110-2:2003 die Klimadaten für die Regression SB (Beckenlandschaft im Süden) herangezogen werden. Der ungünstigste Wert fällt dabei auf die Landeshauptstadt Klagenfurt mit einer Außentemperatur von  $\theta_e = -12,8^\circ\text{C}$  bei 80% relativer Luftfeuchte. Die Werte der Wärmeübergangswiderstände können Tabelle 7 entnommen werden, wobei für den Kellerbereich aufgrund schlechterer Lüftungsverhältnisse ein Wärmeübergangswiderstand von 0,25 [m<sup>2</sup>k/W] angenommen wurde.

Tab.: 24: *Zusammenstellung der in der Berechnung verwendeten Wärmeübergangswiderstände*

$R_{Se}$ und $R_{Si}$	Richtung des Wärmestromes		
	horizontal	aufwärts	abwärts
$R_{Si}$ [m <sup>2</sup> K/W] ( $h_i$ [W/m <sup>2</sup> K])	0,13 (7,69)	0,10 (10,0)	0,17 (5,88)
$R_{Se}$ [m <sup>2</sup> K/W] ( $h_e$ [W/m <sup>2</sup> K])	0,04 (25,0)	0,04 (25,0)	0,04 (25,0)

## 4-4.2 BERECHNUNG DER U-WERTE

### 4-4.2.1 Außenwand AW1

Tab.: 25: U-Wert Berechnung Außenwand AW1

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu \cdot d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m <sup>2</sup> K)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,13		19,2	2224
1	Gipsfaserplatte	0,013	10,0	0,125	0,320	0,039	25,600	19,0	2191
2	Steinwolle	0,050	1,0	0,05	0,040	1,250	0,800	11,3	1337
3	Brettsperrholz	0,090	70,0	6,3	0,120	0,750	1,333	6,7	980
4	Steinwolle	0,075	1,0	0,075	0,040	1,875	0,533	-4,8	407
5	Steinwolle	0,050	1,0	0,05	0,040	1,250	0,800	-12,5	207
6	Diffusionsoffene Folie	0,002	28,5	0,057	0,230	0,009	115,000	-12,6	206
	Wärmeübergang außen					0,04		-12,8	202
				$\sum Sd =$	6,695	RT =	5,343		
						U=1/RT =	0,187		

Der Wärmeübergangskoeffizient der Außenwand AW1 ergibt sich demnach zu rund  $U = 0,19 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ . Laut OIB-Richtlinie 6 wird für Wände gegen Außenluft ein U-Wert von mindestens  $0,35 \leq \text{[W/m}^2\text{K]}$  gefordert. Aus wärmeschutztechnischer Sicht stellt dieser Aufbau also eine sehr gute Lösung dar.

### 4-4.2.2 Außenwand AW2

Tab.: 26: U-Wert Berechnung Außenwand AW2

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu \cdot d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m <sup>2</sup> K)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,13		18,6	2138
1	Gipsfaserplatte	0,013	10,0	0,10375	0,200	0,063	16,000	17,9	2047
2	Schaumglas	0,050	10000,0	500	0,053	0,943	1,060	7,5	1035
3	STB - Sockel	0,200	50,0	10	2,300	0,087	11,500	6,5	969
4	Feuchtigkeitsabdichtung	0,002	102000,0	204	0,230	0,009	115,000	6,4	963
5	XPS-R-Platte mit Drainage	0,050	150,0	7,5	0,035	1,429	0,700	-9,3	275
6	Betonfertigteil	0,050	50,0	2,5	2,300	0,022	46,000	-9,6	270
	Wärmeübergang außen					0,04		-12,8	202
				$\sum Sd =$	724,125	RT =	2,722		
						U=1/RT =	0,367		

Der U-Wert der Außenwand AW2 beträgt rund  $U = 0,37 \text{ [W/m}^2\text{K]}$  und liegt damit über dem geforderten Wert von  $0,35 \leq \text{[W/m}^2\text{K]}$ . Allerdings stellt AW2 keine durchgehende Außenwand im eigentlichen Sinne dar, sondern einen hochgezogenen Sockelbereich. Jedoch ist dieser hohe U-Wert ein Indiz für eine Wärmebrücke, also einen Bereich mit erhöhtem Wärmedurchgang. Begründet kann dies durch den relativ hohen Betonanteil und dessen hohen Wärmeleitkoeffizienten von  $\lambda = 2,3 \text{ [W/mK]}$  werden.

### 4-4.2.3 Außenwand AW3

**Tab.: 27: U-Wert Berechnung Außenwand AW3**

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu \cdot d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m <sup>2</sup> K)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,13		19,2	2221
1	Gipsfaserplatte	0,013	10,0	0,10375	0,200	0,063	16,000	18,8	2167
2	Mineralwolle	0,050	1,3	0,065	0,040	1,250	0,800	10,9	1305
3	Brettsperrholz	0,090	70,0	6,3	0,120	0,750	1,333	6,2	948
4	Armiermörtel	0,005	15,0	0,075	0,510	0,010	102,000	6,1	944
5	Holzfaserdämmplatte	0,100	10,0	1	0,040	2,500	0,400	-9,6	269
6	Kalkputz	0,020	8,0	0,16	0,800	0,025	40,000	-9,7	265
	Wärmeübergang außen					0,04		-12,8	202
				$\Sigma Sd =$	7,725	RT =	4,767		
						1/RT =	0,210		

Wie in Kapitel 4-3 schon erwähnt unterscheidet sich AW3 von AW1 lediglich durch Art des Dämmstoffes und dessen Stärke. Während bei AW1 eine Mineralwolle mit insgesamt  $d = 12,5$  cm zum Einsatz kommt, besteht die Dämmung von AW2 aus einer Holzfaserdämmplatte mit einer Stärke von  $d = 10$  cm. Der Unterschied der U-Werte ist bei diesen zwei Aufbauten nur der Dämmstärke zu schulden, da die Wärmeleitkoeffizienten beider Dämmmaterialien einen Wert von  $\lambda = 0,04$  [W/mK] aufweisen. Trotzdem ist der Wärmeschutz dieses Aufbaues mit einem U-Wert von  $U = 0,21$  [W/m<sup>2</sup>K] als gut einzustufen.

### 4-4.2.4 Kellerdecke KD1

**Tab.: 28: U-Wert Berechnung Außenwand KD1**

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu \cdot d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m <sup>2</sup> K)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,17		19,6	2281
1	Parkett	0,020	50,0	1,0	0,160	0,125	8,000	19,3	2241
2	Zementestrich	0,050	15,0	0,75	1,600	0,031	32,000	19,3	2232
3	Trennlage PE-Membran	0,002	35000,0	70	0,500	0,004	250,000	19,2	2230
4	Trittschaldämmung	0,020	1,0	0,02	0,033	0,606	1,650	17,9	2045
5	Schüttung gebunden	0,050	7,0	0,35	0,700	0,071	14,000	17,7	2025
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,002	102000,0	204	0,230	0,009	115,000	17,7	2022
7	STB-Decke	0,200	50,0	10	2,300	0,087	11,500	17,5	1997
8	Innenputz	0,020	10,0	0,2	0,470	0,043	23,500	17,4	1985
	Wärmeübergang außen					0,17		17	1937
				$\Sigma Sd =$	286,320	RT =	1,316		
						1/RT =	0,760		

Die Kellerdecke KD1 stellt die horizontale Trennung zwischen einem Wohnraum und einem konditioniertem Keller dar, wobei dieser mit einer Raumtemperatur von  $\theta_e = 17^\circ\text{C}$  angenommen wurde um eine mögliche Temperaturabsenkung in die spätere Berechnung der „Kondenswasserbildung“ miteinfließen lassen zu können. Der U-Wert ergibt sich hier zu  $U = 0,76$  [W/m<sup>2</sup>K] und liegt damit unter dem erforderlichen Wert von  $U \leq 0,9$  [W/m<sup>2</sup>K].

### 4-4.3 BERECHNUNG NACH GLASER 1D

#### 4-4.3.1 Außenwand AW1

Abbildung 4.4 lässt erkennen, dass der Verlauf des theoretischen Wasserdampfdruckes nie den Verlauf des Sättigungsdampfdruckes schneidet. Somit entspricht der theoretische Wasserdampfdruck dem tatsächlichen und es besteht keine Gefahr einer Kondenswasserbildung. Der größte Wert der Abszisse entspricht dem gesamten  $S_d$ -Wert des Bauteiles welcher mit 6,7 [m] sehr gering ausfällt. Obwohl Brettsperrholz im Vergleich einen höheren Diffusionswiderstand aufweist als alle anderen in diesem Bauteil verwendeten Materialien, kann der vorgestellte Bauteilaufbau trotzdem als diffusionsoffene Bauweise eingestuft werden.

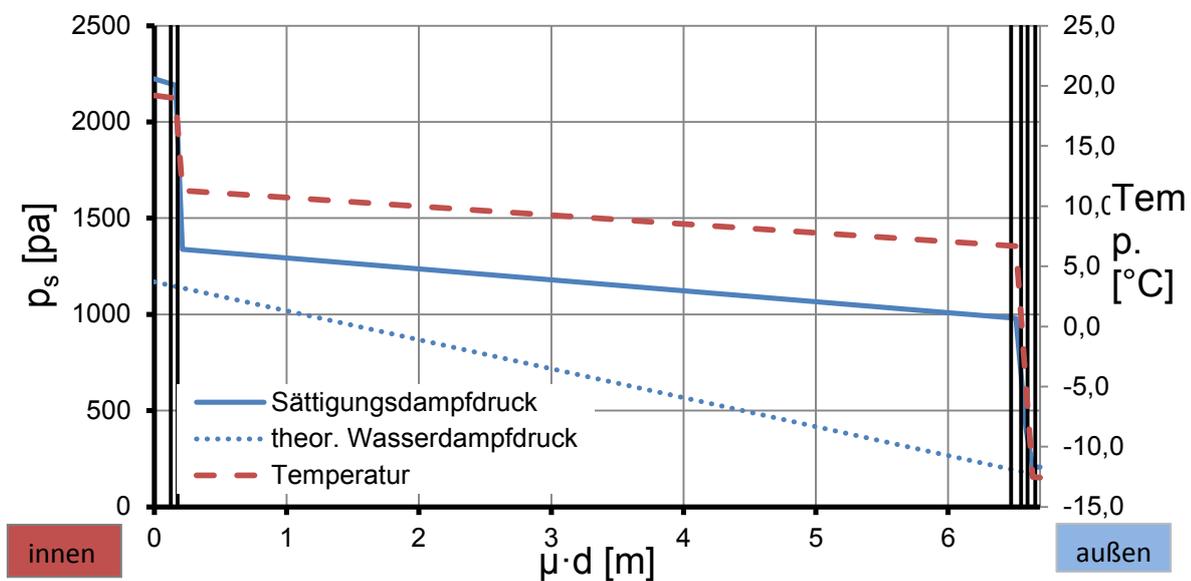


Abbildung 4.4: Verfahren nach Glaser: Außenwand AW1

#### 4-4.3.2 Außenwand AW2

Auch bei Außenwand AW2 schneidet der Verlauf des Partialdruckes den Sättigungsdampfdruckverlauf nicht und der Verlauf des theoretischen Wasserdampfdruckes entspricht daher dem des tatsächlichen. Weiters ist in Abbildung 4.5 im Bereich von 510 bis 714 [m] ein annähernd konstanter Verlauf des Sättigungsdampfdruckes zu erkennen, was auf einen sehr dichten Baustoff (Baustoffe gelten ab einem  $SD$ -Wert  $\geq 1500$  m als dicht) hinweist. Auch die Temperatur ändert sich in diesem Bereich nur marginal. Der konstante Sättigungsverlauf ist auf den hohen Diffusionswiderstand der Feuchtigkeitsabdichtung zurückzuführen, während die Ursache für den gleichbleibenden Temperaturverlauf in der sehr geringen Schichtdicke der Abdichtung liegt. Im Vergleich zur Außenwand AW1 erkennt man bei Betrachtung der diffusionäquivalenten Luftschichtdicke ( $\mu \cdot d$ ) schnell den großen Unterschied. Hier beträgt der gesamte  $SD$ -Wert rund 724 [m], was einem, in Bezug auf den Diffusionsdurchgang, relativ dichten Bauteilaufbau entspricht. Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen dass Außenwand AW2 keine durchgehende Außenwand darstellt, sondern einen hochgezogenen Sockel im unteren Bereich der Außenwand AW1. Jedoch behindert dieser Bauteilaufbau in einem gewissen Bereich die Diffusionsoffenheit und stellt, wie später noch gezeigt werden wird, zudem eine Wärmebrücke dar.

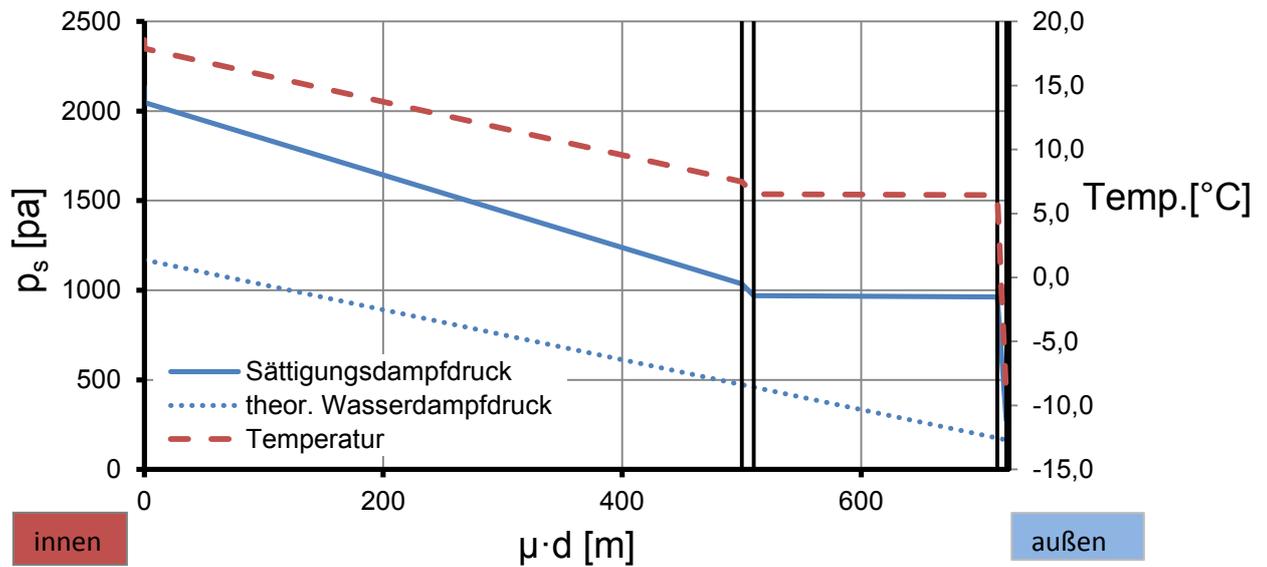


Abbildung 4.5: Verfahren nach Glaser: Außenwand AW2

#### 4-4.3.3 Außenwand AW3

Die Verläufe von Außenwand AW3 ähneln aufgrund des fast identen Aufbaues stark den Verläufen von AW1. Auch hier bildet die dichteste Schicht, also jene Schicht mit dem größten SD-Wert, das Brettsperrholz (Bereich 0,17 [m] bis 6,3 [m]). Der gesamte  $S_D$ -Wert beläuft sich auf 7,7 [m] und unterscheidet sich daher nur geringfügig von dem der Außenwand AW1 (6,7 [m]). Beide Aufbauten, AW1 und AW3, entsprechen also diffusionsoffenen Bauweisen. Der steile Abfall der Temperatur in den inneren und äußeren Schichten hängt mit der geringen Wärmeleitfähigkeit der Dämmung zusammen ( $\lambda=0,04$  [W/mK]). Obwohl der Temperaturverlauf im Brettsperrholz ( $\lambda=0,12$  [W/mK]) eine geringe Steigung aufweist, fällt der Temperaturabfall (4,7 [°C]) von der Innenseite des Brettsperrholzes hin zur Außenseite eher gering aus. Dies spiegelt die guten Wärmedämmeigenschaften von Holz wider.

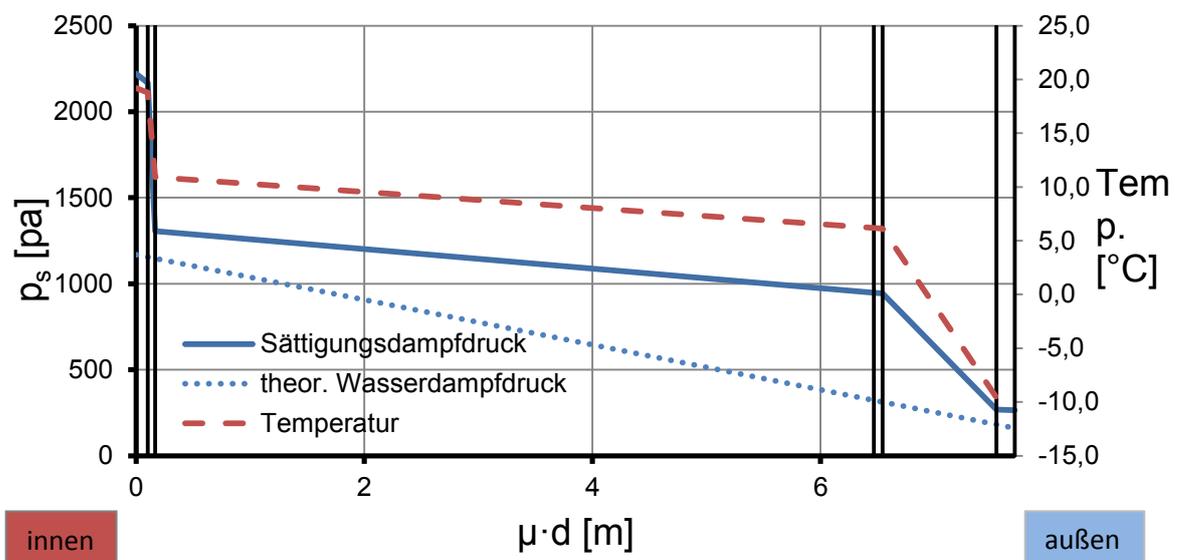


Abbildung 4.6: Verfahren nach Glaser: Außenwand AW3

#### 4-4.4 BERECHNUNG NACH GLASER 2D

Die Simulationssoftware HTFlux ist in der Lage, hochauflösende, zweidimensionale Simulationen von Wärme- und Feuchtetransport zu generieren. Dieses neuartige Verfahren (GLASER 2D) beruht auf dem bewährten Glaser Verfahren und wendet dieses zweidimensional an. Damit können Berechnungen von Taupunkt-Flächen inklusive der Ermittlung Tauwasser- und Verdunstungsmengen zweidimensional durchgeführt werden. Des Weiteren ist auch die Berechnung der Temperaturfaktoren  $f_{Rsi}$  im Hinblick auf Kondenswasserbildung und das Risiko von Schimmelpilzbildung möglich. Um Wärmebrücken quantitativ beurteilen zu können, ermöglicht diese Softwareapplikation auch die Berechnung von  $\Psi$ -Werten.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse verschiedener bauphysikalischer Vorgänge im vorliegenden Sockeldetail. Betrachtete physikalische Kenngrößen sind:

- Temperaturverteilung
- Wärmestrom
- Feuchtegehalt
- Dampfstrom
- Partialdruck

##### 4-4.4.1 Sockelvariante „Standardausführung“ (mit Hinterlüftung)

In Abbildung 4.7 ist der Temperaturverlauf im Bereich des Erdgeschosssockels dargestellt. Man erkennt den Einfluss der Wärmebrücke am un stetigen Verlauf der Isotherme (Linien gleicher Temperatur) im Bereich der Schwelle. Jedoch beruhigen sich die Isothermen relativ schnell und verlaufen in einem geringen Abstand von rund 30 cm zur Schwelle wieder parallel zu den Bauteiloberflächen. Dies deutet auf einen eher geringen Wärmebrückeneinfluss hin. Die minimale Oberflächentemperatur beträgt hier 18,62°C. Es kommt also weder zur Bildung von Oberflächenkondensat ( $T_{RH100\%} = 9,27^\circ\text{C}$ ) noch besteht ein Risiko der Schimmelpilzbildung ( $T_{RH80\%} = 12,63^\circ\text{C}$ ) an der Oberfläche. Auch der geforderte  $f_{Rsi}$ -Faktor von 0,775 [-] (für Schimmel) bzw. 0,673 [-] (für Kondensat) wird mit 0,958 eingehalten. Dies entspricht einem Ausnutzungsgrad von umgerechnet 70 % bzw. 80 %.

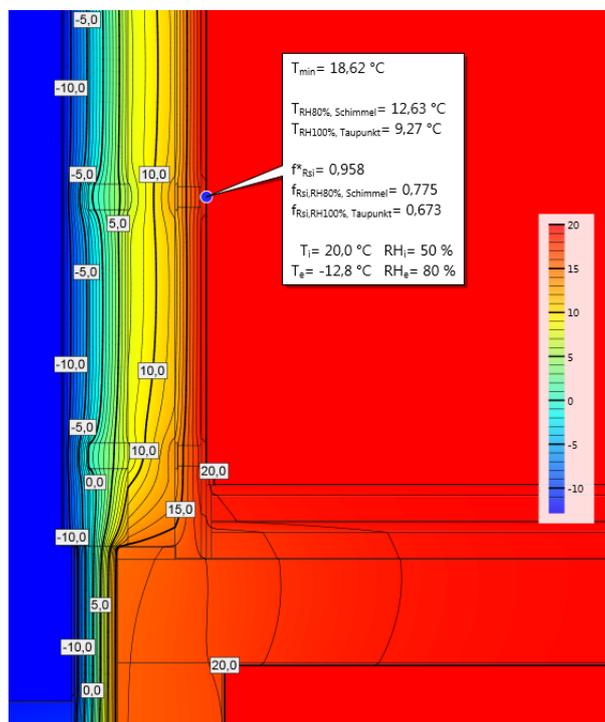


Abbildung 4.7: Temperaturverlauf EG

Im Kellergeschoss (siehe Abbildung 4.8) wurde die Innentemperatur mit 20°C bei einer relativen Luftfeuchte von 50% angenommen.

Der Wärmeübergangswiderstand wurde auf 0,25 [W/mK] erhöht, da man beim Keller von einem weniger gut belüfteten Raum ausgehen muss und dieser Umstand den Übergang von Luft zur Bauteiloberfläche erhöht. Im Keller liegt die minimale Oberflächentemperatur mit 17,06°C etwas unter jener im Erdgeschoss; allerdings kommt es auch hier weder zur Kondensat- noch zur Schimmelbildung. Der  $f_{Rsi}$ -Faktor beträgt 0,910 [-] und liegt damit über dem geforderten von 0,775 [-] bzw. 0,673 [-]. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die 15°C-Isotherme außerhalb des Schwellenbereiches liegt. Das bedeutet, dass die Taupunkttemperatur im Bereich der Schwelle nicht unterschritten wird. Dies ist deshalb von großer Bedeutung, da hier die BSP-Wand aufgelagert wird und eine Kondenswasserbildung in diesem Bereich unbedingt verhindert werden muss.

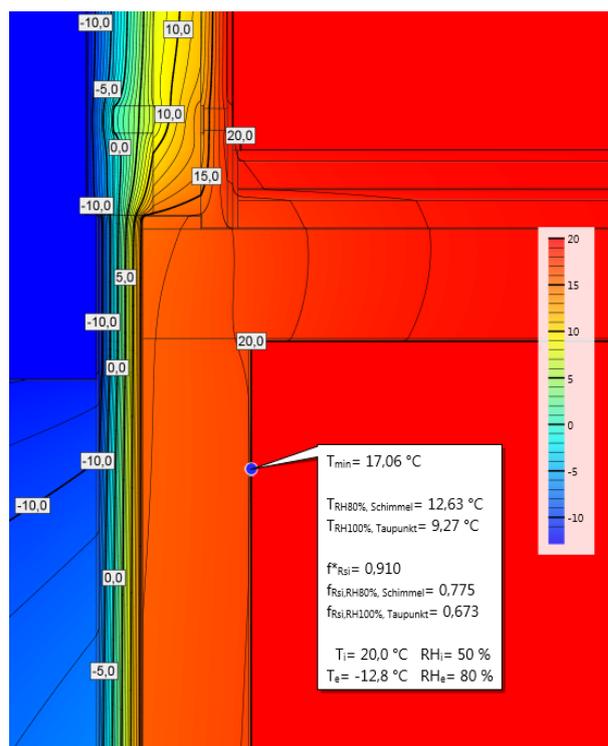


Abbildung 4.8: Temperaturverlauf KG

Betrachtet man die Kellerwand, so erkennt man, dass die Isothermen weiter nach außen wandern als im oberen ungestörten Bereich der Außenwand AW1. Wie noch gezeigt werden wird, liegt dieses Verhalten an der geringen Wärmeleitfähigkeit des aufgetragenen XPS ( $\lambda = 0,035\text{ [W/mK]}$ ) und der dämmenden Wirkung des Erdreichs.

Abbildung 4.9 zeigt den Wärmestrom durch den Bauteilanschluss. In den helleren Bereichen findet ein erhöhter Wärmestrom statt, da in diesen Bereichen Materialien mit höherer Wärmeleitfähigkeit verwendet wurden. Der größte Wärmeverlust tritt also über der Decke und der Kellerwand (Stahlbeton) auf. Dies ist auch bei der Anordnung Lattung zu beachten; hier stellt sich eine lokale Wärmebrücke ein. Je größer also die Rohdichte eines Baustoffes, umso höher ist der dort auftretende Wärmestrom. Abbildung 4.13 zeigt dazu ein sehr gegensätzliches Bild. Der Dampfstrom ist nämlich dort am größten, wo die Rohdichte am geringsten ist.

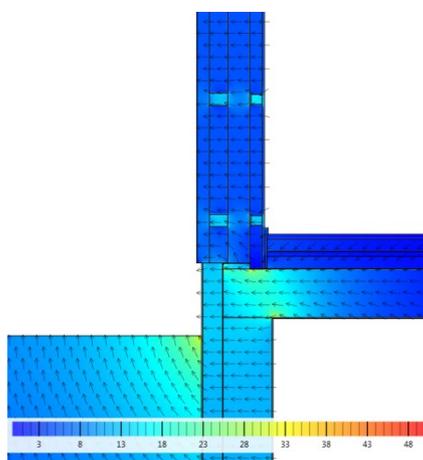


Abbildung 4.9: Wärmestrom [W/m²]

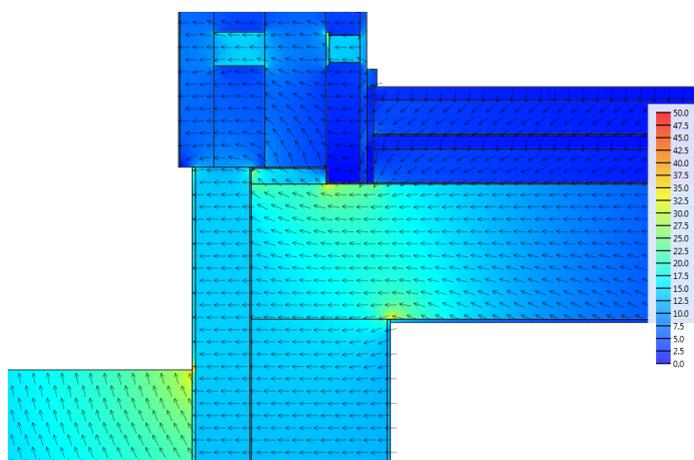


Abbildung 4.10: Wärmestrom [W/m²] im Detail

In Abbildung 4.11 ist der Verlauf der relativen Feuchte im Bauteilinneren dargestellt. Unter den eingangs definierten Randbedingungen kommt es zu keiner Bildung von Kondensat innerhalb der Konstruktion. Es ist jedoch eine erhöhte relative Feuchte im Bereich der BSP-Wand zu erkennen. Dies ist auf den höheren Diffusionswiderstand von Brettsperrholz zurückzuführen. Auch an der Wandaußenseite im Bereich der Windsperre ist dieser Effekt zu beobachten. Die maximalen Werte betragen hier um die 80 %. Abbildung 4.12 zeigt den Sockelanschluss im Detail. Diese Darstellungsart der relativen Feuchte erleichtert die qualitative Beurteilung des Feuchteschutzes und zeigt deutlich kritische Stellen. Wie bereits in Kapitel 4-4.3.1 angemerkt, weist Brettsperrholz einen relativ hohen Diffusionswiderstand auf. Dies erkennt man leicht an den gelb bis grünlich eingefärbten Stellen an der Innenseite der Brettsperrholzwand. Die zwei ersten Schichten (Gipskarton und Mineralwolle) ermöglichen ein leichtes durchdiffundieren des Wasserdampfes bis zur Innenseite der BSP-Wand. Hier wird dieser Diffusionsstrom gebremst, und es kommt zu einer erhöhten Ansammlung von Feuchtigkeit.

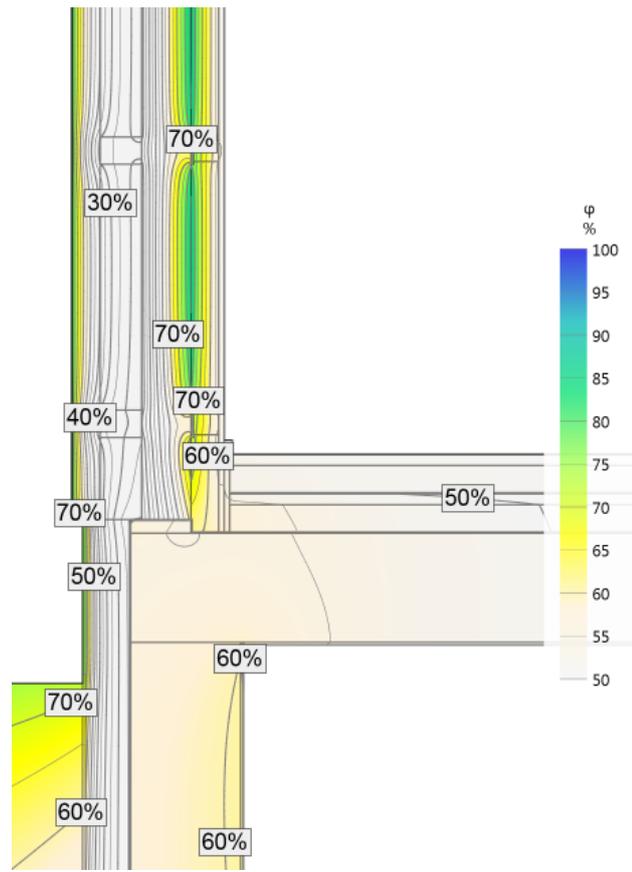


Abbildung 4.11: relative Feuchte  $\varphi$  [%]

Der Dampfstrom sucht sich demnach immer den Weg des geringsten Diffusionswiderstandes und folgt dabei dem Partialdruckgefälle. Die Darstellung des Dampfstromes erleichtert das rasche Erkennen von Zonen erhöhter Dampfdiffusion (heller Bereich). Im konkreten Fall liegt der höchste Dampfstrom im Bereich zwischen der Sesselleiste und dem Polsterholz (siehe Abbildung 4.13). Hier kommt es zu einem erhöhten Feuchtigkeitseintrag im Schwellenbereich der in etwa zwischen 15 bis 20 [g/m<sup>2</sup>h] liegt.



Abbildung 4.12: relative Feuchte  $\varphi$  [%] im Detail

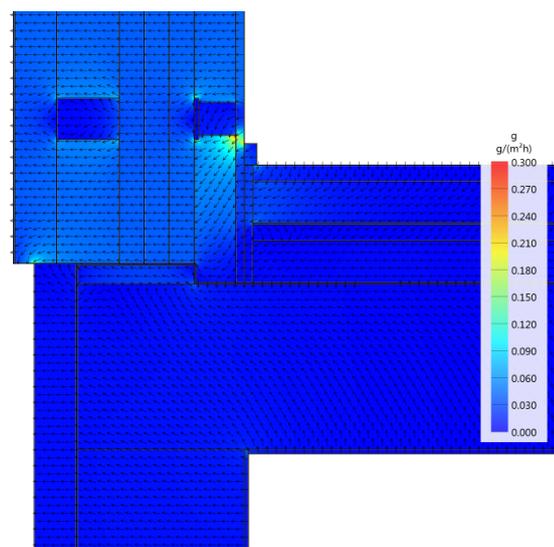


Abbildung 4.13: Dampfstrom

Wie Anfangs erwähnt, ist bei dieser Detaillösung der Wärmebrückeneinfluss relativ gering. Bei der Berechnung wurde eine außenmaßbezogene  $\Psi$ -Wert-Berechnung gewählt, wobei die Schenkellängen  $A_{AW1}$  und  $A_{AW2}$  Abbildung 4.14 zu entnehmen sind. Der Knotenpunkt ist für einen konditionierten Keller an der Deckenoberkante anzusetzen. Die Berechnung mittels *HTFlux* ergab dabei einen  $\Psi$ -Wert von 0,039 [W/mK], wobei der Knotenpunkt an der Deckenoberkante gewählt wurde. Der berechnete  $\Psi$ -Wert ist ein außenmaßbezogener Wert dessen Außenmaße in Abbildung 4.14 dargestellt sind. Vergleicht man diesen  $\Psi$ -Wert mit dem eines Passivhauses ( $\Psi \leq 0,01$ ), wird deutlich, dass diese Variante eine gute Lösung in Hinblick auf die Wärmebrückenthematik darstellt.

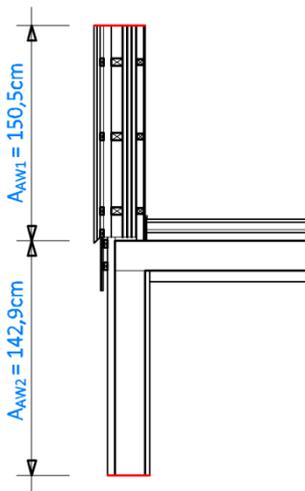


Abbildung 4.14: Außenmaße

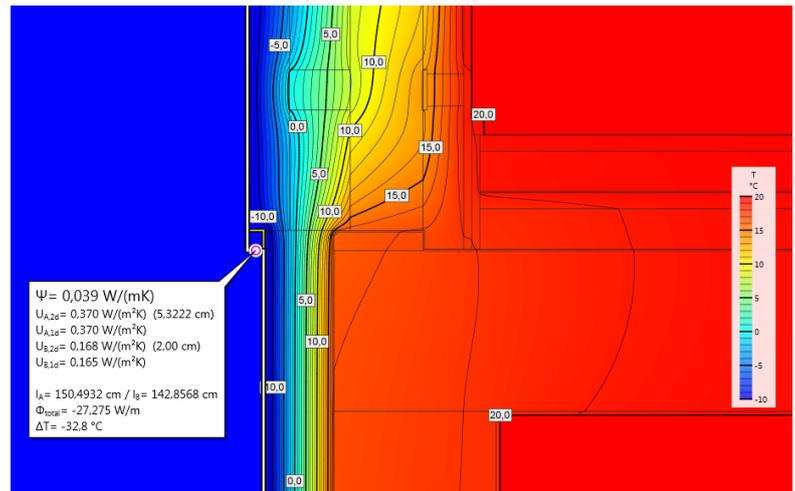


Abbildung 4.15:  $\Psi$ -Wert

#### 4-4.4.2 Sockelvariante „Betonsockel“

Wie auch schon in Kapitel 4-4.4.1 erläutert, werden auch hier dieselben Randbedingungen (relative Luftfeuchte, Temperatur, etc.) zur bauphysikalischen Analyse angesetzt.

Die minimale Oberflächentemperatur ergibt sich im Erdgeschoß zu 18,6°C. Da die kritische Temperatur für Schimmelbildung ( $T_{RH80\%} = 12,63^\circ\text{C}$ ) nicht unterschritten wird, entsteht kein Schimmelpilz an der Oberfläche. Außerdem besteht auch kein Risiko der Bildung von Oberflächenkondensat ( $T_{RH100\%} = 9,27^\circ\text{C}$ ). Abbildung 4.16 lässt sofort erkennen, dass hier der Einfluss auf den Verlauf der Isotherme, bei Ausführung eines hochgezogenen Betonsockels, weitaus stärker ist als jener ohne bzw. bei Ausführung mit einer Mörtelausgleichsschicht (siehe Kapitel 4-4.4.1). Es handelt sich hierbei also um eine klassische materialbedingte Wärmebrücke. Bei genauer Betrachtung der 10°C Isotherme bemerkt man, dass diese im Bereich des Auflagers einen Knick aufweist und dann inmitten der Brettspertholz wand weiter verläuft. Dieser Bereich ist als äußerst kritisch anzusehen, da die Temperatur des Holzes zu einem großen Teil im Taupunktbereich liegt.

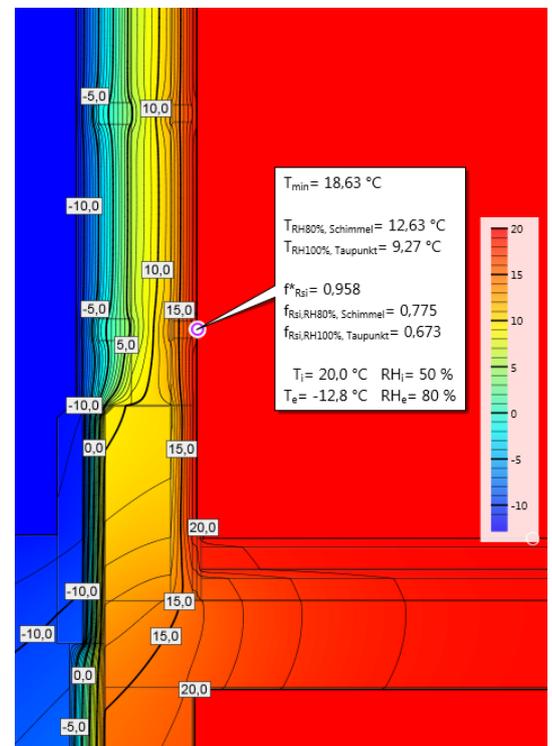


Abbildung 4.16: Temperaturverlauf EG

Die Oberflächentemperatur im Keller (siehe Abbildung 4.17) liegt mit ca.  $16,3^{\circ}\text{C}$  um etwa  $0,8^{\circ}\text{C}$  niedriger als bei der Standardvariante. Man erkennt den Einfluss der Wärmebrücke auch gut an der  $15,0^{\circ}\text{C}$  - Isotherme, welche, im Vergleich zu vorher, durch den erhöhten Wärmefluss im Betonsockel weit nach unten gezogen wird. Der Sockelbereich ist also generell kühler als ein konventionell ausgeführter Sockel. Trotz des günstig wirkenden Erdreichs brauchen die Isotherme lange, um wieder parallel zu den Bauteiloberflächen zu verlaufen (ungestörter Bereich). Der  $f_{\text{Rsi}}$ -Faktor errechnet sich im Kellergeschoß zu  $0,886$  und liegt damit über den beiden geforderten Werten von  $0,775$  (Schimmel) und  $0,673$  (Kondensat).

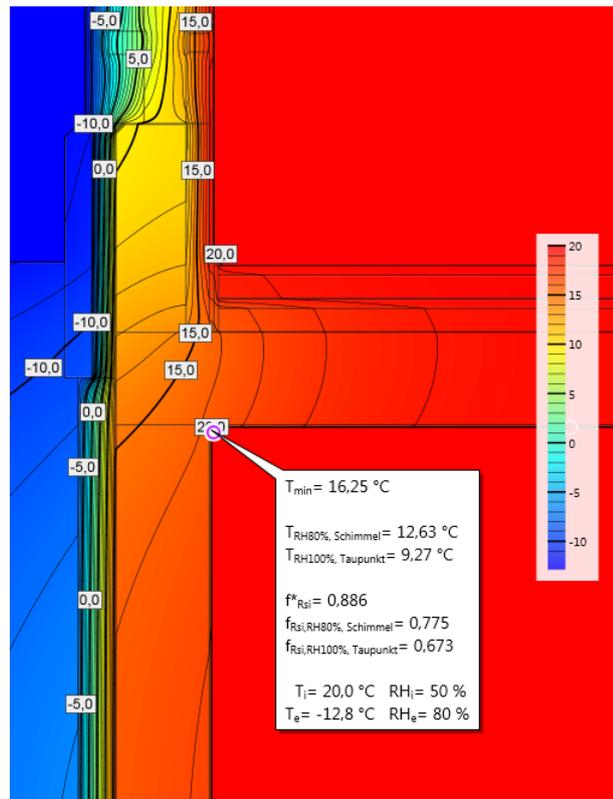


Abbildung 4.17: Temperaturverlauf KG

In Abbildung 4.19 und Abbildung 4.18 ist jeweils wieder der Wärmestrom dargestellt. Wie unschwer zu erkennen ist, findet im Bereich Decke/Betonsockel ein sehr hoher Wärmetransport statt. Dies bestätigt den Verdacht einer Wärmebrücke. An den Vektoren kann man auch den Verlauf bzw. den Weg des Wärmedurchflusses erkennen, der abgesehen vom Temperaturgefälle den Weg durch Materialien höherer Rohdichte und damit höherer Wärmeleitfähigkeit sucht. Neben dem wärmeschutztechnischen Nachteil dieser Ausführungsvariante sollen hier noch der konstruktive Aufwand und der wirtschaftliche Nachteil nochmals erwähnt werden. Denkt man an Einbauelemente wie Fenster und Türen wird einem schnell der damit verbundene, geringe Vorfertigungsgrad klar. Gerade aber in der Holz-Massivbaubauweise mit Brettsperrholz stellt die aus dem hohen Vorfertigungsgrad resultierende kurze Bauzeit, einen der größten Vorteile dar.

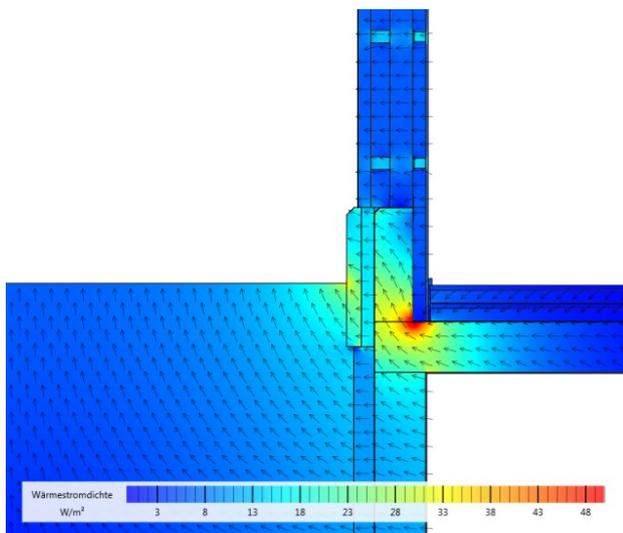


Abbildung 4.19: Wärmestrom [ $\text{W/m}^2$ ]

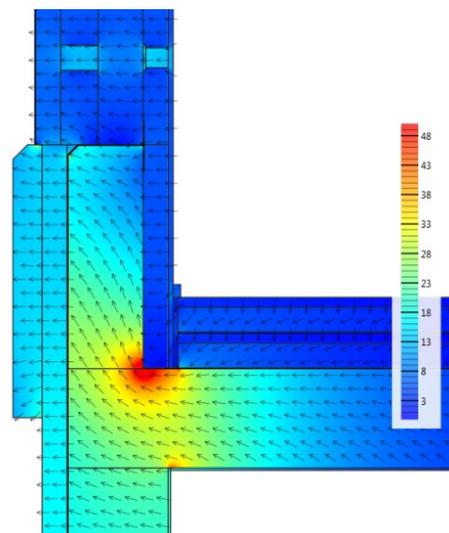


Abbildung 4.18: Wärmestrom [ $\text{W/m}^2$ ] im Detail

Die relative Feuchte in diesem Sockelanschluss (siehe Abbildung 4.20) ist im Vergleich zur Standardvariante generell höher. Dies hat zum einen den Grund, da der Betonsockel aufgrund seiner hohen Rohdichte und den geschlossenen Poren einen relativ großen Wasserdampfdiffusionswiderstand aufweist, und zum anderen, die durch die hohe Wärmeleitfähigkeit bedingten niedrigen Temperaturen. Aber auch hier betragen die Werte der relativen Feuchte an der Innenseite der Brettsperrholzwand bis zu 80%. Ferner sind in der Grenzschicht zwischen Betonfertigteile und Dämmung (XPS) höhere Feuchtigkeitswerte zu verzeichnen. Dies könnte, bei länger andauerndem Feuchtigkeitseintrag, eventuell auch ein Ablösen des Klebers verursachen.

In Abbildung 4.22 ist die dazugehörige Detailansicht dargestellt. Hier sind Feuchtigkeitsbereiche über 80% im und um den Betonsockel zu erkennen. Abbildung 4.21 zeigt dagegen den, vor allem im Betonsockel, geringen Dampfstrom durch die Bauteilschichten. Wenn es also darum geht, diffusionsoffene Bauweisen zu ermöglichen, stellt eine solche Ausführung eine ungeeignete Variante dar. Sinn und Zweck dieser Konstruktion ist es eigentlich die BSP-Wand aus der für Holz so kritischen Spritzwasserzone zu „heben“. Sieht man sich jedoch die Feuchtigkeitswerte am Betonsockel knapp unter der BSP-Wand an, darf die Sinnhaftigkeit der Ausführung eines Betonsockels in Frage gestellt werden. Ergänzend muss noch darauf hingewiesen werden, dass bei den stationären Simulationen nach Glaser-2D noch kein Spritzwasseranfall berücksichtigt wurde.

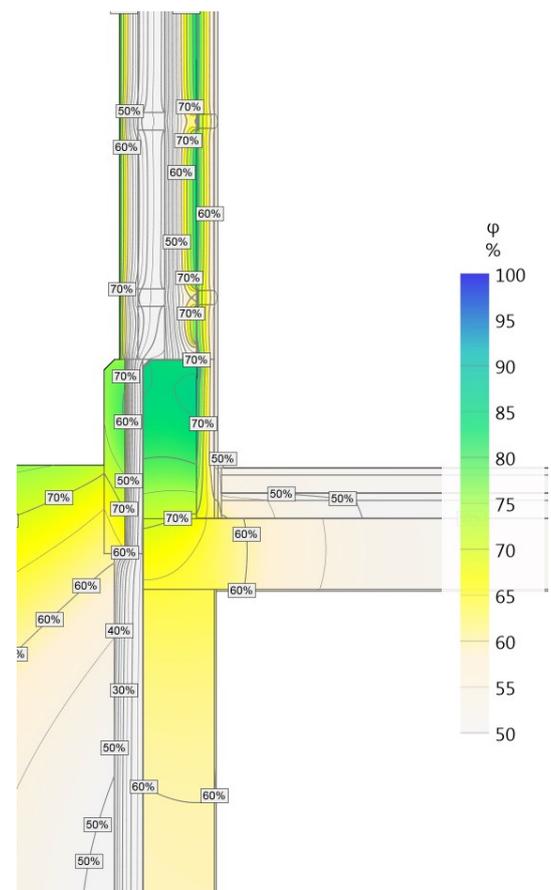


Abbildung 4.20: relative Feuchte  $\varphi$  [%]



Abbildung 4.22: relative Feuchte  $\varphi$  [%] im Detail

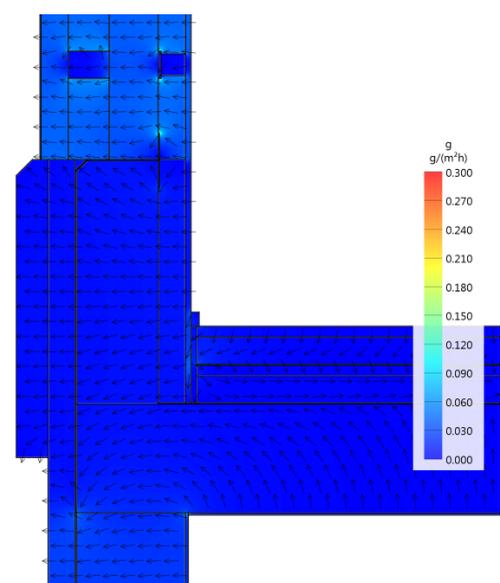


Abbildung 4.21: Dampfstrom

Bei der Berechnung des  $\Psi$ -Wertes wird nochmals deutlich, dass es sich hier um eine Wärmebrücke handelt, da dieser mit  $0,172 \text{ [W/(mK)]}$  (siehe Abbildung 4.24) sehr hoch ausfällt. Im Vergleich zur Standardlösung ( $0,039 \text{ [W/(mK)]}$ ) ist der ermittelte Wert fast um das 4,5-fache höher. Die verwendeten Außenmaße sind in Abbildung 4.24 dargestellt (siehe Kapitel 4-4.4.1).

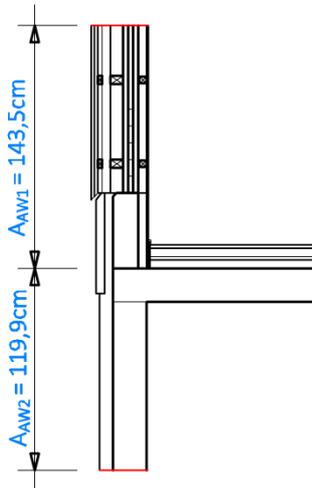


Abbildung 4.23: Außenmaße

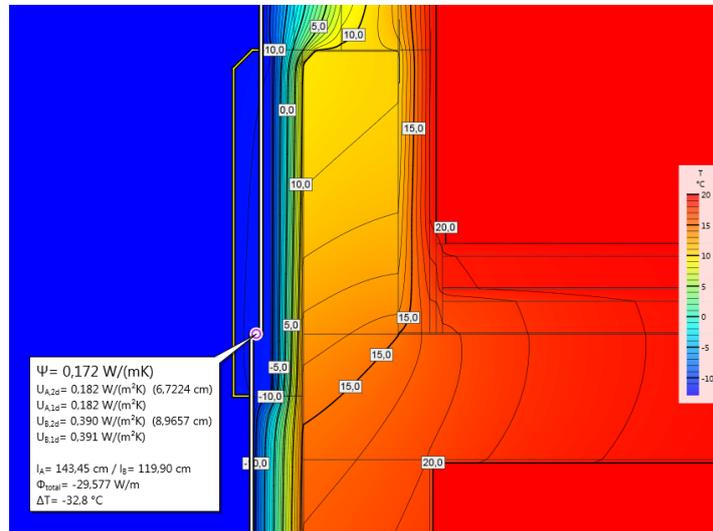


Abbildung 4.24:  $\Psi$ -Wert

#### 4-4.4.3 Sockelvariante „Standardvariante“ (mit WDVS)

Im Vergleich zur „Standardvariante (mit Hinterlüftung)“ fällt sofort die starke Ähnlichkeit der Isotherme auf. Dies begründet sich auf der Tatsache, dass bei der Berechnung bauphysikalischer Bemessungswerte nach ÖNORM EN ISO 6946:2008 geprüft werden muss, ob eine Hinterlüftung in der Simulation angesetzt werden darf oder nicht. Handelt es sich um eine stark belüftete Luftschicht mit einer Hinterlüftungsfläche von  $A \geq 1500 \text{ mm}^2$  pro Laufmeter für vertikal belüftete Luftschichten. Im konkreten Fall weist die Hinterlüftung eine Fläche von  $2000 \text{ mm}^2$  auf und muss somit unberücksichtigt bleiben. Die gezeigte Variante (mit WDVS) unterscheidet sich also lediglich durch die Außenhaut und den Wegfall der Lattung in den äußeren Dämmschichten.

Die Isothermen zeigen also auch hier keinen großen Einfluss der Wärmebrücke. Die Oberflächentemperatur ist um ca.  $1,2^\circ\text{C}$  auf  $19,8^\circ\text{C}$  gestiegen und der  $f_{\text{Rsi}}$ -Faktor hat sich von  $0,958 [-]$  auf  $0,994 [-]$  erhöht. Die Unterschiede sind also gering und zeigen, den Wärmefluss betreffend, ein sehr ähnliches Verhalten wie jenes der Standardvariante.

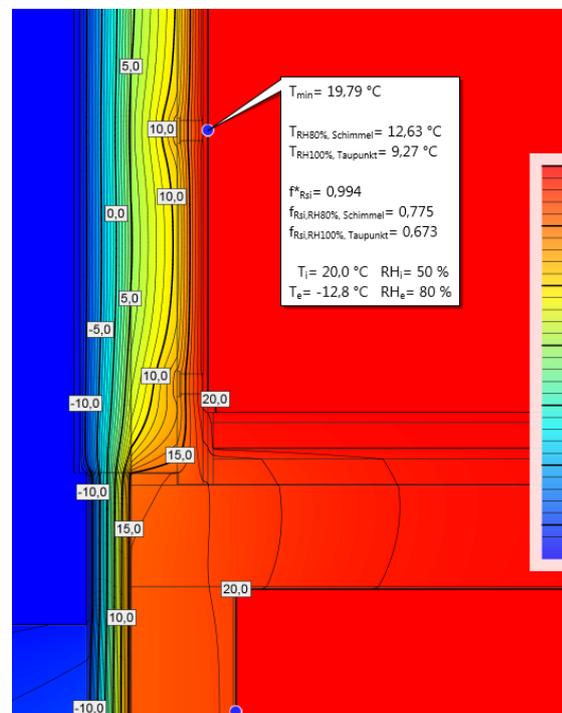


Abbildung 4.25: Temperaturverlauf EG

Auch im Kellergeschoß ist das Temperaturverhalten sehr ähnlich zum Fall der Standardvariante mit Hinterlüftung, weswegen in weiterer Folge nicht mehr näher darauf eingegangen wird. Abbildung 4.26 zeigt den Temperaturverlauf im Kellergeschoß.

Als logische Konsequenz der oben angesprochenen Analogie der beiden „Standardvarianten“, ergeben sich auch ähnliche Wärmestrombilder. Aus diesem Grund werden auch diese im Folgenden nicht weiter beschrieben. Abbildung 4.28 und Abbildung 4.27 zeigen diese Wärmestrombilder, jeweils einmal als Übersicht und einmal im Detail.

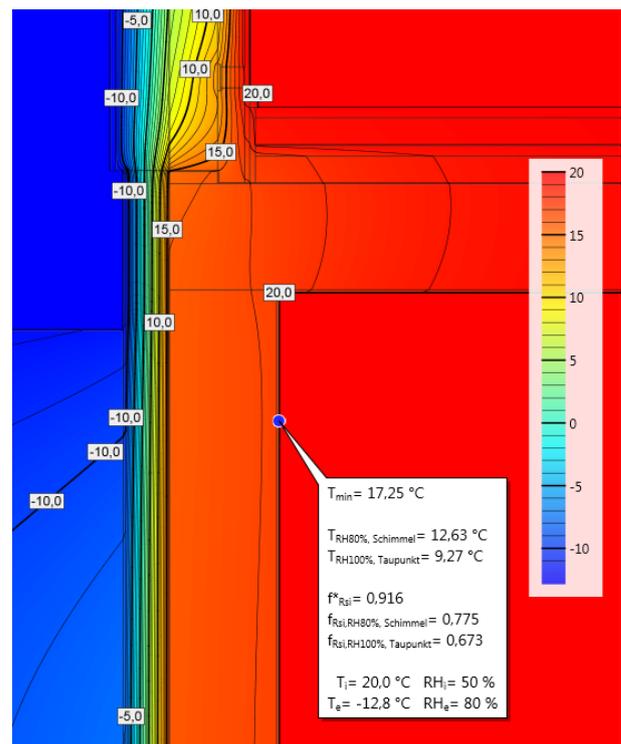


Abbildung 4.26: Temperaturverlauf KG

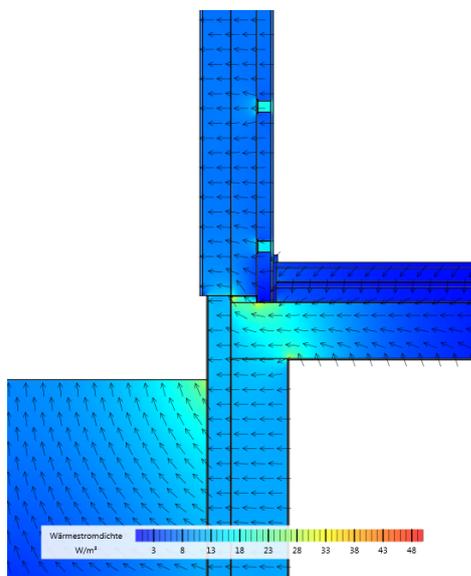


Abbildung 4.28: Wärmestrom [W/m<sup>2</sup>]

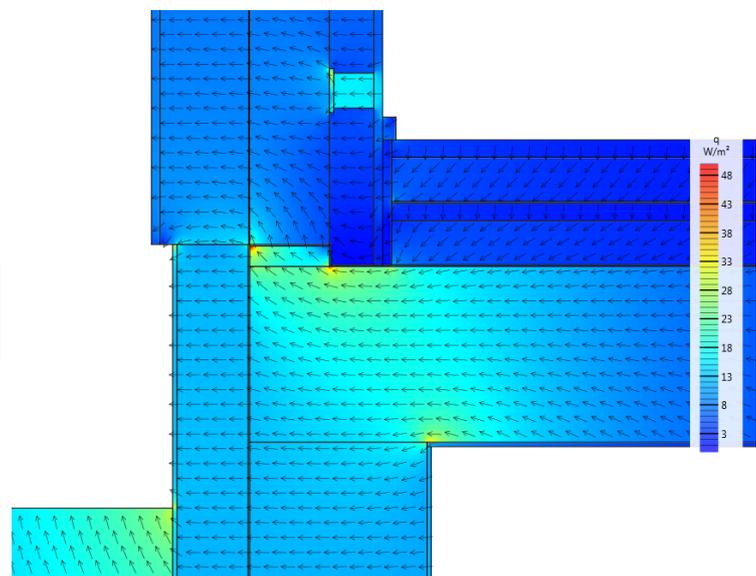


Abbildung 4.27: Wärmestrom [W/m<sup>2</sup>] im Detail

Im Gegensatz zur Standardvariante mit Hinterlüftung zeigt sich, den Feuchtegehalt betreffend, allerdings ein unterschiedliches Bild. Die relative Feuchte an der Innenseite der BSP-Wand ist hier höher. Dies lässt sich durch den höheren Diffusionswiderstand der in der Berechnung berücksichtigten Holzfaserdämmplatten ( $\mu=10$  [-]) erklären. Betrachtet man den SD-Wert des gesamten Wandaufbaues, so ergibt sich eine Differenz von einem Meter. Der Unterschied mag auf den ersten Blick nicht gravierend erscheinen, jedoch bleibt dies nicht ohne Auswirkungen (siehe Abbildung 4.29).

Eine detailliertere Darstellung der relativen Feuchte zeigt Abbildung 4.31 und der dazugehörige Dampfstrom ist in Abbildung 4.30 zu sehen.

Abschließend sei noch erwähnt dass es sich bei den durchgeführten zweidimensionalen Berechnungen nach Glaser um stationäre Betrachtungen handelt. Das bedeutet, dass es nur unter fixen und extremen Randbedingungen (die Außentemperatur beträgt  $-12,8^{\circ}\text{C}$ ) zu solch hoher Feuchtigkeit kommt. Es sollte aber auch nicht unerwähnt bleiben, dass das Verfahren nach Glaser immer auf der sicheren Seite liegt, da das Kapillar- und Sorptionsverhalten von porösen Baustoffen unberücksichtigt bleibt. Auch die im Vergleich ausgeprägte Speicherwirkung von Holz findet in diesen Berechnungen keine Beachtung. Dieser Vereinfachung und der damit verbundenen Unschärfe bei den vorliegenden Simulationen soll aber im Anschluss durch instationäre Simulationen Rechnung getragen werden.

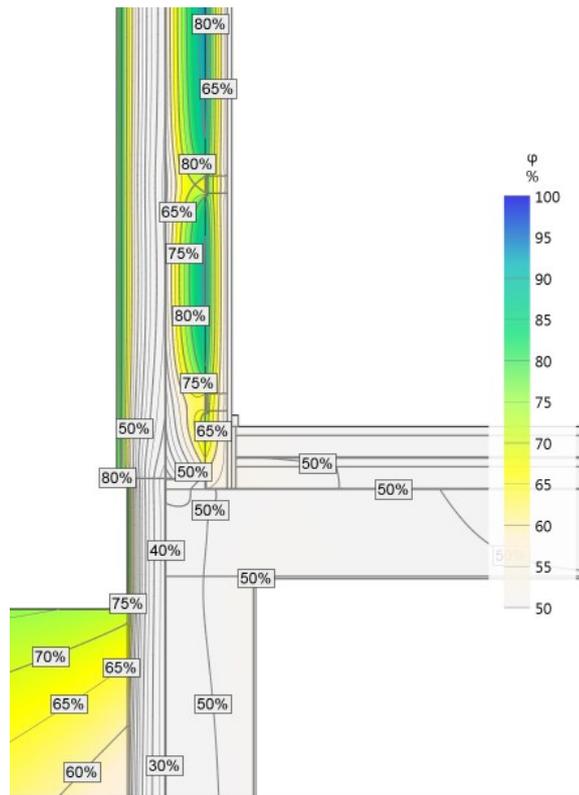


Abbildung 4.29: relative Feuchte  $\phi$  [%]



Abbildung 4.31: relative Feuchte  $\phi$  [%] im Detail

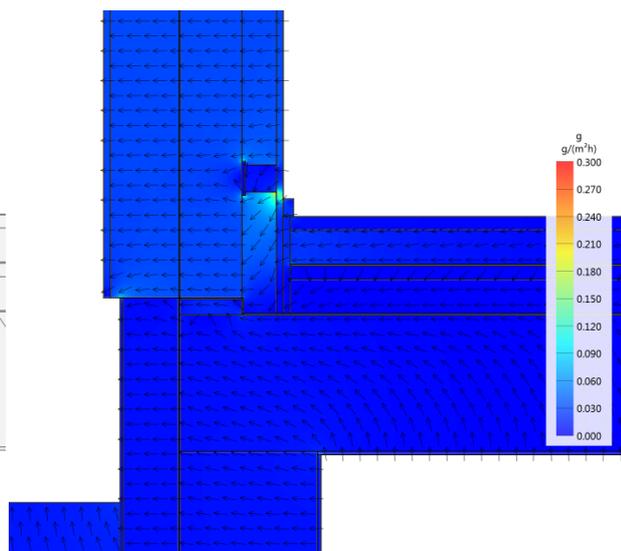


Abbildung 4.30: Dampfstrom

Der  $\Psi$ -Wert mit den bezogenen Außenmaßen von  $A_{AW1} = 112,9 \text{ cm}$  und  $A_{AW2} = 119,1 \text{ cm}$  ergibt sich zu  $\Psi = 0,024 \text{ [W/mK]}$  und liegt damit nur um den Faktor 1,6 unter dem der Standardvariante mit Hinterlüftung. Dieser Umstand findet seine Ursache in den in Kapitel 4-4.1 bereits erwähnten lokalen Wärmebrücken die durch die, in Reihe angeordneten, Polsterhölzer entstehen. Bei Verwendung eines Wärmedämmverbundsystems entfallen diese, wodurch sich der  $\Psi$ -Wert etwas verbessert.

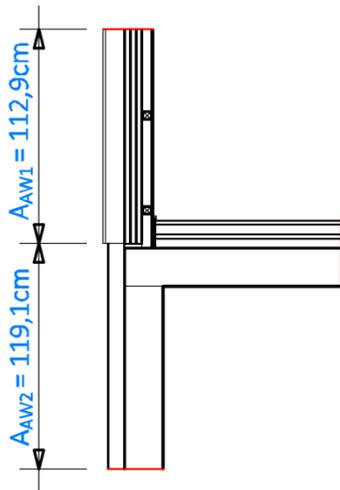


Abbildung 4.32: Außenmaße

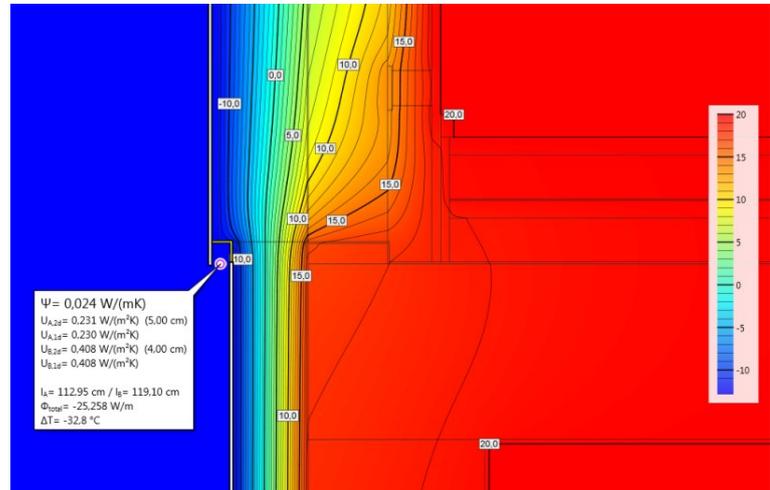


Abbildung 4.33:  $\Psi$ -Wert

## 4-5 INSTATIONÄRE BERECHNUNGEN

### 4-5.1 HYGROTHERMISCHES BERECHNUNGSVERFAHREN (3)

#### Hygrothermisches Berechnungsverfahren mittels WUFI

Um Vorhersagen über die mögliche Bildung von Schimmelpilz treffen zu können, müssen die biologischen Wachstumsvoraussetzungen (Sollwerte) den hygrothermischen Bedingungen gegenübergestellt werden. Dabei werden zur Ermittlung dieser „Ist-Werte“ alle relevanten bauphysikalischen Vorgänge berücksichtigt. Für eine bauphysikalische Betrachtung sind nachstehende Transportmechanismen von Bedeutung:

- Dampfdiffusion
- Oberflächendiffusion
- Lösungsdiffusion
- Kapillarleitung

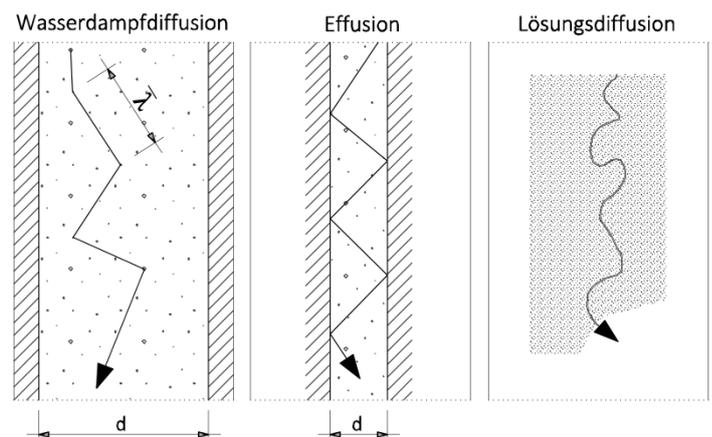


Abbildung 4.34: Dampfdiffusionsarten

## 4-5.2 VORGEHENSWEISE

In diesem Kapitel wird kurz über die grundsätzliche Vorgehensweise und den Aufbau der Daten eingegangen, da alle in der Folge betrachteten Details nach demselben Schema behandelt werden.

Die instationäre Berechnung wurde über einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt wobei für die klimatischen Umgebungsbedingungen der Standort Graz gewählt wurde. Um Aussagen über einen steigenden oder abfallenden Wassergehalt in der Bauteilkonstruktion treffen zu können, ist es wichtig solche Berechnungen über einen möglichst langen Zeitraum zu führen. Hierbei sollte allerdings ein Kompromiss zwischen Berechnungszeitraum und Rechenaufwand geschlossen werden. In den folgenden Abbildungen sind die Monitoring-Positionen der Untersuchten Stellen für jedes Sockeldetail dargestellt. An diesen neun Punkten wurden jeweils die Temperatur, die relative Feuchte und der massenbezogene Wassergehalt bzw. die Holzfeuchte ausgewertet. Ziel dieser Untersuchung war es, den Wasser- und Feuchtegehalt in der Brettspertholzwand zu ermitteln, um so auf die Nutzungs- bzw. Gefährdungsklasse in diesem Bereich schließen zu können. Des Weiteren wurde die Gefahr der Schimmelpilzbildung, mithilfe des in Kapitel 2-2.5.2 erwähnten Vorhersagemodells untersucht.

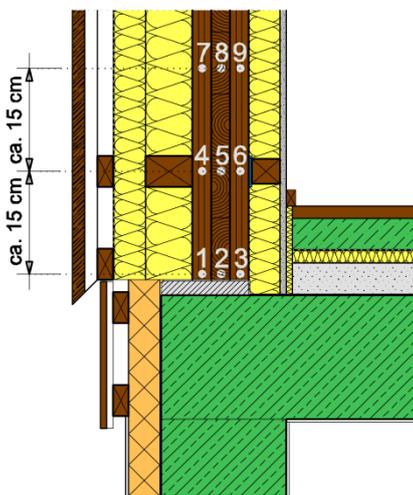


Abbildung 4.35:

Messpositionen (hinterlüftet)

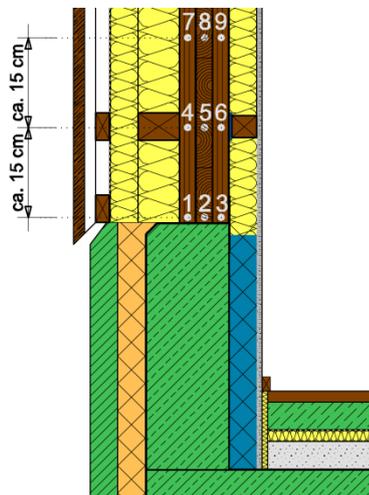


Abbildung 4.37:

Messpositionen (Betonsockel)

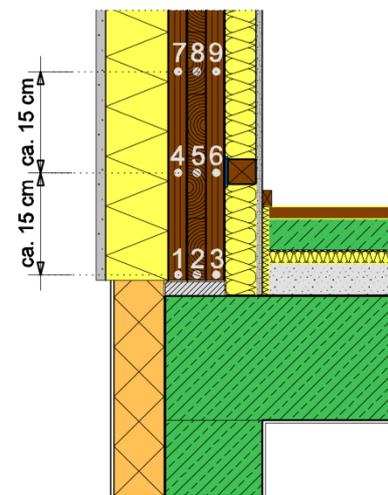


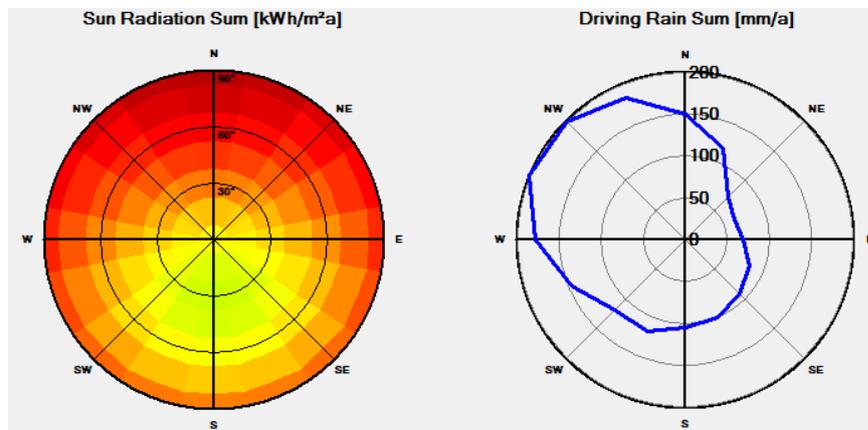
Abbildung 4.36:

Messpositionen (WDVS)

## 4-5.3 RANDBEDINGUNGEN UND EINGABEPARAMETER

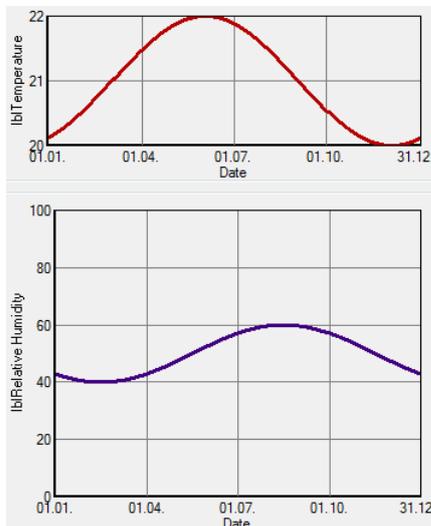
Als Außenklima wurde der, in die Softwareapplikation implementierter, Klimadatenatz für Graz verwendet, welcher die Mittelwerte aus den Jahren 1976 bis 2005 enthält. Um die ungünstigsten Bedingungen zu erzielen, wurde mit Hilfe der Softwareapplikation *WUFI* die sogenannte Wetterseite ermittelt (jene Seite eines Gebäudes mit der geringsten Sonneneinstrahlung und der stärksten Schlagregen- und Windbelastung) und das Sockeldetail dementsprechend ausgerichtet. Wie in Abbildung 4.38 ersichtlich, ergeben sich die schlechtesten Bedingungen im Nord-Westen.

### 4-5.3.1 Klimadaten

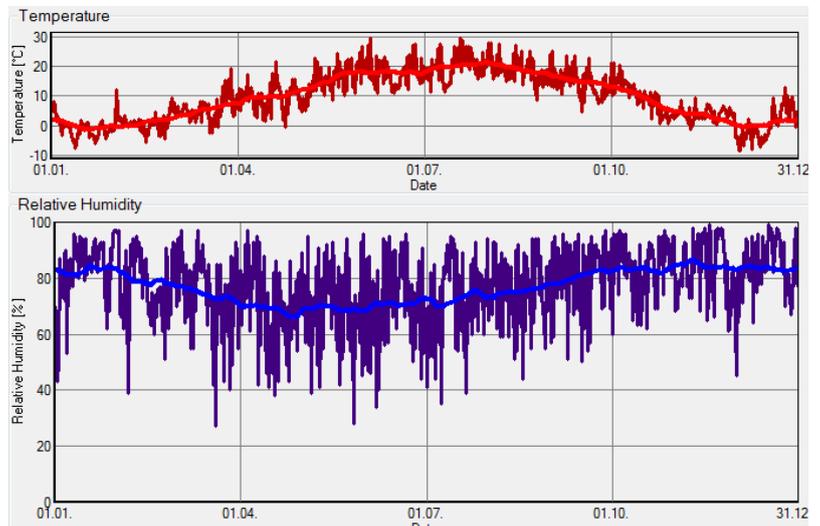


*Abbildung 4.38: Sonneneinstrahlung und Regeneinfall für den Standort Graz*

Alle Sockeldetails wurden für die Simulationen nach Nord-Westen hin ausgerichtet. Die Temperatur des Innen- und Außenklimas folgen einem sinusförmigen Verlauf mit einer Amplitude von 1°C und einem Mittelwert von 21°C (siehe Abbildung 4.40). Auch die relative Luftfeuchte folgt einem sinusförmigen Verlauf, jedoch phasenversetzt zum Temperaturverlauf. Die Amplitude beträgt dabei 10 % bei einem Mittelwert von 50% (siehe Abbildung 4.39).



*Abbildung 4.40: Innenklima*



*Abbildung 4.39: Außenklima*

Die Simulationen beginnen jeweils am 1. Oktober, da die Herbstmonate in vielen Fällen jene Monate sind, in welchen die fertiggestellten Gebäude von den Nutzern bzw. den Bauherrn bezogen werden und somit ein Innenklima durch das Nutzerverhalten entsteht. Außerdem sollte bei kritischer Betrachtung auch dem Umstand, der in kälteren Monaten geringer stattfindenden Austrocknung der Baufeuchte, Rechnung getragen werden.

### 4-5.3.2 Geometrie

Im Allgemeinen ist es unmöglich ein komplettes Gebäude mit einem einzigen geometrischen Modell naturgetreu abzubilden. Um diese Problematik zu umgehen, behilft man sich mit Schnittebenen die es erlauben ein vollständiges Gebäude in einzelne Teilabschnitte zu unterteilen. Dies muss allerdings so erfolgen, dass sämtliche Differenzen in den Berechnungsergebnissen zwischen dem unterteilten Gebäude und dem als Ganzen betrachtetem Gebäude vermieden werden. In den folgenden Abbildungen sind die Schnittebenen für einige Modelle dargestellt (siehe Abbildung 4.43 bis Abbildung 4.42). Der Mindestabstand zur Schnittebene beträgt demnach entweder das 3-fache des flankierenden Bauteiles oder 1 m.

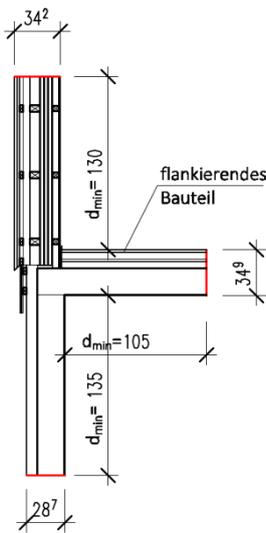


Abbildung 4.43: Standardvariante

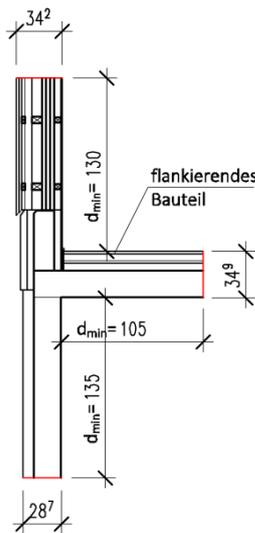


Abbildung 4.41: Betonsockel

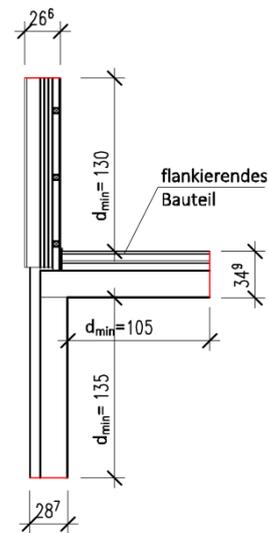


Abbildung 4.42: Standardvar. (WDVS)

### 4-5.3.3 Stoffkennwerte

Die Stoffkennwerte der verwendeten Materialien sind Kapitel 4-1.1 bis 4-3.1 zu entnehmen. Die dazugehörigen thermischen und hygrischen Materialfunktionen können direkt aus der Softwareapplikation WUFI ausgelesen werden. Aufgrund der Fülle an Informationen sind im Folgenden nur die Materialfunktionen für seitenverklebtes Brettsperrholzes angegeben.

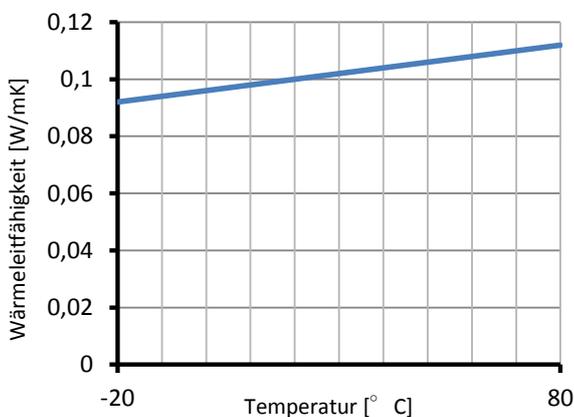


Abbildung 4.45: temperaturabh. Wärmeleitfähigkeit

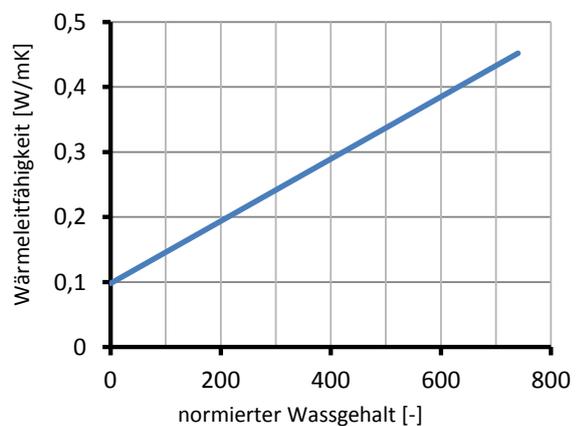


Abbildung 4.44: feuchteabh. Wärmeleitfähigkeit

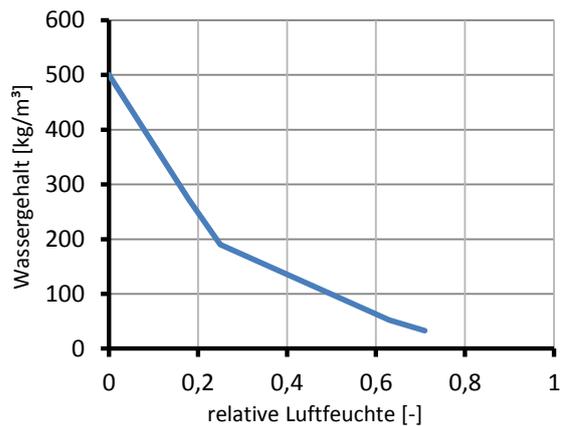


Abbildung 4.46: Wasserdampfdiffusionswiderstand

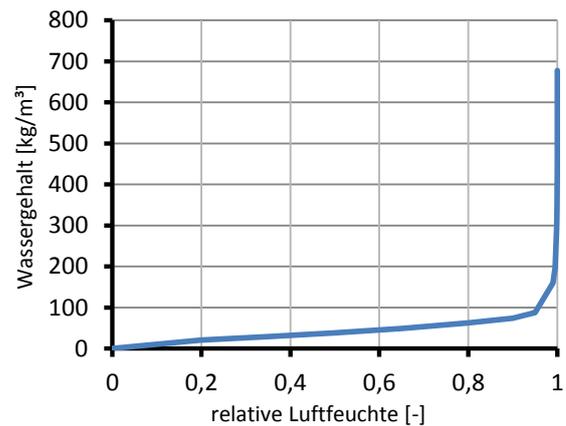


Abbildung 4.47: Feuchtespeicherfunktion

### 4-5.3.4 Anfangsbedingungen

Die Anfangsbedingungen der verwendeten Materialien für den Start der Simulationen wurden wie folgt angenommen:

Temperatur:  $T_{\text{start}} = 20^{\circ}\text{C}$

relative Luftfeuchte:  $RH_{\text{start}} = 80\%$

Um das Austrocknungspotential der untersuchten Leitdetails besser beurteilen zu können, wurde die Baufeuchte über die relative Luftfeuchte der verwendeten Baustoffe mit 80 % angesetzt.

### 4-5.3.5 Zeitschritte

Die Gesamtdauer der Simulationen beträgt 5 (siehe Kapitel 4-5) bzw. 10 Jahre (siehe Kapitel 4-7). Die Auswertung der Berechnung erfolgte stündlich, was zu einer Zeitschrittanzahl von 43800 bzw. 87600 führt.

### 4-5.3.6 Sockelvariante „Standardvariante“ (mit Hinterlüftung)

#### Punkte 1-3

Das folgende Diagramm (siehe Abbildung 4.48) lässt sofort den beinahe identen Temperaturverlauf in den jeweiligen Einzelschichten der Brettsperrholzwand erkennen. Der relativ hohe Wert von  $20^{\circ}\text{C}$  am Beginn der Simulation ist auf die Anfangsbedingung zurückzuführen. Der kleinste Wert liegt bei  $14,4^{\circ}\text{C}$  und der Mittelwert bei  $16,4^{\circ}\text{C}$ . Alle drei Temperaturverläufe nehmen die Form einer Sinuskurve an, die unterhalb der vorgegebenen Extremwerte des Innenklimas schwankt. Anders ausgedrückt reagiert, die BSP-Wand stärker auf das Innenklima als auf die äußeren Einflüsse. Diese Ergebnisse deuten demnach auf eine gute und ausreichende Außendämmung hin. Allerdings ist auch ein leichter Abfall der Temperatur zu beobachten. Diese Tendenz geht, wie später noch gezeigt werden wird, mit einem leicht zunehmenden und gleichzeitig stattfindenden Wassergehalt einher.

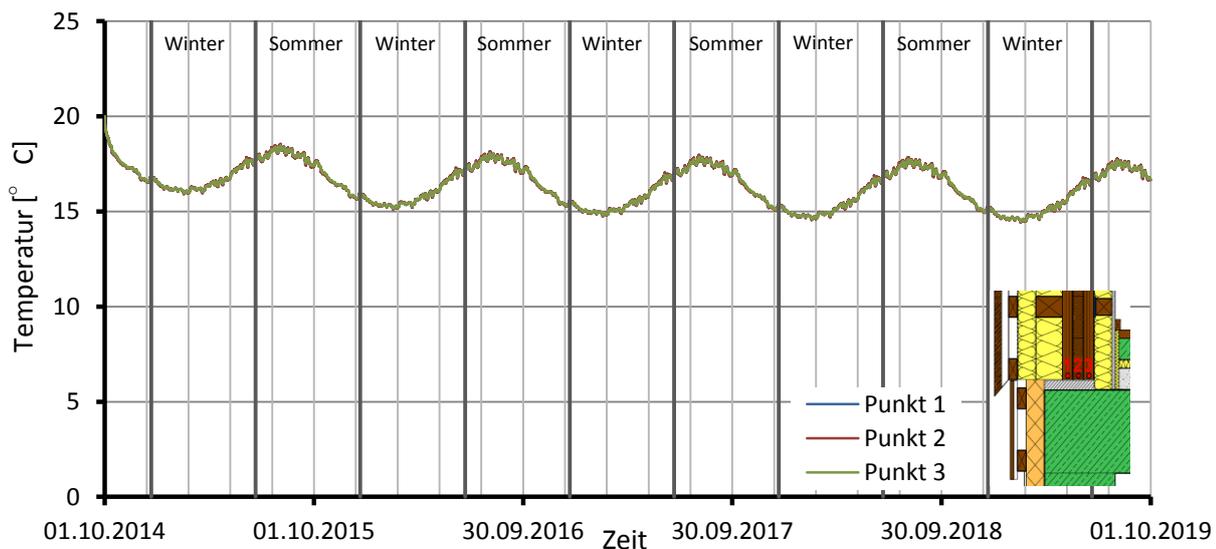


Abbildung 4.48: Temperaturverlauf in den Punkten 1-3

Vergleicht man nun den Temperaturverlauf der instationären Berechnung mit den errechneten Werten der stationären Ergebnisse, fallen sogleich die durchwegs höheren Werte der instationären Berechnung auf. Während die ein- und zweidimensionale Berechnung nach Glaser Werte zwischen  $6^{\circ}\text{C}$  und  $11^{\circ}\text{C}$  lieferte, liegt die mittlere Temperatur der instationären Berechnung in den Wintermonaten in allen drei Schichten zwischen rund  $15^{\circ}\text{C}$  und  $17^{\circ}\text{C}$ . Dieser Umstand beruht auf der Tatsache, dass Brettspertholz zwar im Vergleich zu mineralischen Baustoffen wie beispielsweise etwa Ziegel ( $\lambda = 0,5 \text{ [W/mK]}$ ) eine um etwa vier Mal geringere Wärmeleitfähigkeit verfügt, allerdings im Gegensatz zu mineralischen Wärmedämmungen wie Mineralwolle ( $\lambda = 0,04 \text{ [W/mK]}$ ) einen um den Faktor 3 höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist. Das bedeutet, dass über den gesamten Brettspertholzquerschnitt im Verhältnis zur Dämmung nur wenig Wärme abgebaut wird, was einen konstanten Temperaturverlauf am Querschnitt bei konstant gehaltener Temperatur zur Folge hat (siehe Kapitel 4-4.3.1 und Kapitel 4-4.3.3). Dieses Verhalten kann auch an den folgenden Simulationen in Kapitel 4-5.3.7 und Kapitel 4-5.3.8 beobachtet werden.

Abbildung 4.49 zeigt das Diagramm der relativen Feuchte in den Punkten 1-3. Hier kennzeichnet sich ein deutlicher Einfluss des Außenklimas ab: Die Maxima und Minima betragen in Punkt 1  $83,4\%$  bzw.  $32,8\%$ , der Mittelwert liegt bei  $55,4\%$ . Der Verlauf in Punkt 3 weist wieder einen typischen Sinusverlauf auf. Jedoch folgt dieser nicht, wie es bei dem Temperaturverlauf der Fall war, dem Bereich des vorgegebenen Innenklimas, sondern ist um etwa  $15\%$  erhöht. Auffällig ist auch der Verlauf der mittleren Einzelschicht in Punkt 2. Jener folgt analog dem Verlauf in Punkt 3, allerdings zeitlich etwas versetzt. Dieser Phasenversatz lässt sich durch den Diffusionswiderstand erklären, welcher bei Brettspertholz relativ hoch liegt. Je höher der Wasserdampfdiffusionswiderstand ist, umso mehr Zeit benötigt der Wasserdampf um durch den betreffenden Baustoff durch zu diffundieren. Die anfänglich hohen Werte in den Punkten 2 und 3 sind ebenfalls durch die Anfangsbedingungen bzw. die angesetzte Baufeuchte zu begründen und pendeln sich nach rund 2 bis 3 Monaten wieder ein.

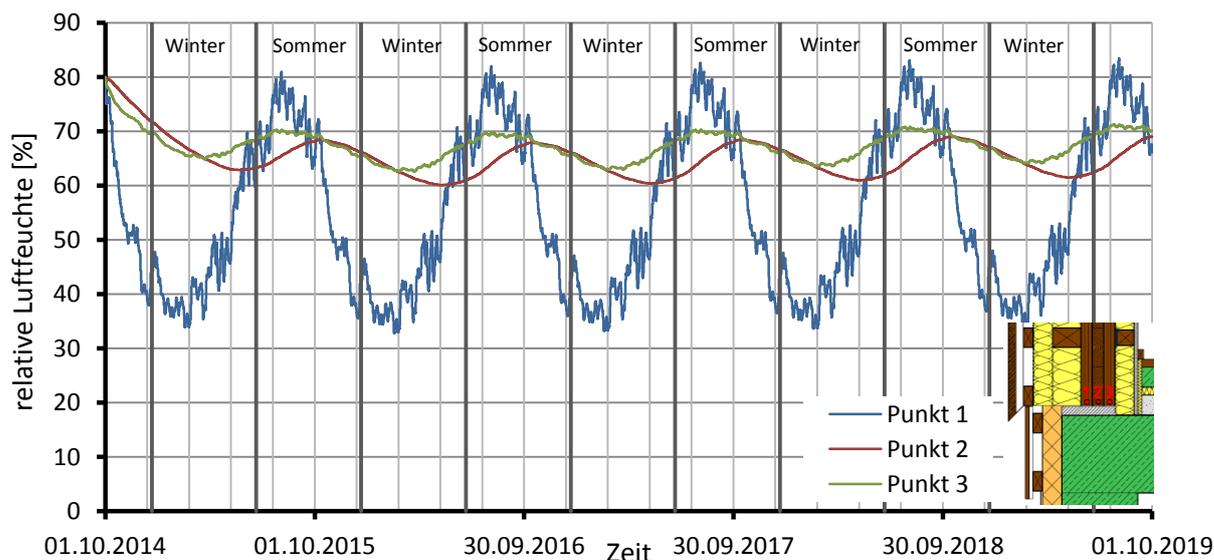


Abbildung 4.49: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 1-3

Eher untypisch sieht der Verlauf der relativen Feuchte in Punkt 1 aus. Denn sieht man sich den Jahresverlauf des Außenklimas an, fallen die Monate mit den höchsten Werten auf die Wintermonate zwischen Oktober und November (siehe Abbildung 2.33). In Abbildung 4.49 zeigt sich ein umgekehrter Verlauf; hier werden die Höchstwerte der relativen Luftfeuchte in den Frühlings- bzw. Sommermonaten erreicht. Ein Vorgang der zunächst paradox erscheinen mag aber anhand des Wasserdampftransportes erklärt werden kann. Dieser folgt stets dem Partialdruckgefälle des Wasserdampfes, welches wiederum, in den meisten Fällen, dem Temperaturgefälle folgt. Aufgrund der niedrigen Außentemperaturen im Winter kommt es also zu einem höheren Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenklima. Mit der Temperaturdifferenz steigt nun auch der Wasserdampftransport innerhalb des Bauteiles. Das erklärt einerseits das Zusammenrücken der Ganglinien der inneren Schichten (Punkte 2 und 3) innerhalb der Monate zwischen Anfang September und Anfang März und andererseits die starken Schwankungen in der äußersten Schicht (Punkt 1). Denn hat der Wasserdampf die äußerste Schicht des Brettspertholzes erreicht, steigt die Wasserdampfdiffusion wegen des geringeren Widerstandes der Mineralwolle rasch an, was wiederum ein größeres Austrocknungspotential der äußeren Schicht zur Folge hat

Die Ganglinien der Holzfeuchte sind in Abbildung 4.51 dargestellt und folgen qualitativ den Verläufen der relativen Luftfeuchte. Die maximalen Werte ergeben sich in Punkt 1 zu 16,3% und die minimalen zu 6,8%. In den Punkten 2 und 3 schwanken die Werte zwischen 11,1% und 12,5%. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich das Verhalten von relativer Feuchte und Holzfeuchte sehr schnell mit zunehmender Tiefe beruhigt. Mit „beruhigen“ ist eine „Glättung“ der Ganglinie gemeint, also ein geringeres Schwanken der Extremwerte und auch keine starken Sprünge im Verlauf.

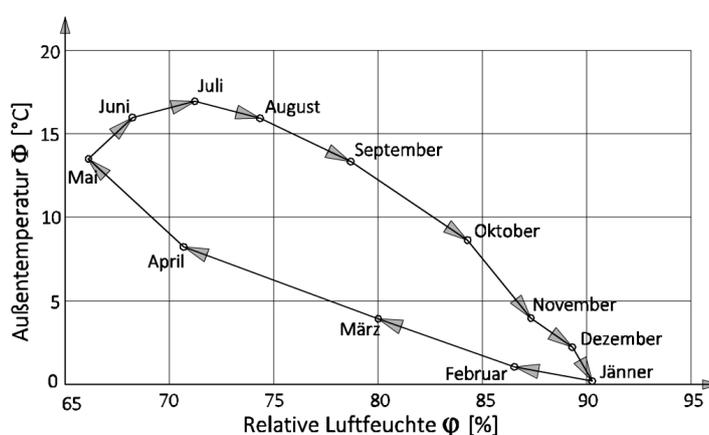


Abbildung 4.50: Jahresverlauf: relative Luftfeuchte (Hannover) (5)

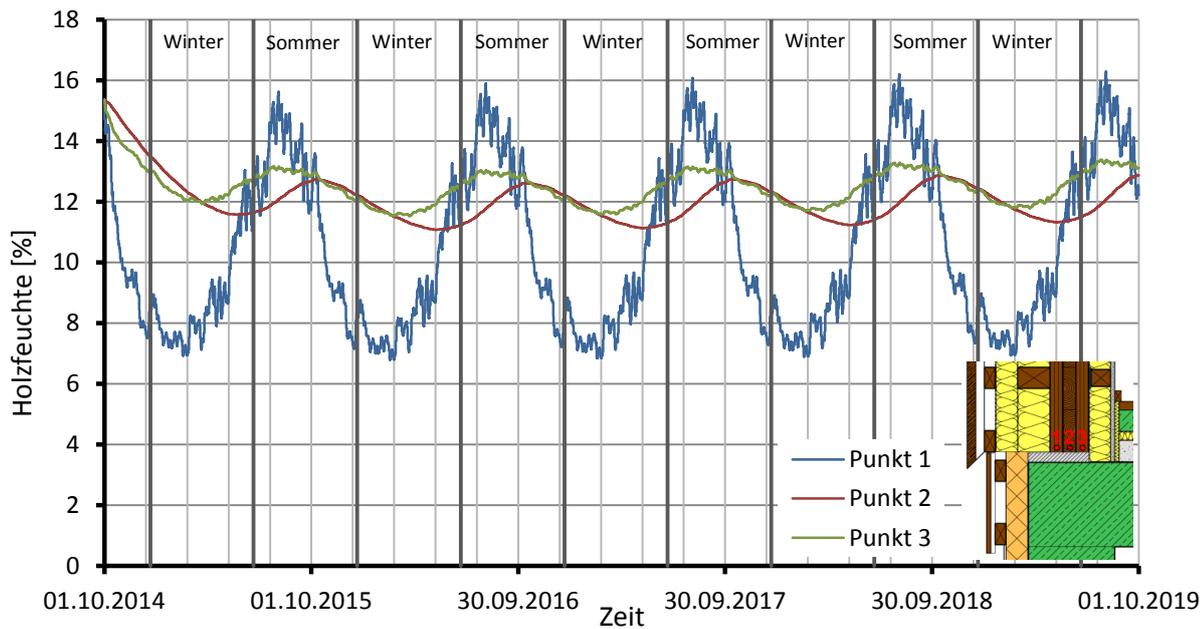


Abbildung 4.51: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3

Um die Ergebnisse der Holzfeuchte übersichtlich darzustellen, bietet sich die in Abbildung 4.52 dargestellte Form einer Umhüllenden an. Hier werden die Maxima, Minima und Mittelwerte am Querschnitt aufgetragen und bilden somit, ähnlich einer Schleppkurve, alle möglichen Feuchtebereiche ab. Naturgemäß kann man auch hier leicht den Einfluss des Außenklimas auf die äußere Einzelschicht erkennen, da hier die Extremwerte weit auseinander liegen (Faktor 2,4). Wie bereits erwähnt, kommt es mit zunehmender Wandtiefe zu einer Dämpfung der Schwankungen. Dies ist dadurch zu erkennen, dass die Extremwerte immer näher zusammen rücken. Wie im Folgenden noch gezeigt werden wird, ändert sich dieses Verhalten mit zunehmender Höhe der Monitoring-Position bzw. zunehmenden Abstand von der Einflusszone des Sockelanschlusses.

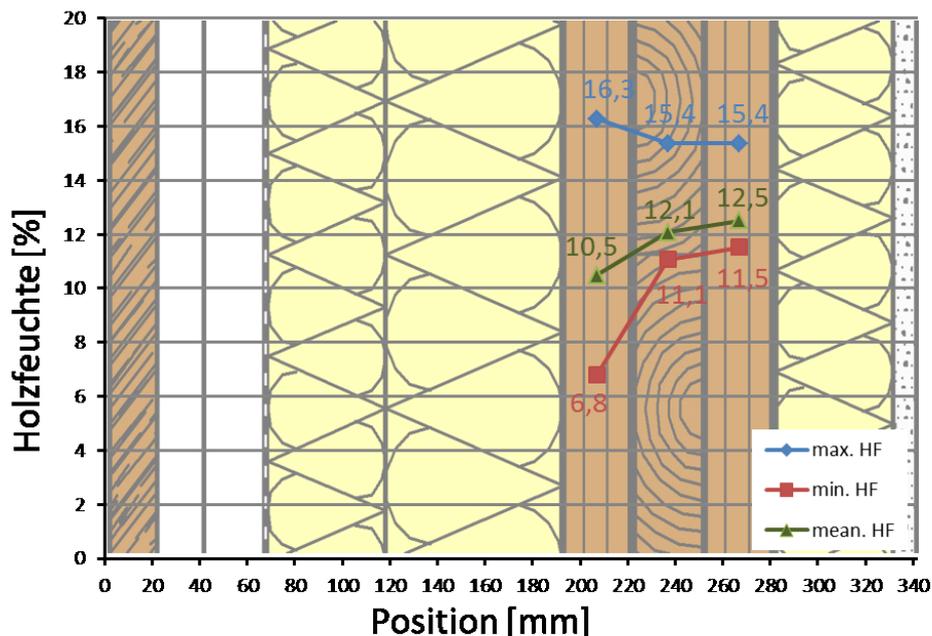


Abbildung 4.52: Umhüllende der Punkte 1-3

### Punkte 4-6

Im Vergleich zu den Ganglinien in den Punkten 1-3 schwanken die Ganglinien in den Punkten 4-6, also 15 cm darüber, deutlich geringer. Auch die maximalen und minimalen Werte steigen höher bzw. sinken tiefer. Sieht man sich die Lage der Monitoring-Positionen an, erkennt man, dass diese genau zwischen der Lattung und den innenliegenden Polsterhölzern angeordnet sind. Wie schon in Kapitel 4-4.4.1 beschrieben, liegt die Ursache für diese Unterschiede in den lokalen Wärmebrücken. Da diese aber nur punktuell und in definierten Abständen vorkommen, können diese lokalen Wärmebrücken aus wärmeschutztechnischer Sicht vernachlässigt werden.

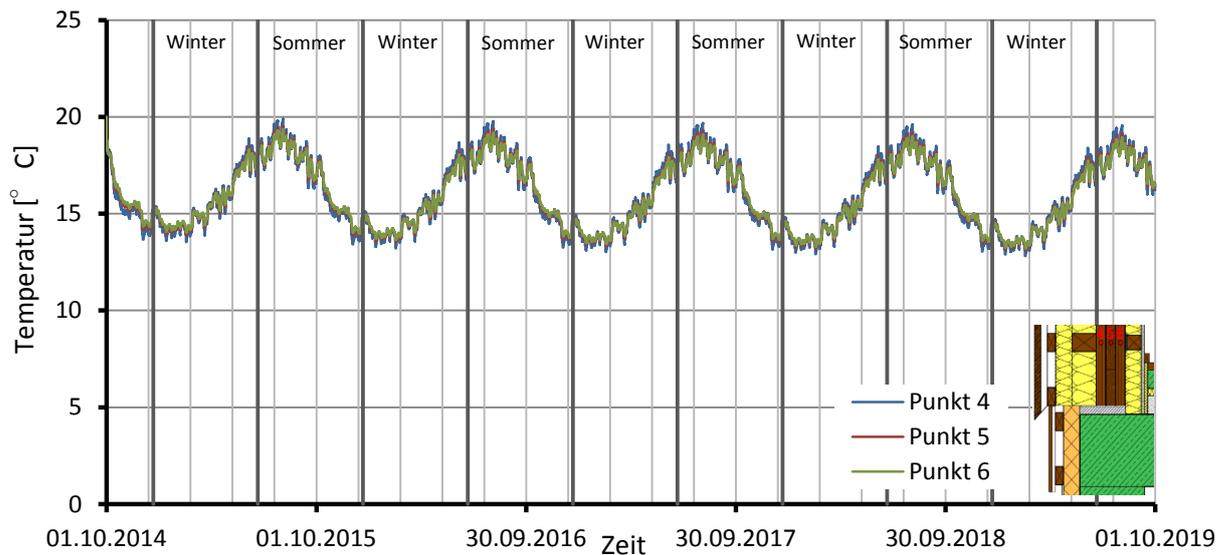


Abbildung 4.53: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6

Vergleicht man nun wieder die Verläufe der relativen Luftfeuchte, so fällt sofort die sehr glatte Ganglinie des Punktes 4 auf. Punkt 1 (siehe Abbildung 4.49) weist im Vergleich dazu größere Sprünge und auch um 10% höhere Maximalwerte auf. In beiden Fällen sind jedoch die höchsten und tiefsten Werte in den Außenschichten (Punkt 1 u. 4) zu finden. In den Ganglinien der Punkte 5 und 6 ist wieder der typische Phasenversatz aufgrund der zeitabhängigen Diffusion zu sehen. Die Werte bewegen sich aber annähernd im selben Bereich zwischen 60% und 70%.

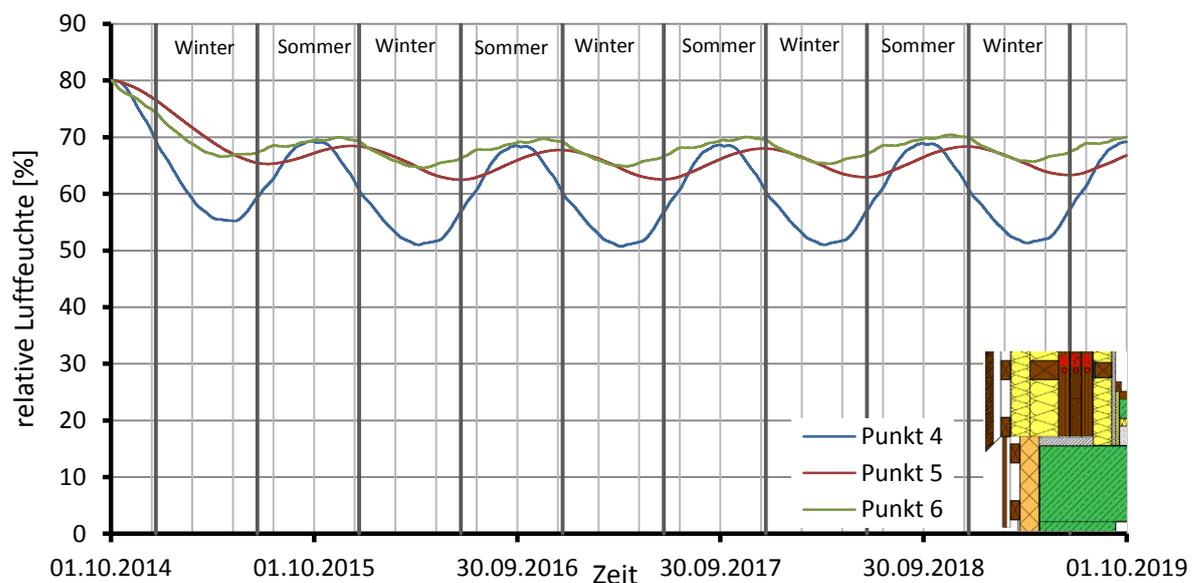


Abbildung 4.54: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6

Wie in Abbildung 4.55 dargestellt, rücken die Werte der Holzfeuchte, vor allem in der äußeren Schicht, im Vergleich zu den auflagernahen Messpunkten näher zusammen. Die Maximalwerte sind sogar für alle drei Schichten annähernd gleich hoch. Dieses Verhalten ist der zunehmenden Höhe der Monitoring-Positionen geschuldet, die dadurch immer weiter in den ungestörten Bereich wandern. Der Einfluss des Anschlussbereiches nimmt dementsprechend ab. Allerdings kann der Bereich der Punkte 4-6 noch immer nicht als ungestört bezeichnet werden, da hier auch ein Einfluss der lokalen Wärmebrücken gegeben ist.

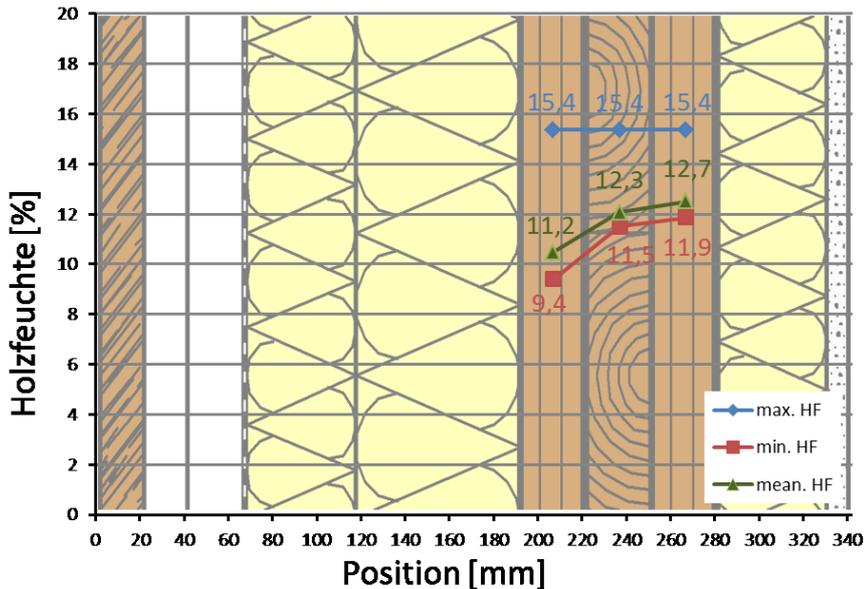


Abbildung 4.55: Umhüllende der Punkte 4-6

### Punkte 7-9

In den obersten Messpositionen (siehe Abbildung 4.56) liegen die niedrigsten Temperaturen bei etwa 12,5°C, die höchsten bei 20°C und im Mittel bei 15,8°C. Im Vergleich zur untersten Messreihe liegen die tiefsten Werte damit 2,5°C unter jenen der Punkte 1-3.

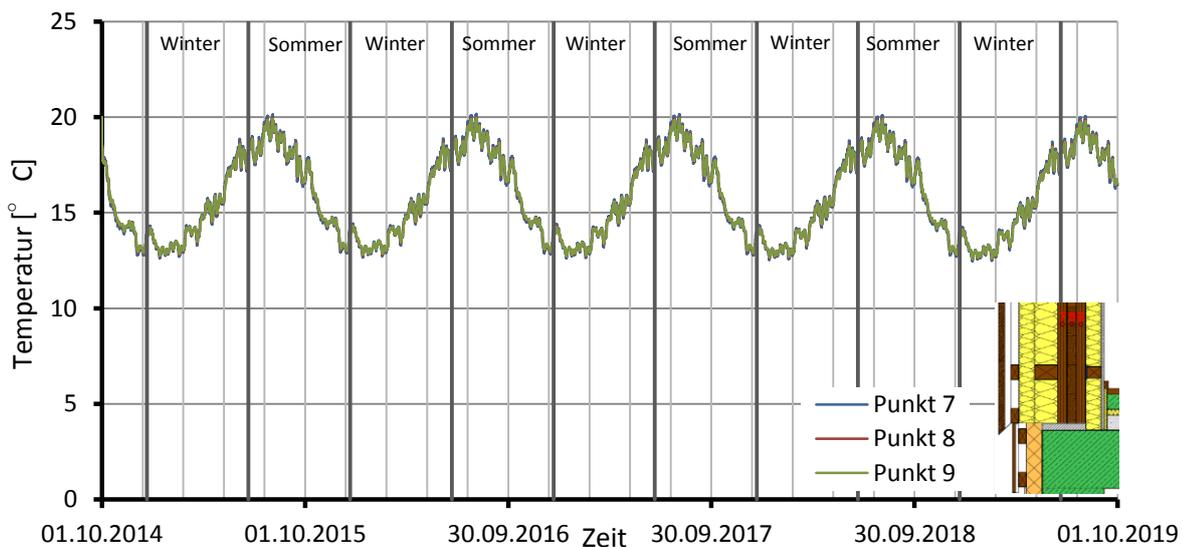


Abbildung 4.56: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9

Da der Keller als konditionierter Raum angenommen wurde ( $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 50\%$ ), kommt es aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Betons zu einem Wärmeeintrag vom Keller ins Erdgeschoß (siehe Abbildung 4.10). Dieser Effekt kommt allerdings in der Höhe der Punkte 7-9 nicht mehr zum Tragen und erklärt die tendenziell niedrigeren Temperaturen der minimalen Werte. Andererseits steigen gleichzeitig die maximalen Werte aufgrund des geringeren Holzfeuchtgehaltes und der daraus resultierenden schlechteren Wärmeleitfähigkeit.

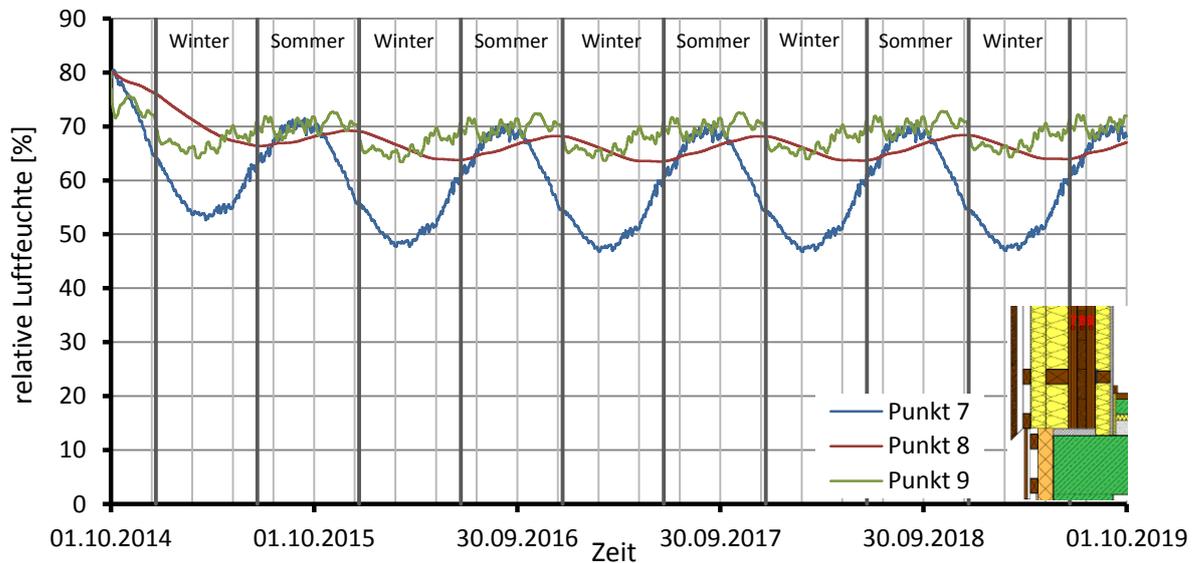


Abbildung 4.57: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 7-9

Bemerkenswert an Abbildung 4.57 ist die Ganglinie des Punktes 9, diese weist zwar Sprünge auf, schwankt aber im Mittel ähnlich wie der Verlauf in Punkt 8 nur in einem sehr geringen Bereich zwischen 63% und 68% (Punkt 9) bzw. 63% und 66% (Punkt 8). In Abbildung 4.58 ist wieder die Analogie zwischen relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte zu erkennen. Während die Holzfeuchte der innenliegenden Punkte 8 und 9 weniger stark schwankt, bewegt sich die Holzfeuchte in Punkt 7 in einem größeren Bereich zwischen 8% und 13%.

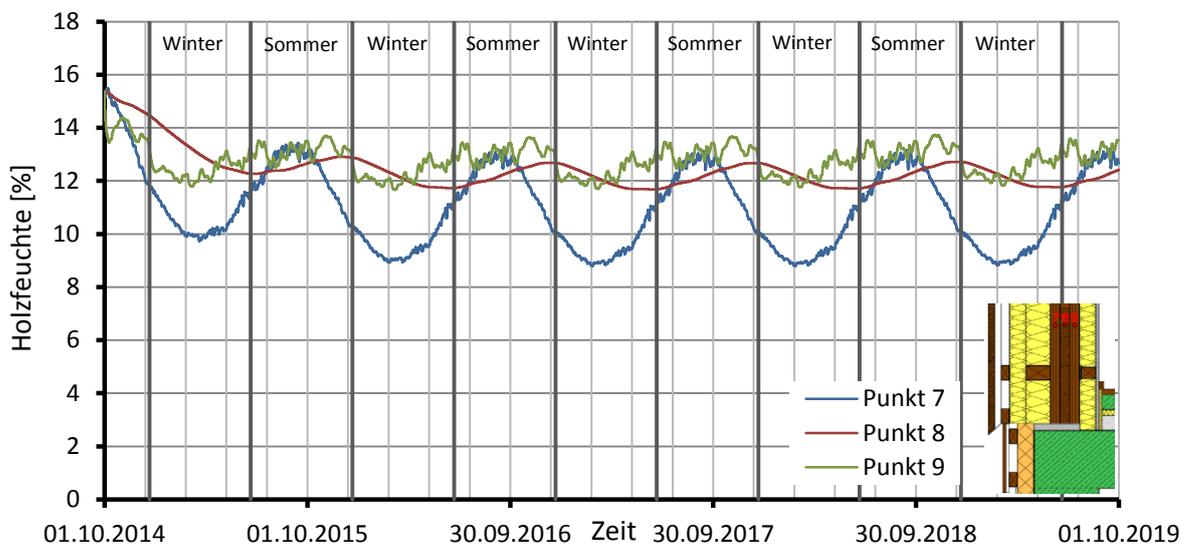


Abbildung 4.58: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9

Die Umhüllende in Abbildung 4.59 zeigt ein sehr ähnliches Bild wie jenes der Monitoring-Positionen 4-6. Obwohl sich also die Ganglinien in ihren Verläufen unterscheiden, bewegen sie sich in einem annähernd gleichen Wertebereich.

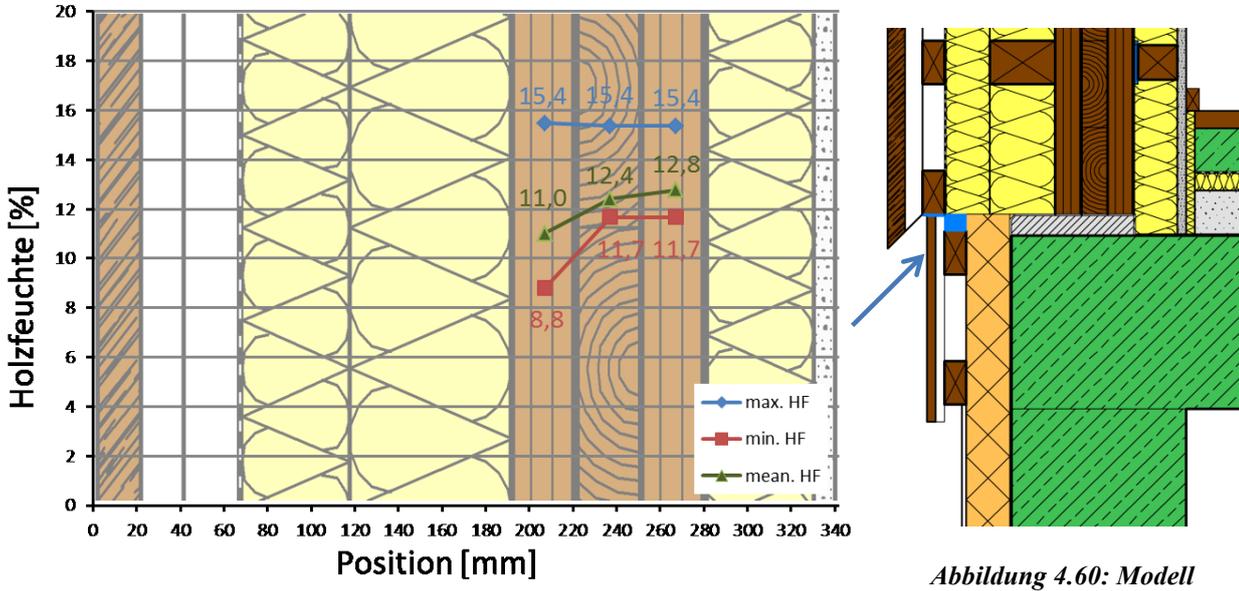


Abbildung 4.59: Umhüllende der Punkte 7-9

#### 4-5.3.7 Sockelvariante „Betonsockel“

##### Punkte 1-3

Auch wie bei der vorangegangenen Standardvariante sind die Verläufe der einzelnen Ganglinien beinahe ident, allerdings erreichen diese nicht ganz so geringe Werte. Der Schwankungsbereich liegt in etwa zwischen 15% und 17,5%, der Mittelwert bei rund 16,3%. Dies kann durch den zusätzlich bewitterten Anteil im Bereich Sockelschalung begründet werden (siehe Abbildung 4.60). Außerdem ist auch hier wieder ein leichter Abfall der Temperatur zu erkennen, der durch die Zunahme der Holzfeuchte und der damit verbundenen, erhöhten Wärmeleitfähigkeit zusammenhängt.

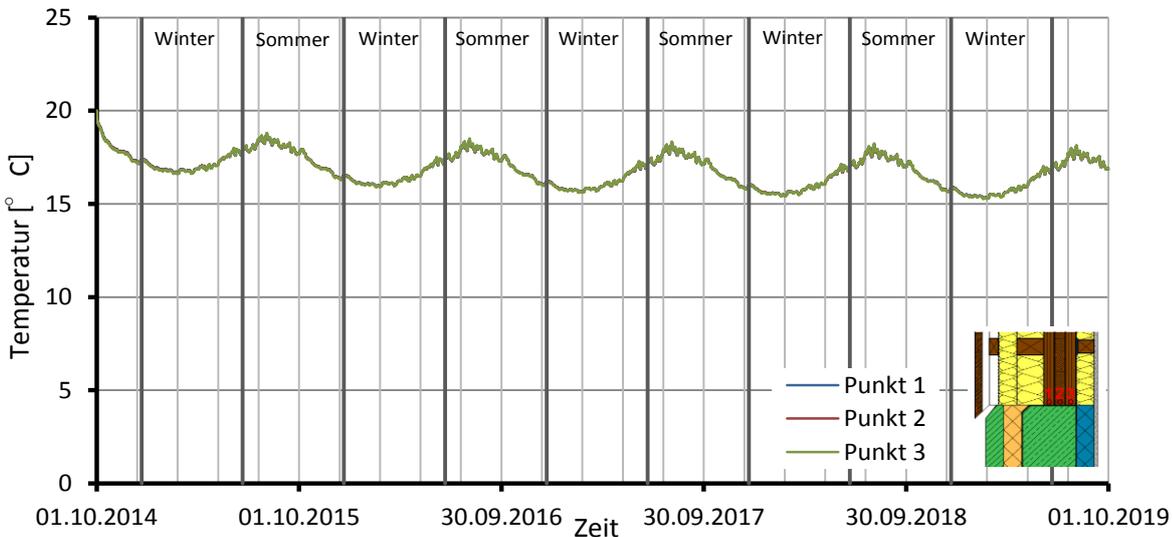
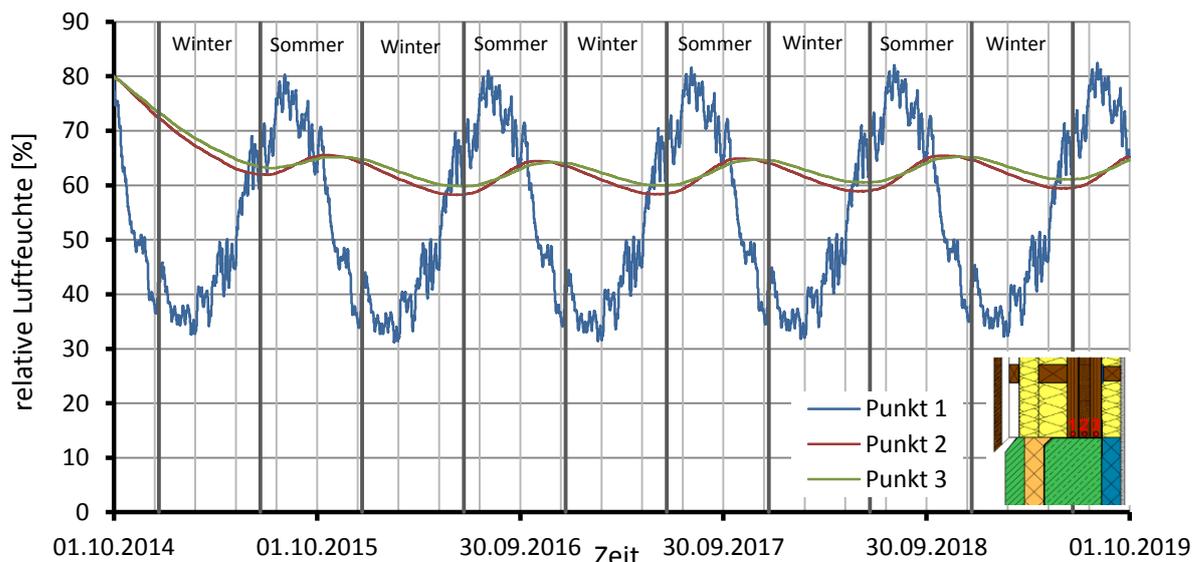


Abbildung 4.61: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3

Abbildung 4.62 zeigt die Verläufe der relativen Feuchte in den Punkten 1-3. Wie schon in Abbildung 4.49 zu sehen war, ist die äußerste Schicht den extremsten Bedingungen in Bezug auf die Feuchtigkeitsbelastung ausgesetzt. Zwischen den Ganglinien der Standardvariante und des Betonssockels besteht in der äußeren Schicht eine starke Ähnlichkeit. Dies kann auf dieselbe Sockelhöhe von 30 cm zurückgeführt werden, da die Spritzwasserbelastung für beide Varianten dieselbe ist. Auch die Ganglinien der inneren Schichten in den Punkten 2 und 3 verhalten sich ähnlich wie die der Standardvariante, allerdings ist die zeitliche Phasenverschiebung kleiner, wodurch die Verläufe enger beieinander liegen. Ein weiterer Unterschied liegt im Versatz der Ganglinien. Während bei der Standardvariante (siehe Abbildung 4.49) der Verlauf in Punkt 2 in den Monaten von März bis Oktober verzögert reagiert und in den darauf folgenden Monaten sich an den Verlauf von Punkt 3 anschmiegt, ist es der Variante „Betonsockel“ genau umgekehrt. Hier reagiert der Verlauf in Punkt 3 verzögert. Dieser Effekt wird durch die konvektionsdichte Fugenverklebung im Bereich des Punktes 3 begründet, da die Feuchtigkeit, wie in Kapitel 4-5.3.6 festgestellt wurde, der inneren Einzelschichten der BSP-Wand stark vom Innenklima beeinflusst werden. Schlussfolgernd kommt es also zu einer Verschiebung des Einflusses von Innen nach außen, da der Diffusionsstrom in diesem Bereich blockiert wird. Dies lässt sich auch in Abbildung 4.12 und Abbildung 4.20 erkennen. Der Dampfstrom ist mit  $m_{ab} = 0,03 \text{ [g/m}^2\text{h]}$  um die Hälfte kleiner als jener der Standardvariante. Die Maximalwerte der relativen Feuchte in der äußersten Schicht betragen rund 82% und die minimalen in etwa 31%, der Mittelwert liegt bei 54%. Die Verläufe der Punkte 2 und 3 schwanken im Bereich von rund 58% und 64%.



**Abbildung 4.62: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 1-3**

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Verläufe der Holzfeuchte. Die Ganglinien zeigen, wie auch schon im vorangegangenen Kapitel 4-5.3.6 erwähnt, eine Affinität zu jenen der relativen Feuchte. In Punkt 1 erreichen die Extremwerte dabei kurzfristig 7% bzw. 16%. In den Schichten 2 und 3 liegt die Holzfeuchte im Mittel bei rund 12%. Einen Überblick über die Feuchtigkeitsverteilung am Querschnitt ist in Abbildung 4.63 dargestellt.

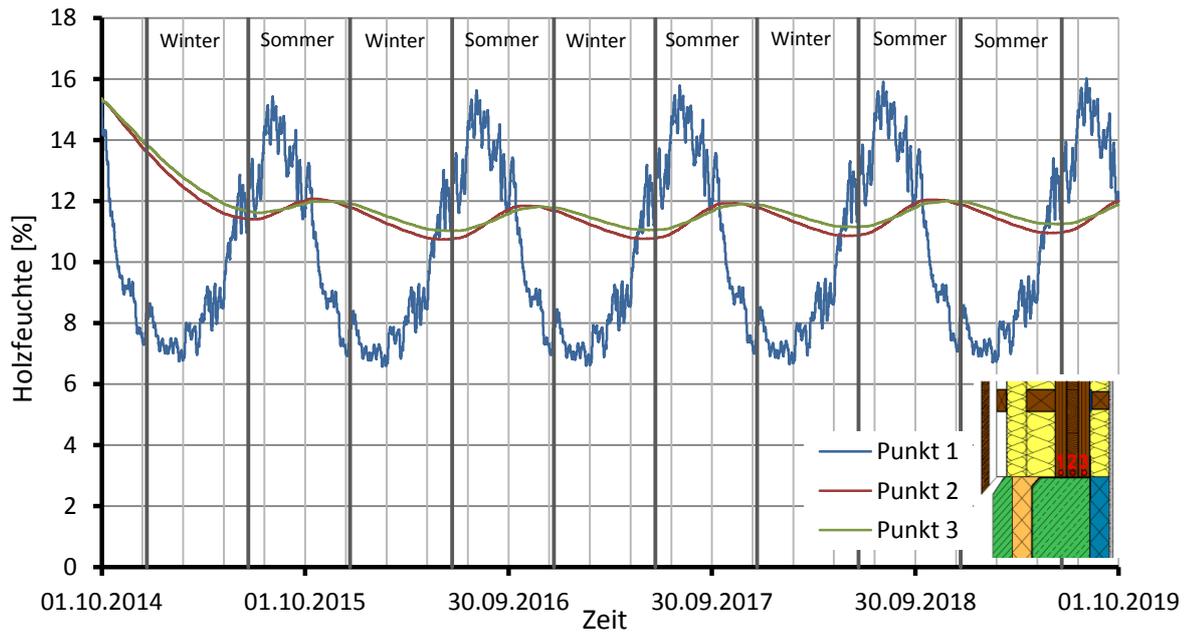


Abbildung 4.63: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3

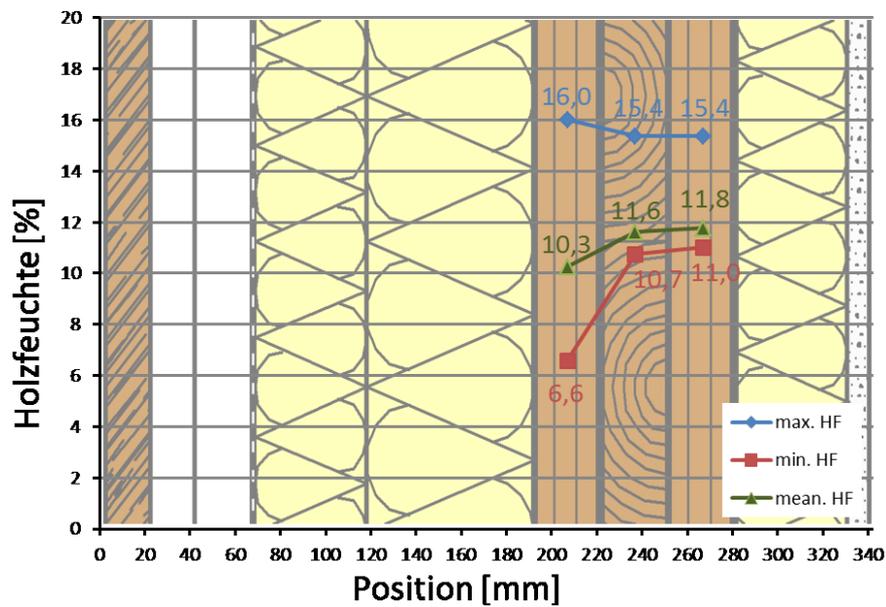


Abbildung 4.64: Umhülle der Punkte 1-3

### Punkte 4-6

Da die Temperaturverläufe in Abbildung 4.65 sehr ähnlich verlaufen wie jene in Abbildung 4.53, werden diese in weiterer Folge nicht näher interpretiert. Die Maxima und Minima liegen in dem äußeren Punkt 4 bei 20,4°C bzw. 13,8°C und jene der Punkte 5 und 6 bei 20,0°C bzw. 14,1°C. Die Mittelwerte betragen für alle Monitoring-Positionen 16,6°C. Es zeigt sich, dass die Temperaturen im Vergleich zur Standardvariante in allen Punkten um bis zu einem Grad Celsius höher sind als bei der Variante „Betonsockel“. Dies kann auf die höhere Außenoberfläche im oberen Bereich der Fassadenschalung zurückgeführt werden und ist daher ein „simulationstechnischer“ Effekt. Aufgrund des Wärmebrückeneinflusses schwanken die Ganglinien allerdings viel stärker und auch in weiteren Bereichen.

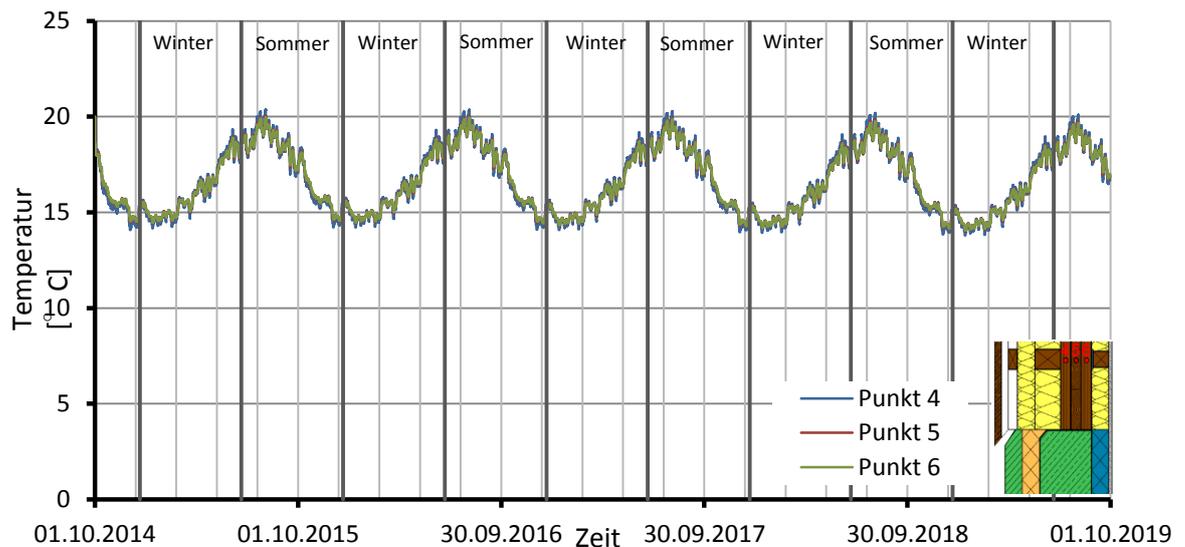


Abbildung 4.65: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6

Im Vergleich zur „Standardvariante“ zeigen die in Abbildung 4.66 dargestellten Ganglinien eine geringere relative Luftfeuchte in der äußeren Einzelschicht (Punkt 4). Die maximalen und minimalen Werte ergeben dabei 49% bzw. 80%. In den beiden anderen Einzelschichten liegen die Werte zwischen 60% und 80%.

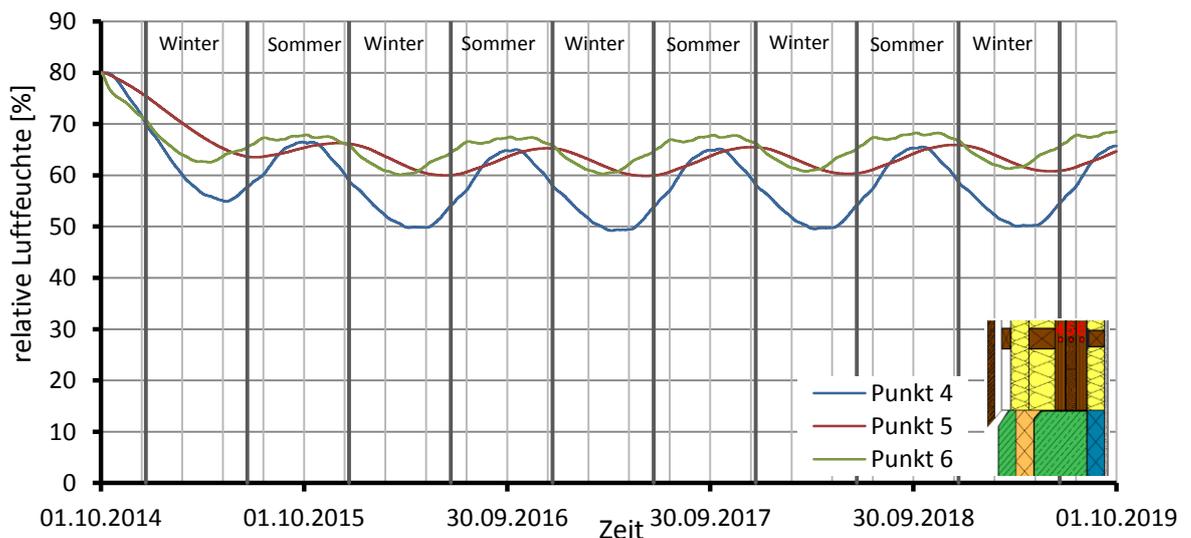


Abbildung 4.66: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6

Durch die geringeren Werte der relativen Luftfeuchte, fallen verständlicherweise auch die Werte der Holzfeuchte etwas geringer aus. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Ganglinien der Standardvariante in weiten Bereichen näher beieinander liegen als jene des Betonssockels, was auf einen durch den Anschluss entstehenden Einfluss hindeutet.

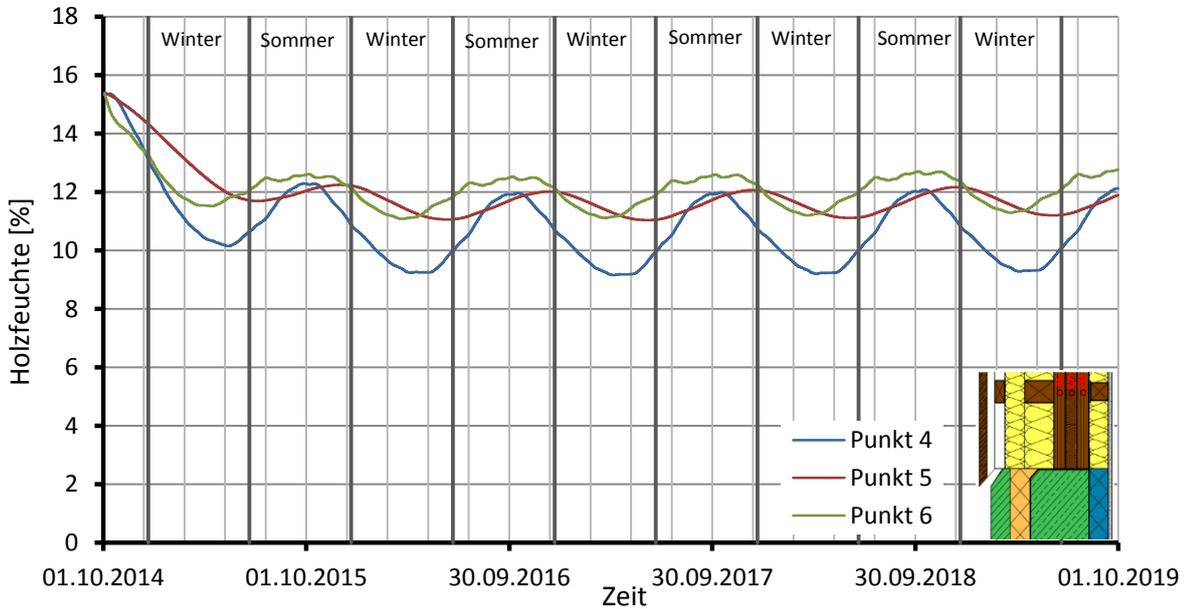


Abbildung 4.67: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6

Die Umhüllende ist in Abbildung 4.68 dargestellt. Die maximalen Werte sind im Zusammenhang mit den Anfangsbedingungen und der dabei gewählten Baufeuchte von einer relativen Luftfeuchte von 80% zu sehen. Zur Beurteilung des Feuchtegehaltes sind daher die Mittelwerte repräsentativer. Man erkennt jedoch, dass sich die Holzfeuchte relativ schnell einpendelt und sich somit die Ausgleichsfeuchte einstellt. Die Anfangsfeuchte der Bauphase kann schon im ersten Jahr austrocknen.

### Punkte 7-9

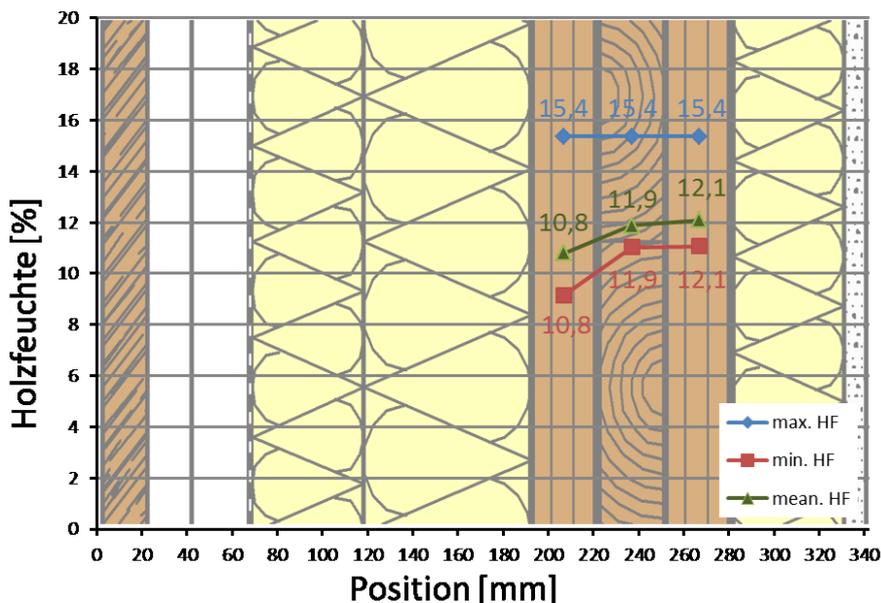
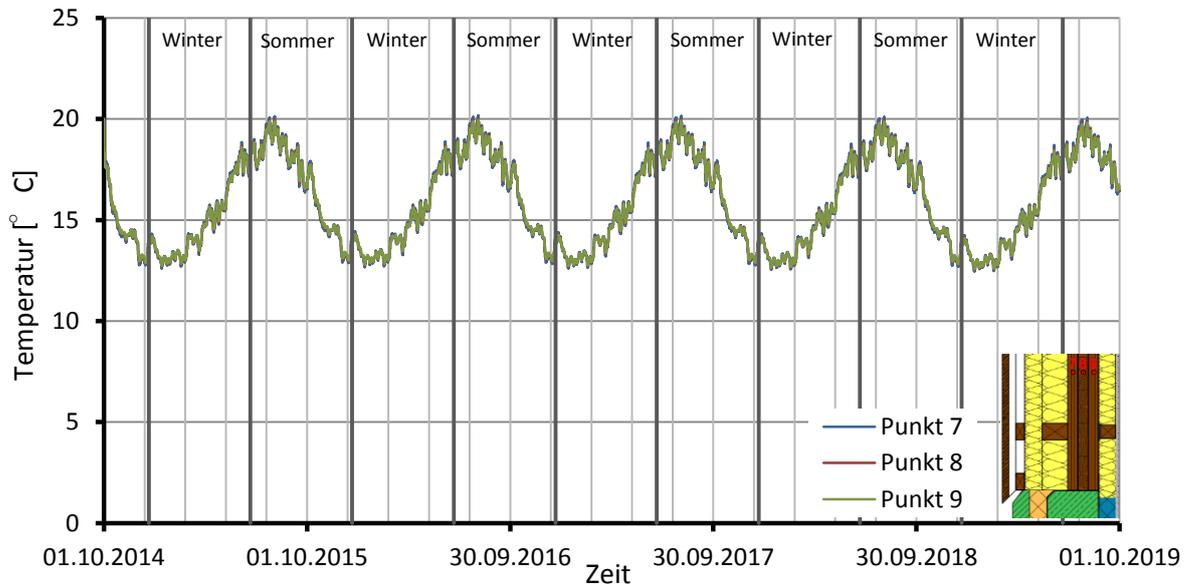
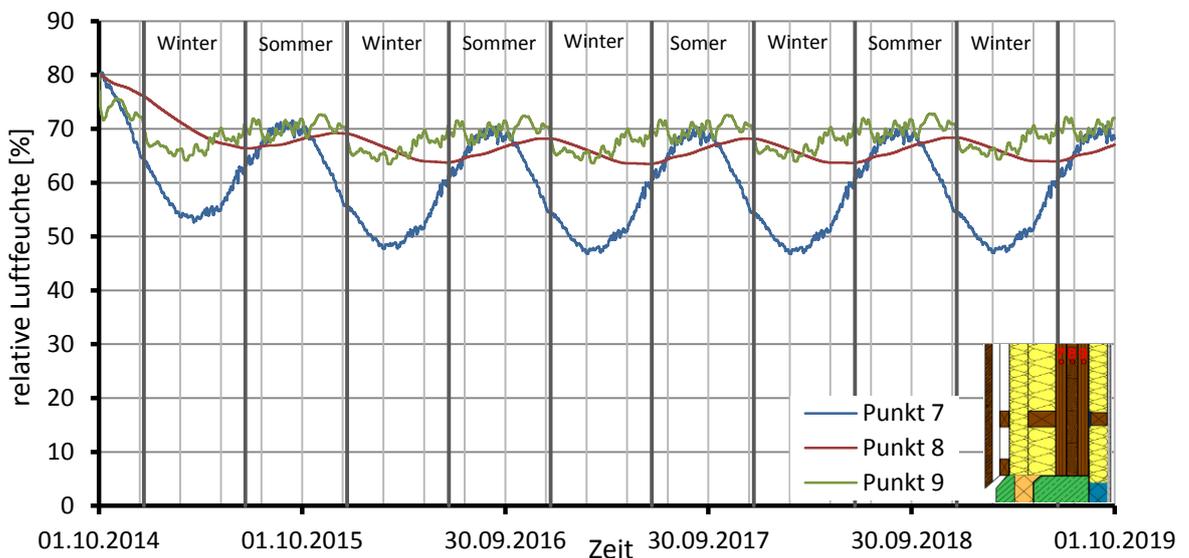


Abbildung 4.68: Umhüllende der Punkte 4-6

In den nachfolgenden Abbildungen sind für die Punkte 7-9 die Diagramme der Temperatur, relativen Luftfeuchte und Holzfeuchte dargestellt. Da sich in diesem Bereich keine Unterschiede zu jenen Diagrammen aus Kapitel 4-5.3.6 ergeben, werden diese in weiterer Folge nicht beschrieben. Aufgrund des gleichen Wandaufbaues zeigen sich folglich idente Ganglinien beider Varianten. Das bedeutet, dass es sich bei den Punkten 7-9 um eine ungestörte Zone handelt und der Einfluss der flankierenden Bauteile verschwunden ist. In einem solchen Fall würde eine eindimensionale Analyse (U-Wert) zur Beurteilung des Bauteilaufbaues genügen.



*Abbildung 4.69: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9*



*Abbildung 4.70: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 7-9*

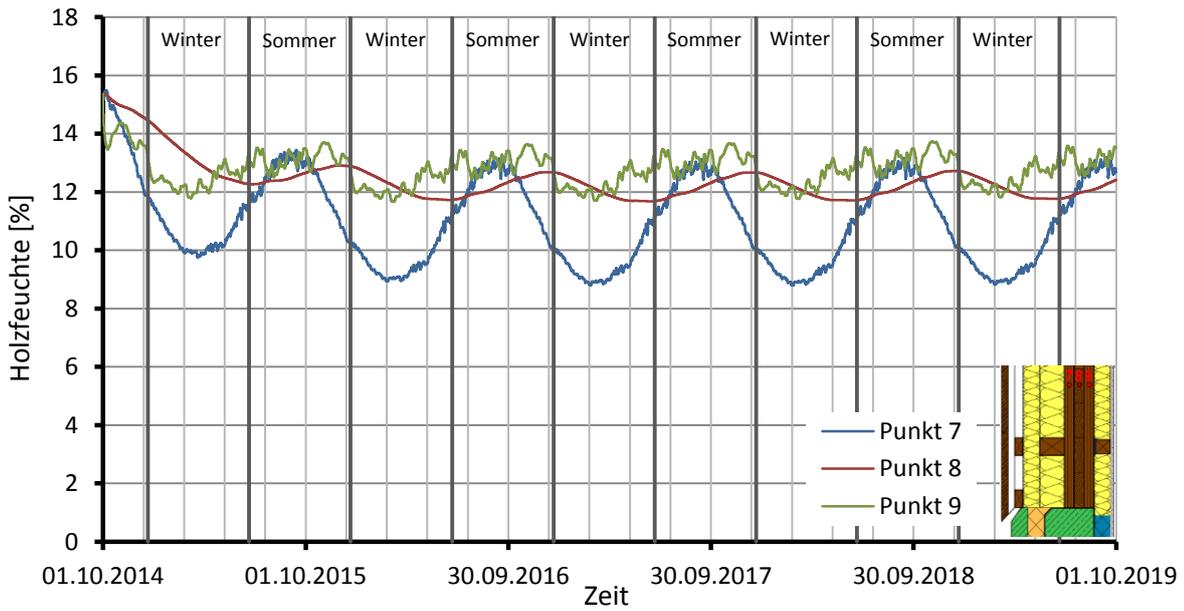


Abbildung 4.71: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9

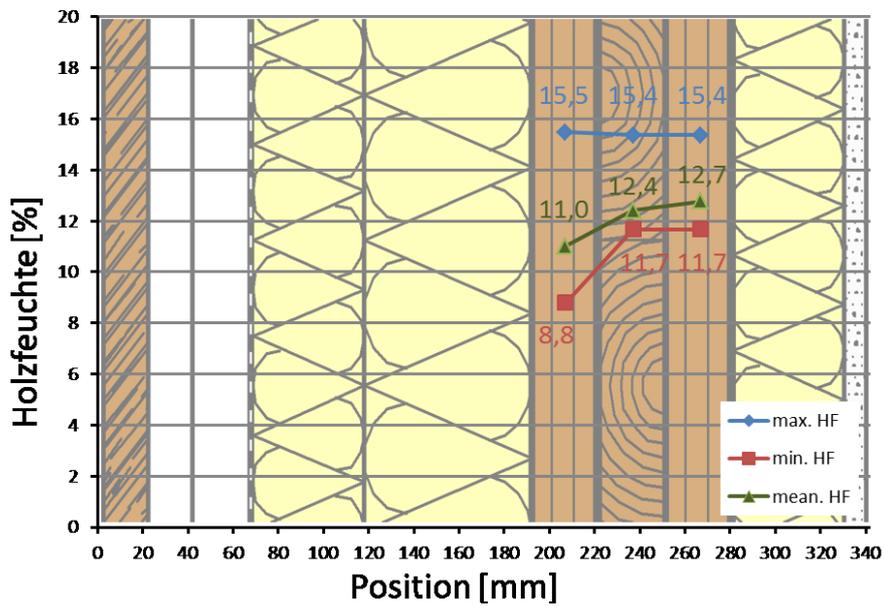
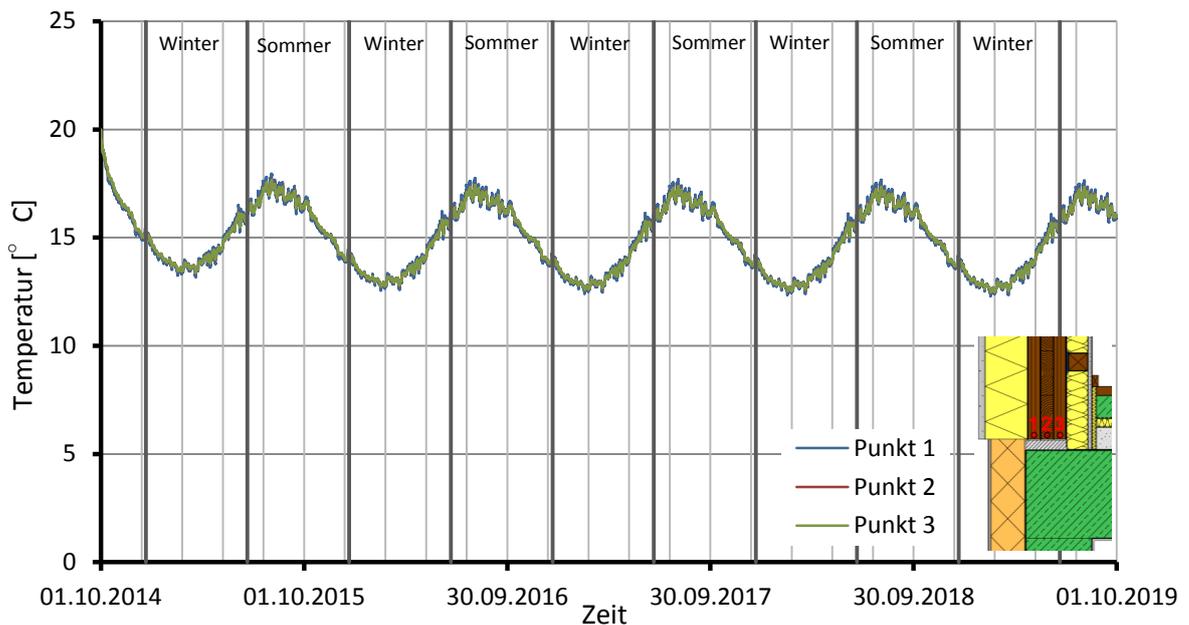


Abbildung 4.72: Umhüllende der Punkte 7-9

#### 4-5.3.8 Sockelvariante „Standardvariante“ (mit WDVS)

##### Punkte 1-3

Wie bei den bisher behandelten Varianten kann auch bei dieser ein gleichmäßiger Temperaturverlauf in allen drei Einzelschichten beobachtet werden. Allerdings liegen die Ganglinien allesamt im Mittel um mehr als 2°C unter jenen der „Standardvariante mit Hinterlüftung“. Bei den Minima ist sogar ein Unterschied von 3,5°C zu verzeichnen. Der Unterschied kann durch die geringere Dämmplattenstärke von 10 cm (anstatt 13 cm Mineralwolle) erklärt werden, was sich auch im höheren U-Wert der Außenwand AW3 widerspiegelt (siehe Kapitel 4-4.2.3).



*Abbildung 4.73: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3*

Die relative Luftfeuchte steigt bei Verwendung eines Wärmedämmverbundsystems teils erheblich über den gesamten Zeitraum an. Der Diffusionswiderstand einer Holzfaserdämmplatte kann den einer Mineralfaserdämmung um das bis zu 10-fache übersteigen und somit zu höheren Feuchtegehalten führen. Grundsätzlich folgt der Diffusionsstrom dem Partialdruckgefälle. Wird jedoch die Feuchtigkeit vom Holz an die Dämmung abgegeben, wird diese je nach Sorptionsfähigkeit des Dämmstoffes dort festgehalten. Bei einer sorptiv kaum reagierenden Mineralwolle geht dieser Vorgang also relativ rasch vor sich und man kann von einer diffusionsoffenen Bauweise sprechen. Bei einem sorptionsfreudigen Material wie einer Holzfaserdämmplatte wird die Feuchtigkeit dementsprechend länger in dieser Schicht verbleiben. Das Sorptionsverhalten eines Dämmstoffes ist daher für die Austrocknung des Bauteiles von größter Bedeutung.

In Abbildung 4.74 ist der Verlauf der relativen Luftfeuchte dargestellt, welche vor allem in den inneren Schichten (Punkt 2 und 3) um bis zu 6% ansteigt. Dieser Unterschied ist, anders als bei der Temperatur, nicht konstruktions- sondern materialbedingt. In der äußersten Schicht erkennt man den gewohnt stark schwankenden Verlauf, wobei hier die Unterschiede zur Dämmung mit Mineralfaserwolle noch etwas höher ausfallen. Die errechneten Werte unterscheiden sich dabei bei den Minima um 9 % und bei den Maxima um 7%.

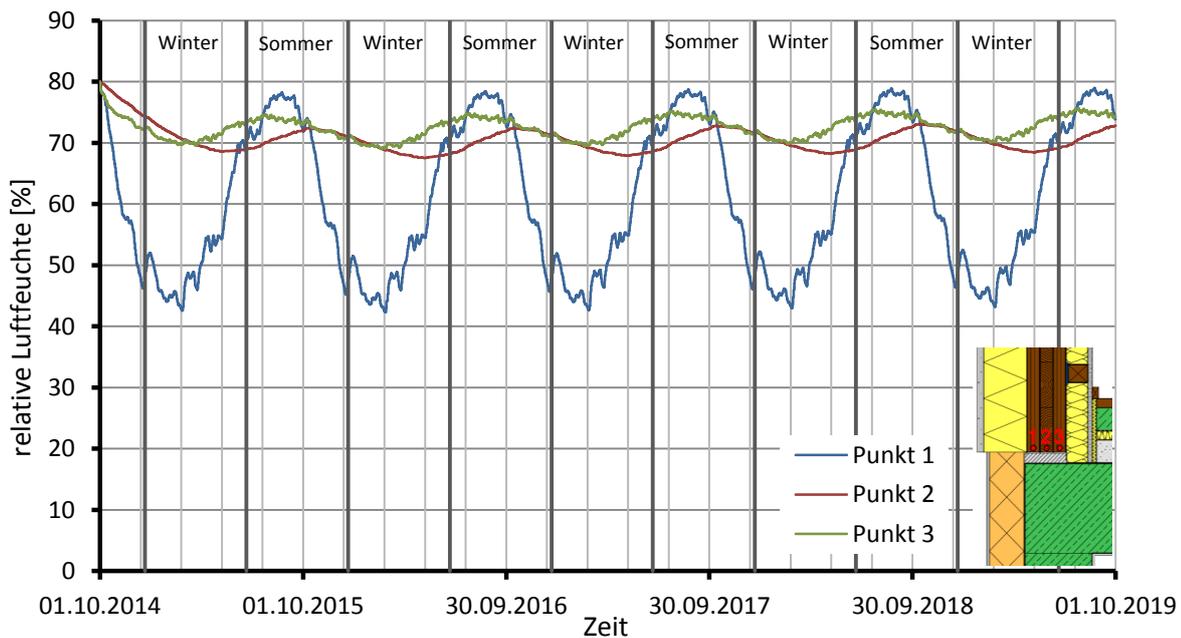


Abbildung 4.74: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 1-3

In der unten stehenden

Abbildung 4.75 sind die Ganglinien der Holzfeuchte dargestellt. Im Vergleich mit der „Standardvariante mit Hinterlüftung“ kann eine qualitative Ähnlichkeit festgestellt werden. Jedoch wird auch eine Erhöhung der Holzfeuchte (zwischen 1% bis 1,5%) vor allem in den inneren Punkten festgestellt. Abbildung 4.76 zeigt die Umhüllende der Holzfeuchte am Wandquerschnitt.

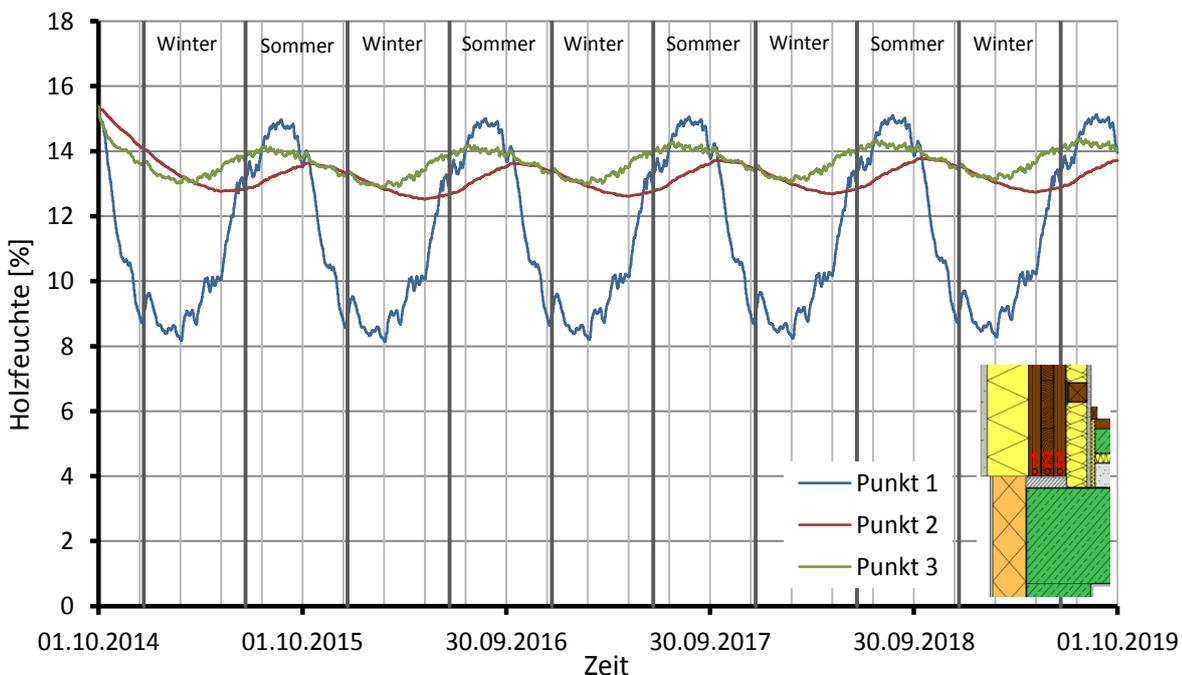


Abbildung 4.75: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3

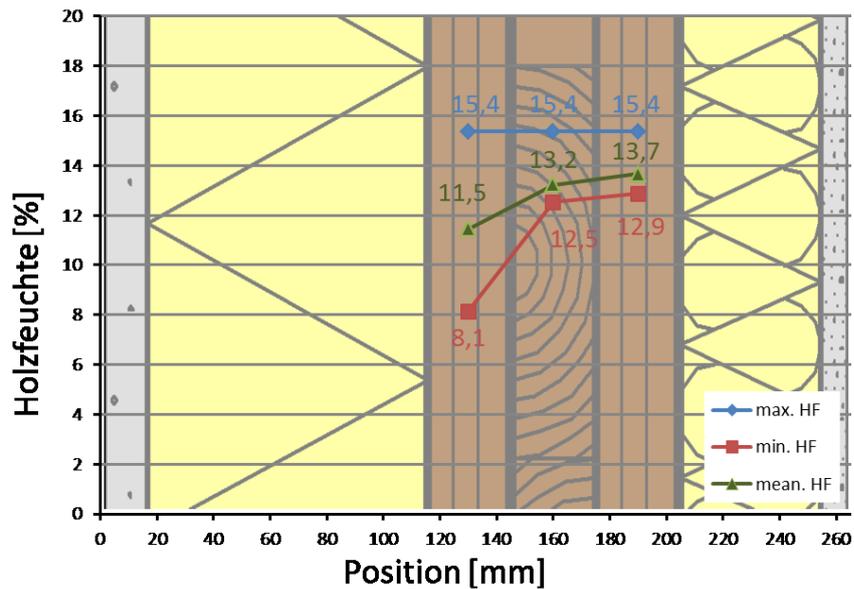


Abbildung 4.76: Umhüllende der Punkte 1-3

#### Punkte 4-6

Der Temperaturverlauf in den Punkten 4-6 weist im Vergleich zu den in den Kapiteln 4-5.3.6 und 4-5.3.7 behandelten Sockelanschlüssen infolge der höheren Feuchtigkeit in der BSP-Wand, niedrigere Temperaturen auf. Der Schwankungsbereich der minimalen Temperaturen liegt dabei zwischen 2,5°C (Betonsockel) bzw. 2,0°C (hinterlüftet). Bei den Mittelwerten fällt der Unterschied mit einer Differenz von 1,7°C bzw. 1,0°C etwas geringer aus.

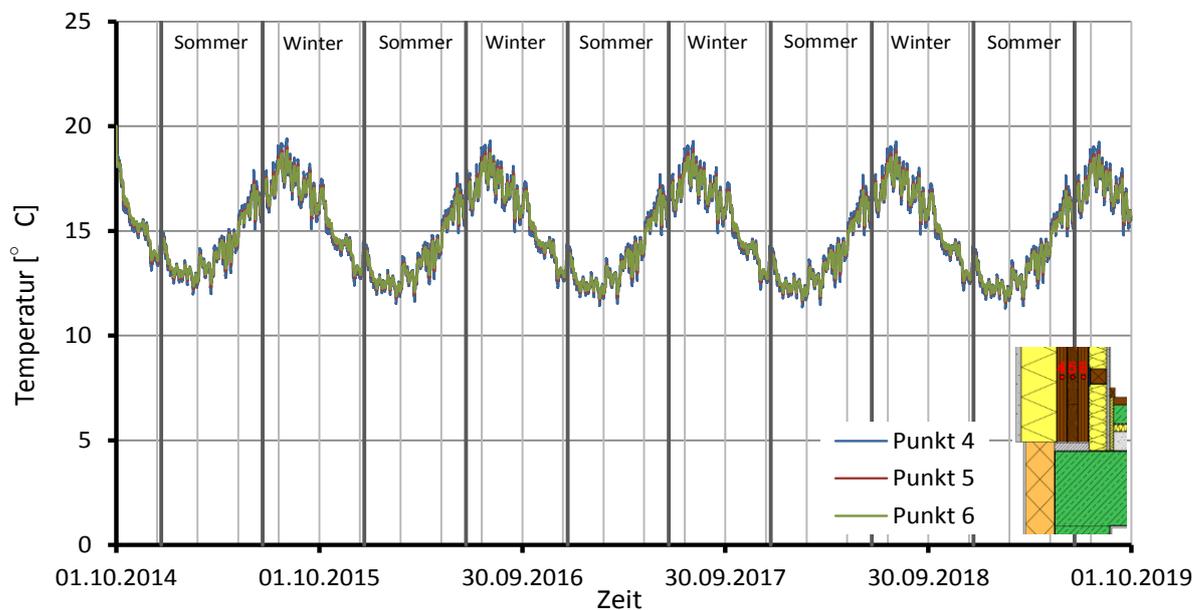


Abbildung 4.77: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6

Die Ganglinien der relativen Feuchte zeigen eine andere Charakteristik als die zuvor gezeigten Varianten. Besonders die Ganglinie in der äußersten Einzelschicht verläuft sprunghafter und bewegt sich in einem breiteren Band zwischen 45% und 75%. Die Ganglinien der Punkte 5 und 6 zeigen zwar den typischen glatten Verlauf, jedoch bewegen sie sich in weiten Bereichen oberhalb der 70% Grenze.

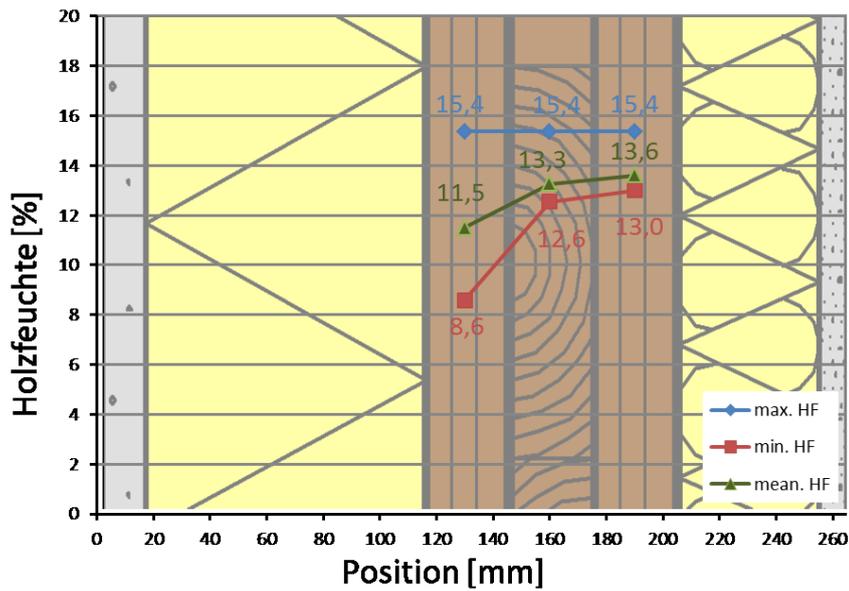


Abbildung 4.78: Umhüllende der Punkte 4-6

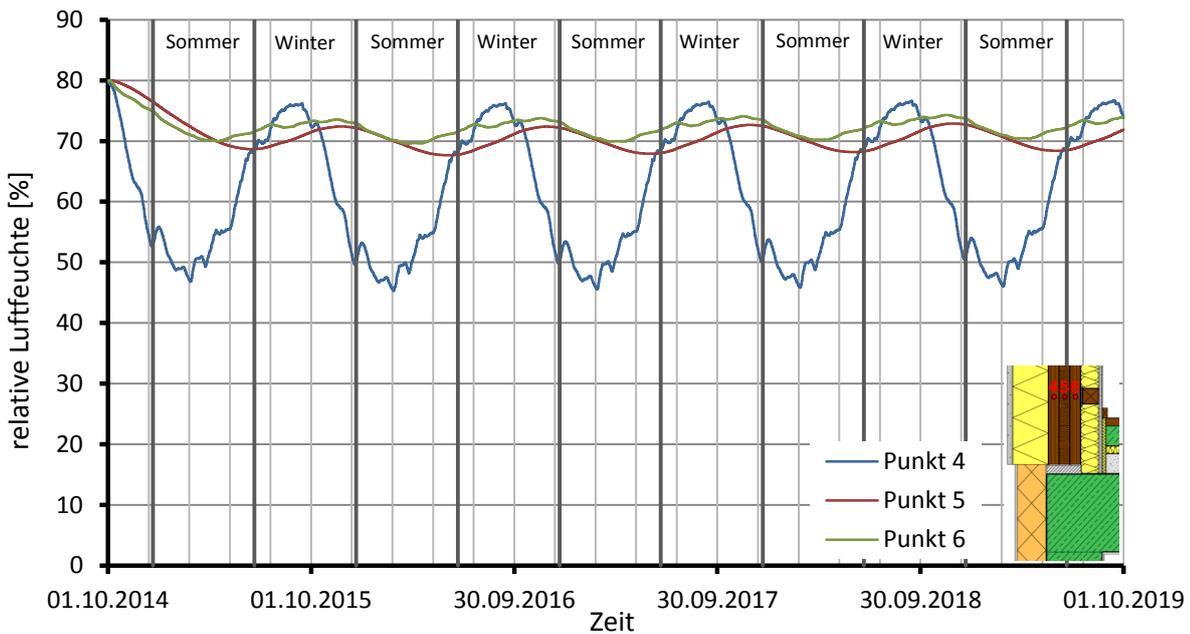


Abbildung 4.79: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6

Die Mittelwerte der Holzfeuchte schwanken in einem Bereich von 11,5% bis 13,6%. Der kleinste Wert wird dabei in Punkt 1 erreicht und beträgt 8,6%. Die Höchstwerte liegen bei 15,4% und sind auf die Anfangsbedingungen zurückzuführen, weswegen dieser Wert in allen drei Schichten erreicht wird.

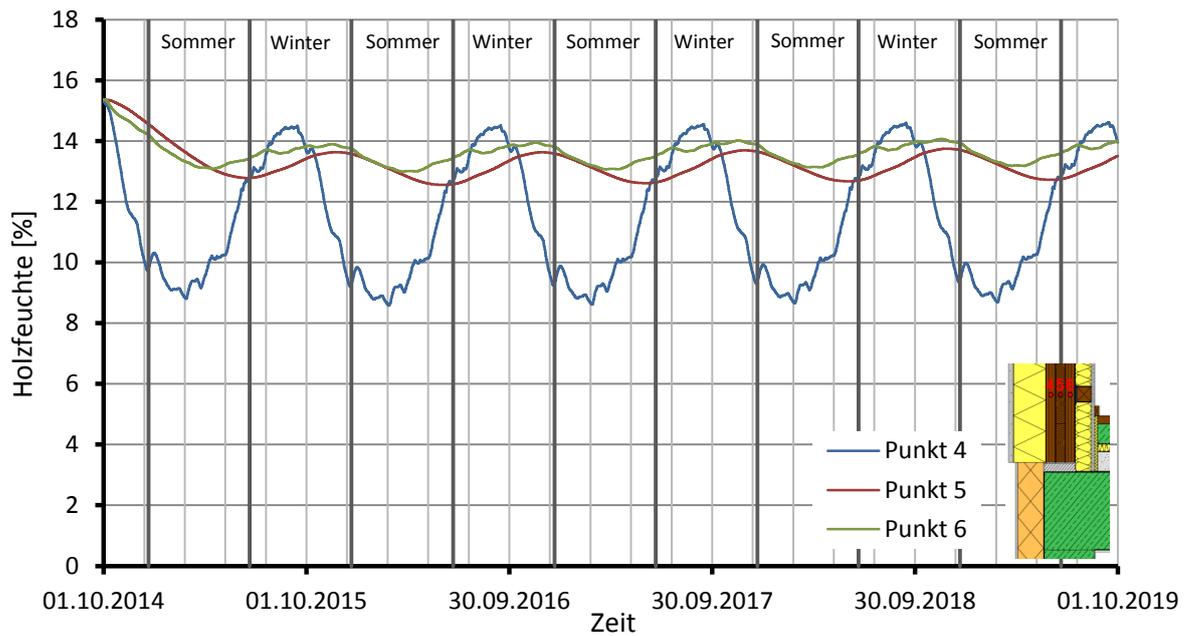


Abbildung 4.80: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6

Abschließend zeigt Abbildung 4.78 und Abbildung 4.76 die Umhüllende der Holzfeuchte am Wandquerschnitt.

#### Punkte 7-9

Die Temperaturverläufe in den Punkten 7-9 verlaufen beinahe ident zu jenen der Punkte 4-6. Die Abweichungen betragen maximal 0,8°C. Deshalb wird an dieser Stelle nicht näher auf die Charakteristik und die Extremwerte der Ganglinien eingegangen.

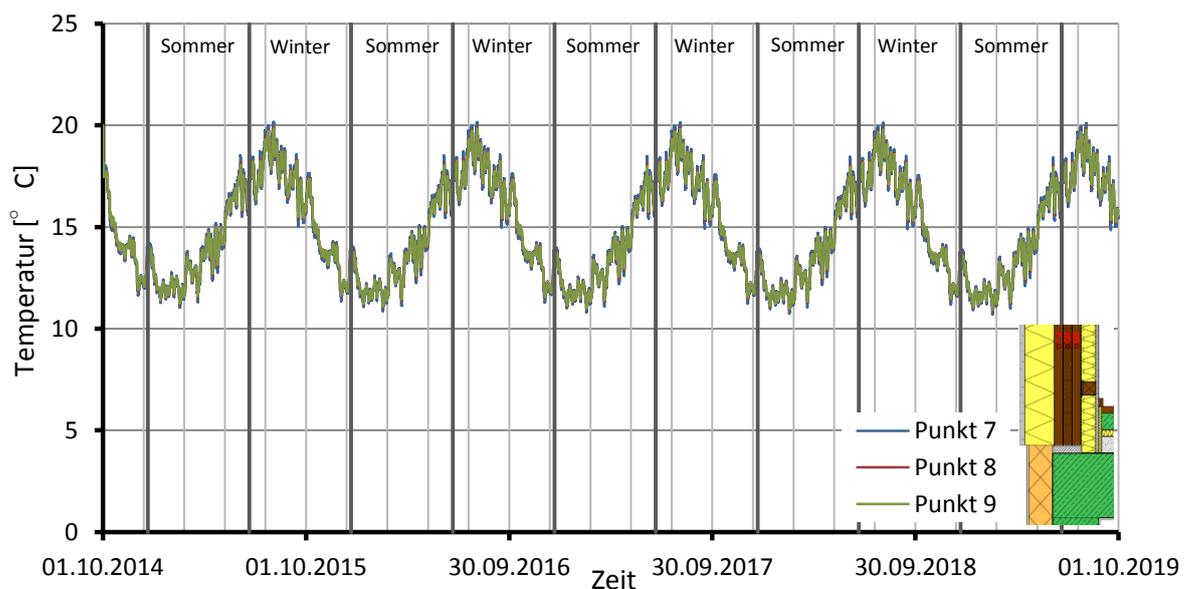


Abbildung 4.81: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9

Bei Monitoring-Position 9 erkennt man wieder den starken Einfluss des Innenklimas, welcher zu einer stark schwankenden Ganglinie führt. Im Inneren der Brettsperrholzwand verläuft die Ganglinie zwar so wie bei den anderen Varianten, allerdings liegt diese um rund. 4% darüber. Punkt 7 schwankt durch den Einfluss des Außenklimas stärker, hier aber beträgt die größte Differenz zu den anderen Varianten nur max. 2,5%.

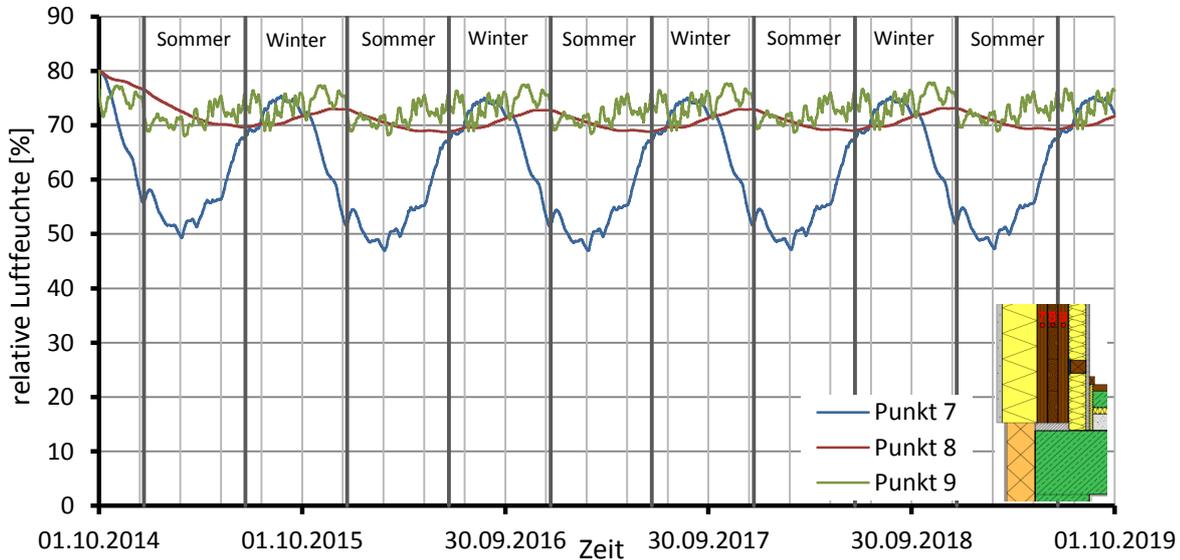


Abbildung 4.82: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 7-9

Die minimale Holzfeuchte von 8,8% wird in Punkt 7 erreicht und weicht nur im Zehntelbereich von den anderen Varianten ab. Die Holzfeuchte in den Punkten 8 und 9 weisen eine Differenz von jeweils einem Prozent auf. Bei den Mittelwerten ergibt sich ein Unterschied von 1%.

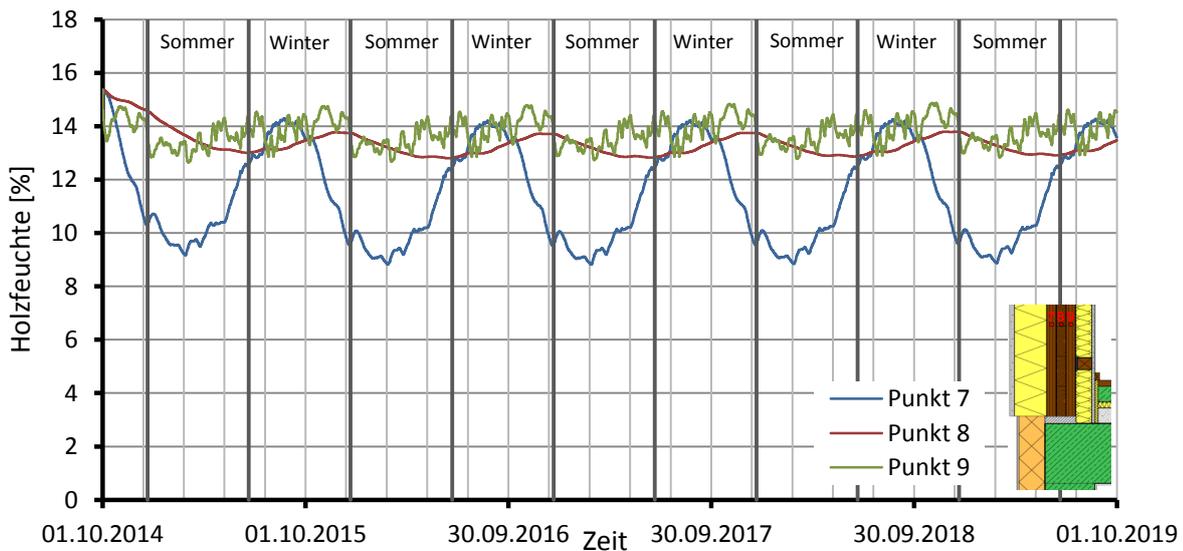


Abbildung 4.83: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9

Abschließend zeigt Abbildung 4.84 die Umhüllende der Holzfeuchte am Wandquerschnitt.

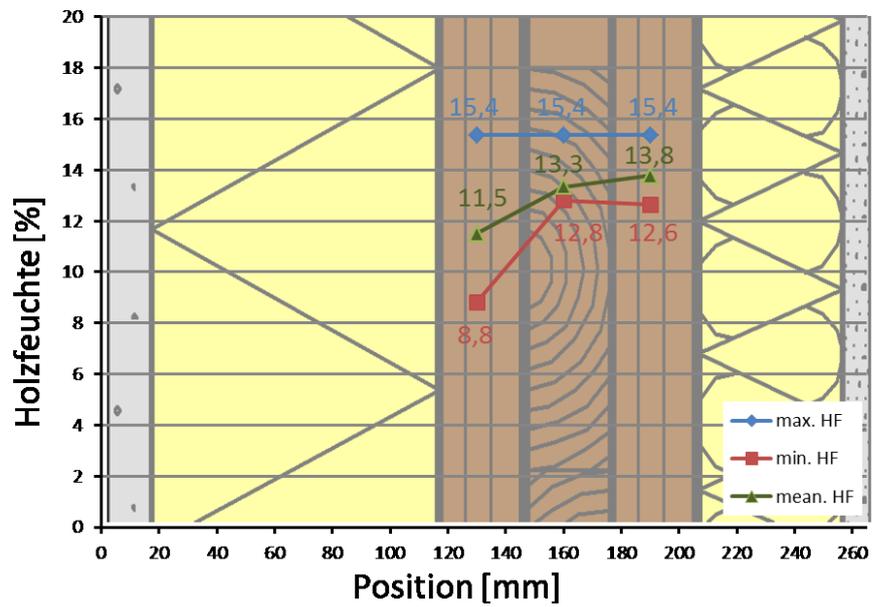


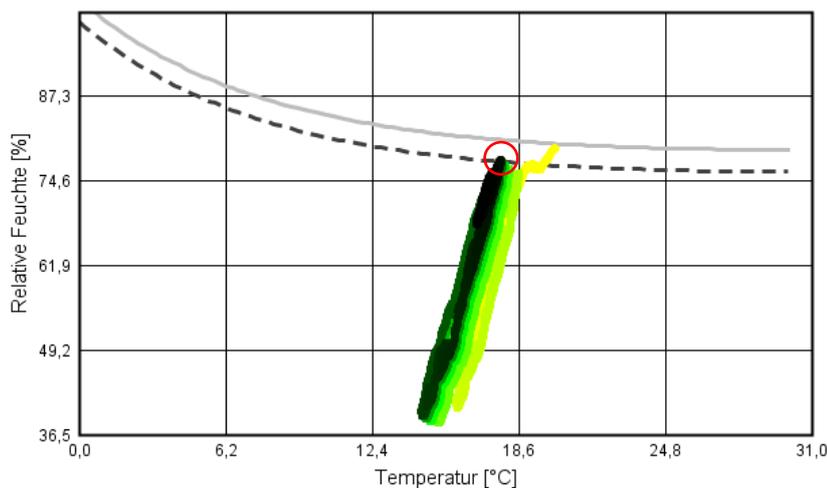
Abbildung 4.84: Umhüllende der Punkte 7-9

## 4-6 BERECHNUNG DES SCHIMMELPILZRISIKOS

### 4-6.1 ALLGEMEINES

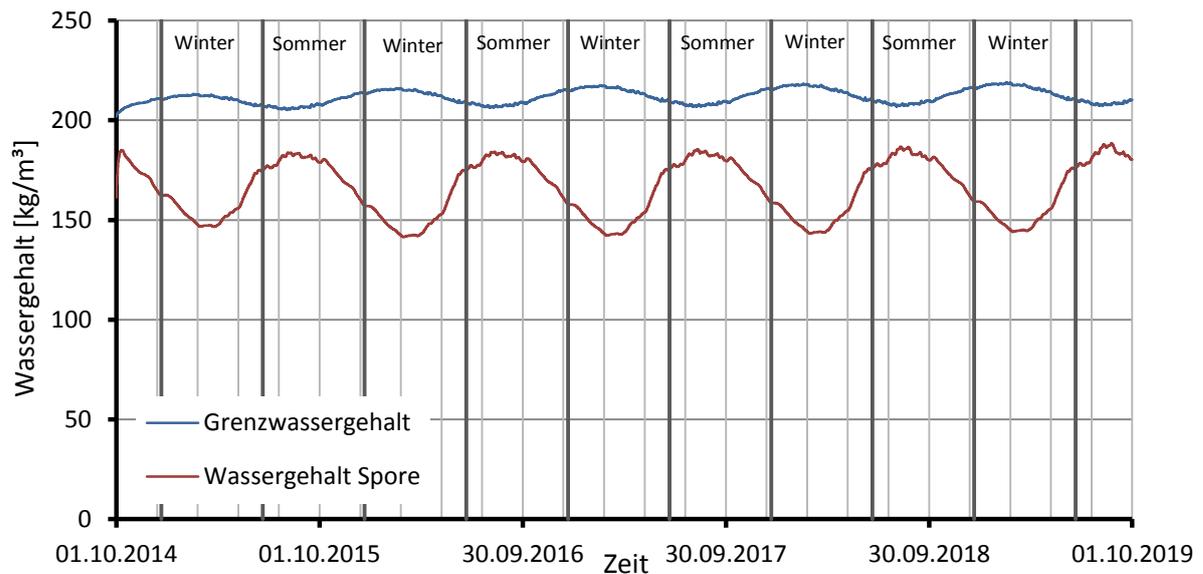
Wie bereits in Kapitel 2-2.5 erwähnt, kommt es zur Schimmelpilzbildung, wenn die Wachstumsbedingungen (relative Luftfeuchte und Temperatur) die LIM-Kurven (Lowest Isoleth for Mould) für einen definierten Zeitraum überschreiten. Die Ergebnisse der instationären Berechnung dienen dazu als Basis. Die Verläufe der Isolethen hängen von der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Zeit ab. Je öfter bzw. länger die Isolethen oberhalb der LIM-Kurven liegen, desto höher ist das Risiko von Schimmelpilzbildung. Verlaufen diese jedoch unterhalb dieser Grenzkurven, kann eine Pilzbildung ausgeschlossen werden. Liegen die Isolethen über den LIM-Kurven, ist eine weitere Betrachtung mit einer biohygrothermischen Simulation notwendig. Im Folgenden sind die Isolethen für die betrachteten Monitoring-Positionen angegeben.

### 4-6.2 SOCKELVARIANTE „STANDARDVARIANTE“ (MIT HINTERLÜFTUNG)



*Abbildung 4.85: Isolethen Punkt 1*

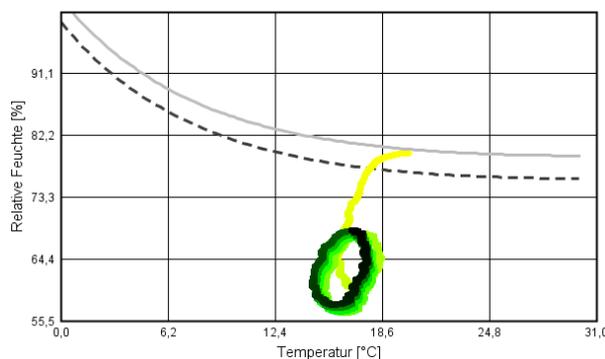
Abbildung 4.85 zeigt den Isolethenverlauf in der äußersten Schicht der Brettsperrholzwand. Die Farbgebung spiegelt dabei den zeitlichen Verlauf wider, wobei der gelbe Bereich die Monate am Anfang der Simulation darstellt, und der Schwarze jene am Ende. Der grüne Bereich stellt folglich die Monate dazwischen dar. Wie bereits in Kapitel 4-5.3.6 erwähnt, sind die äußeren Einzelschichten der BSP-Wand relativ großen Schwankungen ausgesetzt was auch der Verlauf in Abbildung 4.85 zeigt. Dabei erreichen die Isolethen annähernd die untere LIM-Kurve und überschreite diese geringfügig am Ende der Simulation (siehe rote Markierung). Weiters ist aus Abbildung 4.85 bis Abbildung 4.88 zu erkennen, dass nur kurz nach Beginn der Simulation (Anfangsbedingungen für Bauphase) die Isolethen über der LIM1-Kurve liegen. Nach einer kurzen Austrocknungsphase fallen diese jedoch wieder unter die Grenzkurven.



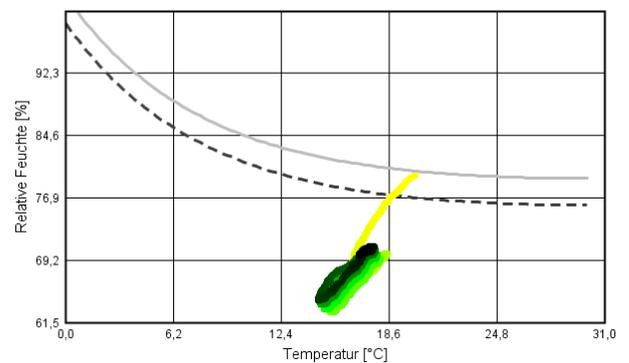
*Abbildung 4.86: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9*

In Abbildung 4.86 ist der Verlauf des Grenzwassergehaltes (blau) und der Wassergehalt der Spore (rot) dargestellt. Der Grenzwassergehalt ist jener Wassergehalt, der notwendig wäre um das Wachstum eines Schimmelpilzes überhaupt zu ermöglichen. Übersteigt nun der Wassergehalt der Modellspore jenen des Grenzwassergehaltes, kommt es zur Auskeimung. Aus dem obigen Diagramm kann festgestellt werden, dass der Wassergehalt der Spore über den gesamten betrachteten Zeitraum einen ausreichenden Abstand zum Grenzwassergehalt aufweist, und somit keine Gefahr bezüglich Schimmelpilzbildung besteht.

Aus Abbildung 4.87 und Abbildung 4.88 wird ersichtlich, dass es sich in den Punkten 2 und 3 um weniger kritische Stellen handelt, da die Isoplethen über die gesamte Simulationszeit weit unterhalb der Grenzkurven liegen. Eine genauere Betrachtung ist deshalb nicht erforderlich, da die Baufeuchtigkeit (siehe Kapitel 4-5) bereits im ersten Jahr vollständig austrocknen kann. Da bei den übrigen Monitoring-Positionen (4-9) kein Risiko der Schimmelpilzbildung besteht, werden die Isoplethendiagramme hier nicht angeführt.



*Abbildung 4.87: Isoplethen Punkt 2*



*Abbildung 4.88: Isoplethen Punkt 3*

### 4-6.2.1 Sockelvariante „Betonsockel“ (mit Hinterlüftung)

In Abbildung 4.91 ist eine deutliche Überschreitung beider LIM-Kurven zu sehen. Das bedeutet, dass für diese Monitoring-Position noch eine weitere Untersuchung mittels des biohygrothermischen Verfahrens (siehe Kapitel 2-2.5.2) notwendig ist, um eine Aussage über die mögliche Bildung von Schimmelpilz treffen zu können. Aus

Abbildung 4.92 wird ersichtlich, dass bereits ab dem dritten Jahr der Grenzwassergehalt überschritten wird und es folglich zum Schimmelpilzwachstum kommt. Zwar beträgt das Wachstum von Mitte Juli bis Anfang Oktober nur 5 mm, jedoch ist auch ein tendenzieller Anstieg des Sporenwassergehaltes und dem damit verbundenen Sporenwachstum zu erkennen.

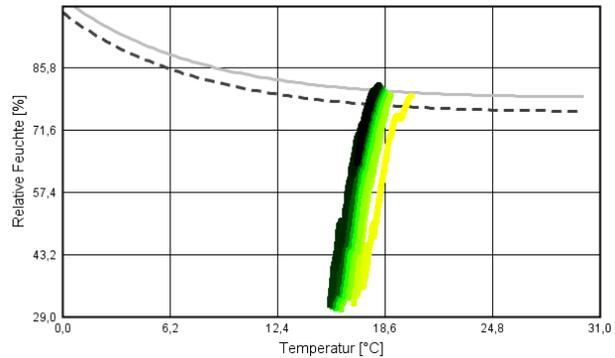


Abbildung 4.91: Isolethen Punkt 1

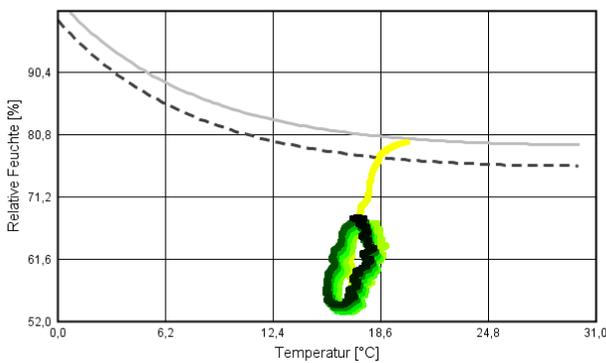


Abbildung 4.89: Isolethen Punkt 2

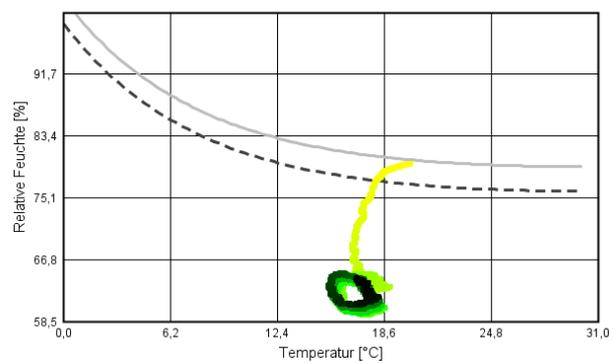


Abbildung 4.90: Isolethen Punkt 3

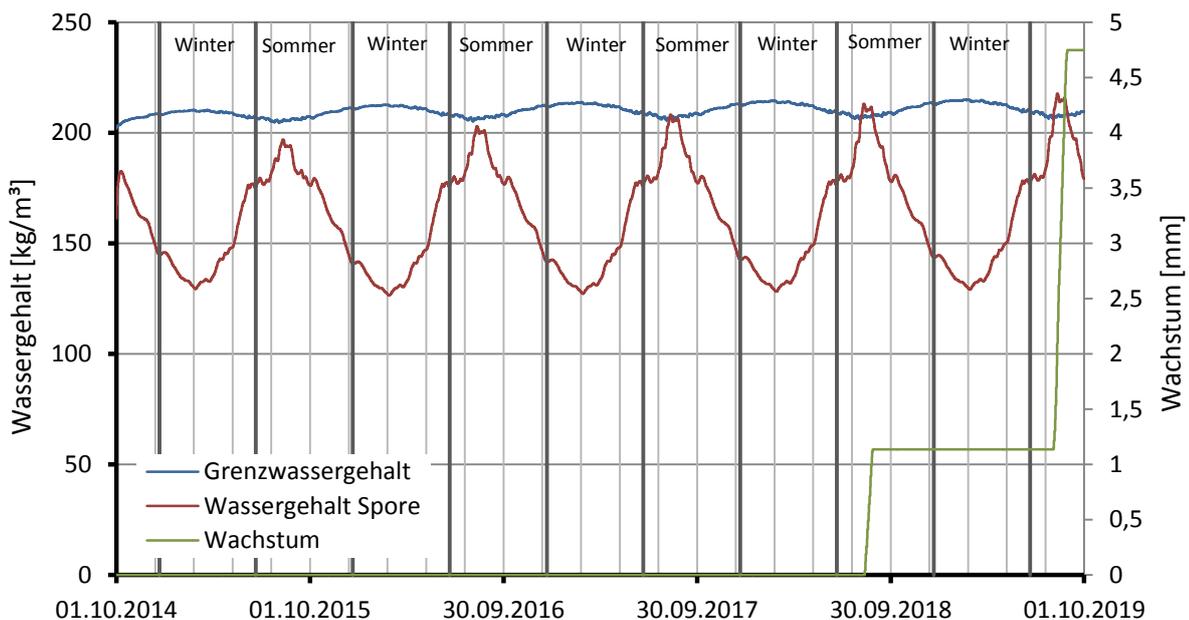


Abbildung 4.92: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 1

### 4-6.2.2 Sockelvariante „Standardvariante“ (mit WDVS)

Wie bei den vorangegangenen Varianten in Kapitel 0 und 4-6.2.1 wird hier nur auf die kritischen Monitoring-Positionen 1-3 eingegangen. Wie in Abbildung 4.93 ersichtlich, übersteigen nur die Isolethen in Punkt 1 geringfügig die LIM-Kurven. Deshalb wird das biohygrothermische Verfahren im Folgenden nur für Punkt 1 angewandt.

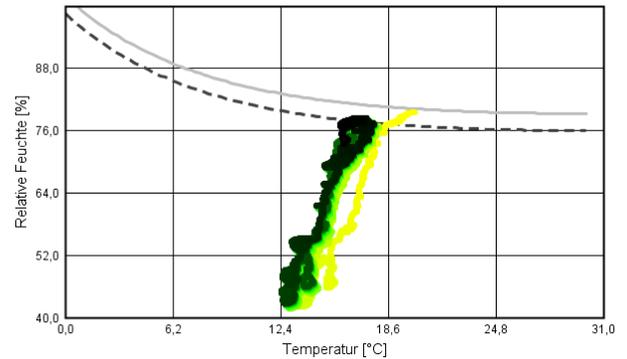


Abbildung 4.93: Isolethen Punkt 1

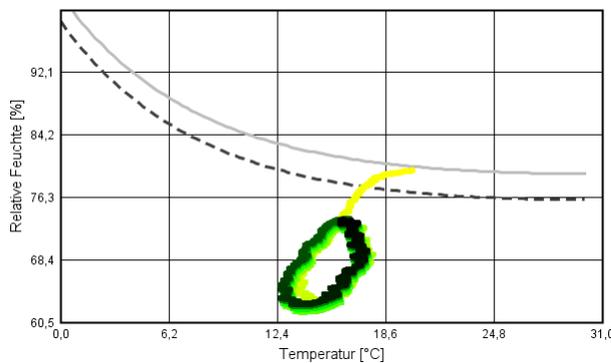


Abbildung 4.95: Isolethen Punkt 3

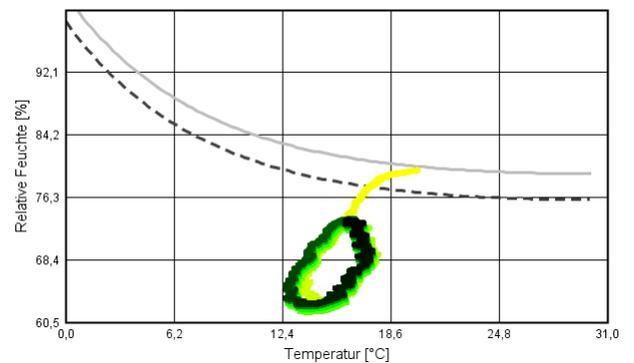


Abbildung 4.94: Isolethen Punkt 2

In Abbildung 4.96 schneidet der Sporenwassergehalt erst nach 5 Jahren die Linie des Grenzwassergehaltes und das Pilzwachstum beginnt. Des Weiteren ist eine klare Tendenz von einem sich langsam erhöhenden Wassergehalt erkennbar, allerdings ist das Sporenwachstum um ein Vielfaches kleiner als bei der Variante mit Betonsockel. Zwar kommt es bei dieser Variante auch zur Schimmelpilzbildung, jedoch ist das Wachstum von 0,035 mm als sehr gering einzuschätzen wenn man bedenkt dass es sich hier um eine einzelne Modellspore handelt.

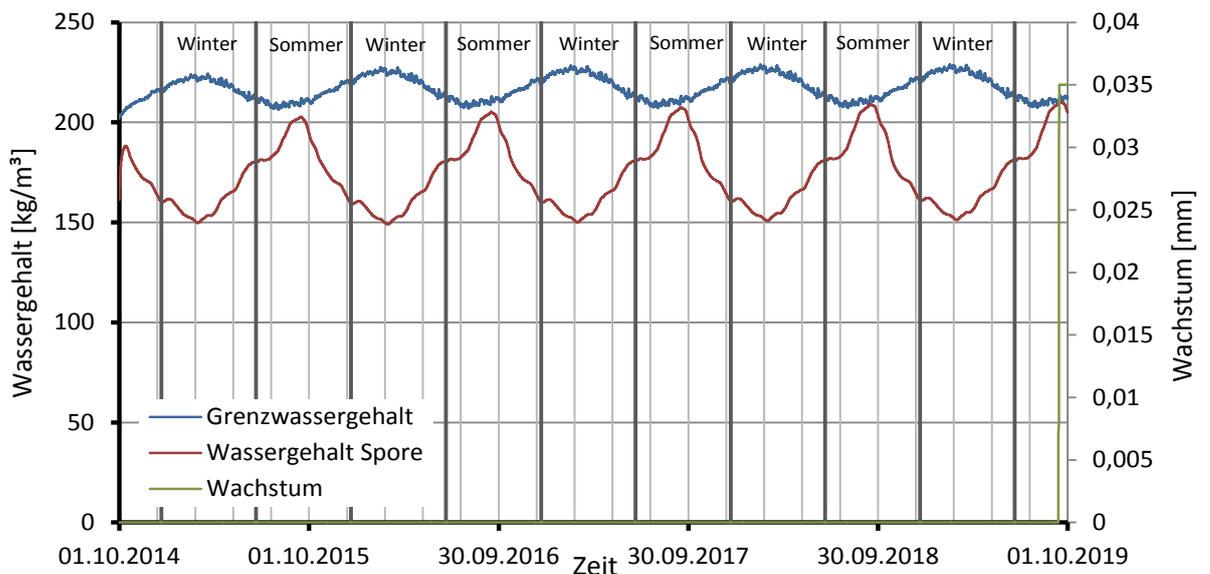


Abbildung 4.96: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 1

## 4-7 ENTWICKLUNG DER HOLZFEUCHTE

In Bauteilen bzw. Bauteilschichten kann der Feuchtegehalt im Laufe der Zeit zunehmen, wenn nicht ausreichende Austrocknungsreserven vorhanden sind. Um die Entwicklung der Holzfeuchte in der BSP-Wand zu untersuchen, wurden Simulationen der in Kapitel 4 vorgestellten Sockeldetails über einen Zeitraum von zehn Jahren durchgeführt. Anschließend wurden die Maximalwerte (Peaks) ausgewertet und in den folgenden Diagrammen dargestellt. Die Verläufe geben Aufschluss über eine Zu- oder Abnahme der Holzfeuchte in den gewählten Monitoring-Positionen und ermöglichen somit eine Prognose der weiteren Entwicklung.

### 4-7.1 STANDARDVARIANTE MIT HINTERLÜFTUNG

In Abbildung 4.97 bis Abbildung 4.99 ist die Entwicklung des maximalen Holzfeuchtegehaltes in den Punkten 1 bis 9 dargestellt.

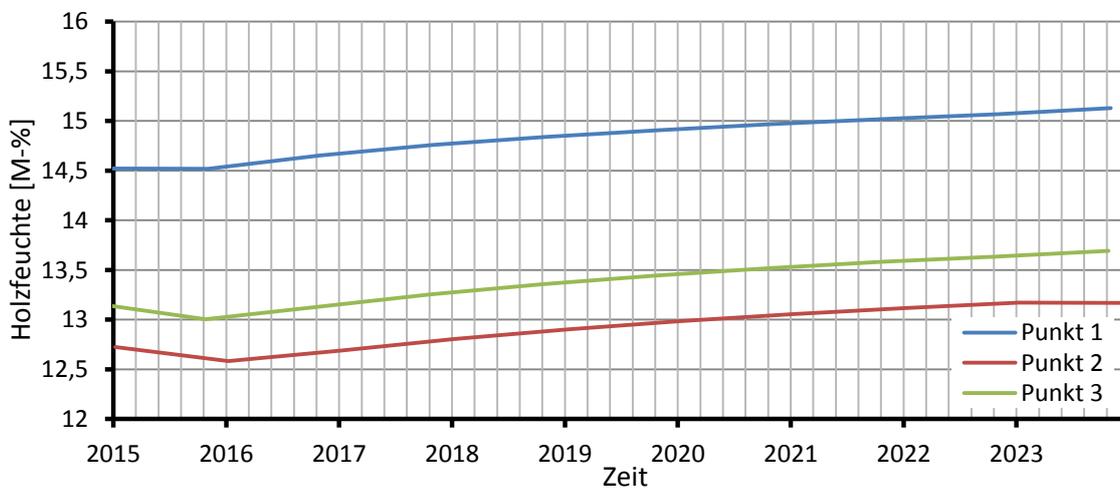


Abbildung 4.97: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 1 bis 3

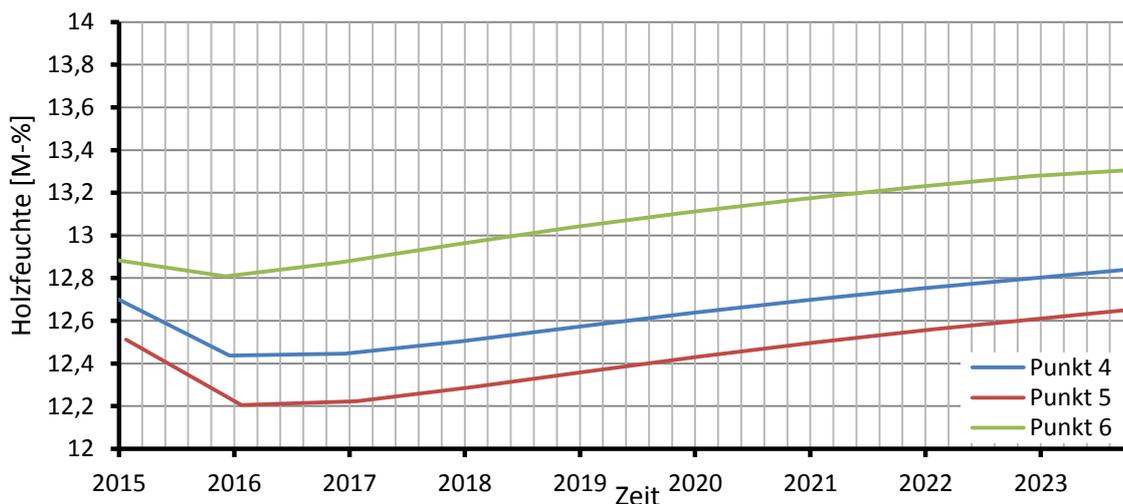


Abbildung 4.98: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkt 4 bis 6

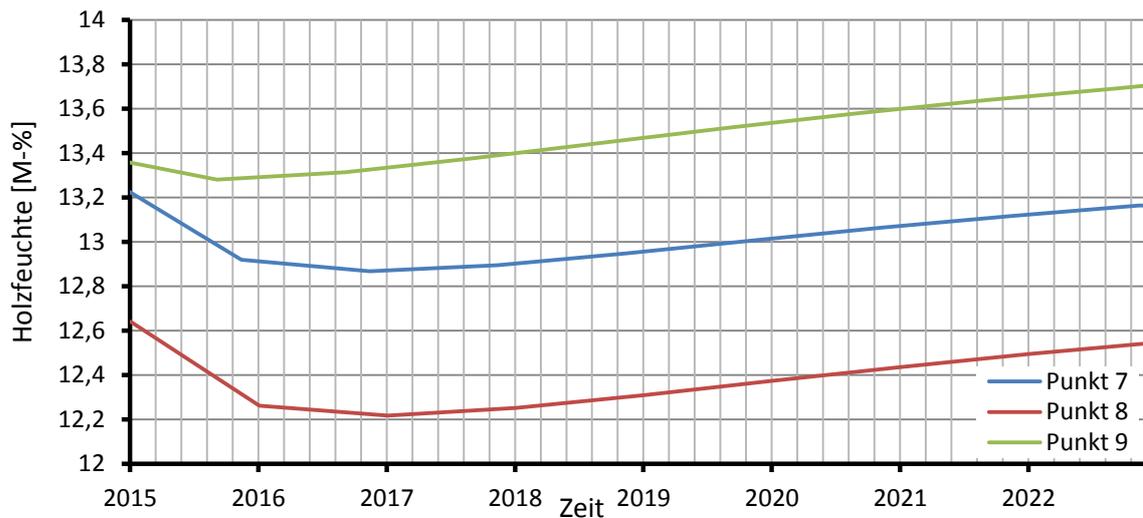


Abbildung 4.99: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkt 7 bis 9

Wie schon in Kapitel 4-5 beschrieben, kommt es im ersten Jahr zu einer raschen Austrocknung der Baufeuchte. Danach ist ein degressiver Anstieg des Holzfeuchtegehaltes in allen Monitoring-Positionen zu beobachten. Die Zunahme beträgt jedoch in allen Punkten nur zwischen 0,5 % und 0,7 %. Mit zunehmendem Abstand vom Sockel findet ein Wechsel der Verläufe der äußeren und inneren Monitoring-Position statt, während der Verlauf der mittleren Einzelschicht stets die geringste Holzfeuchte aufweist. Nimmt man ein lineares Verhalten an, so würde die Holzfeuchte nach 30 Jahren im kritischen Punkt 1 rund 17,5 % betragen.

## 4-8 BETONSOCKEL MIT HINTERLÜFTUNG

In Abbildung 4.100 bis Abbildung 4.102 ist die Entwicklung des maximalen Holzfeuchtegehaltes in den Punkten 1 bis 9 dargestellt.

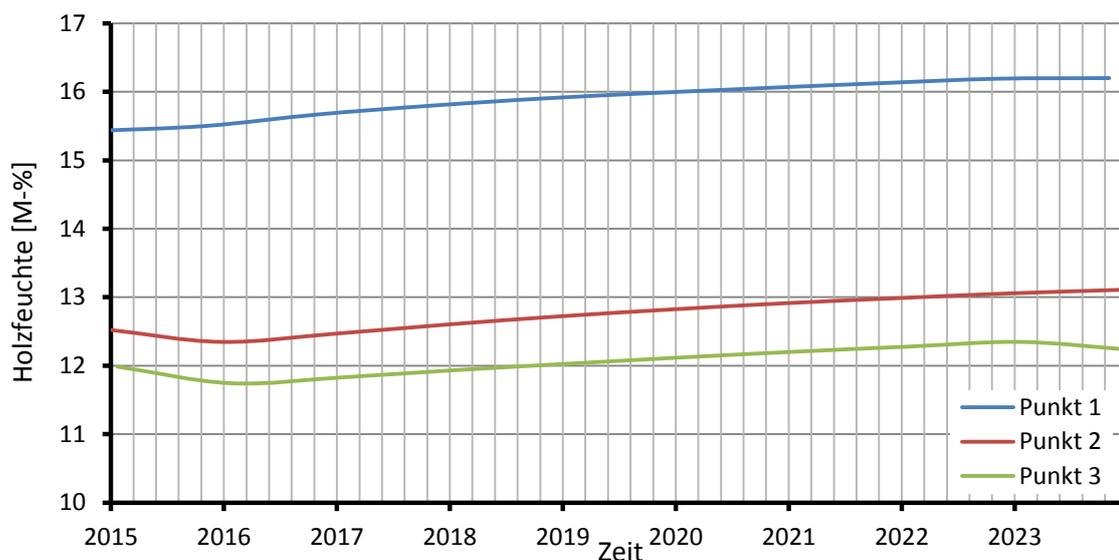


Abbildung 4.100: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 1 bis 3

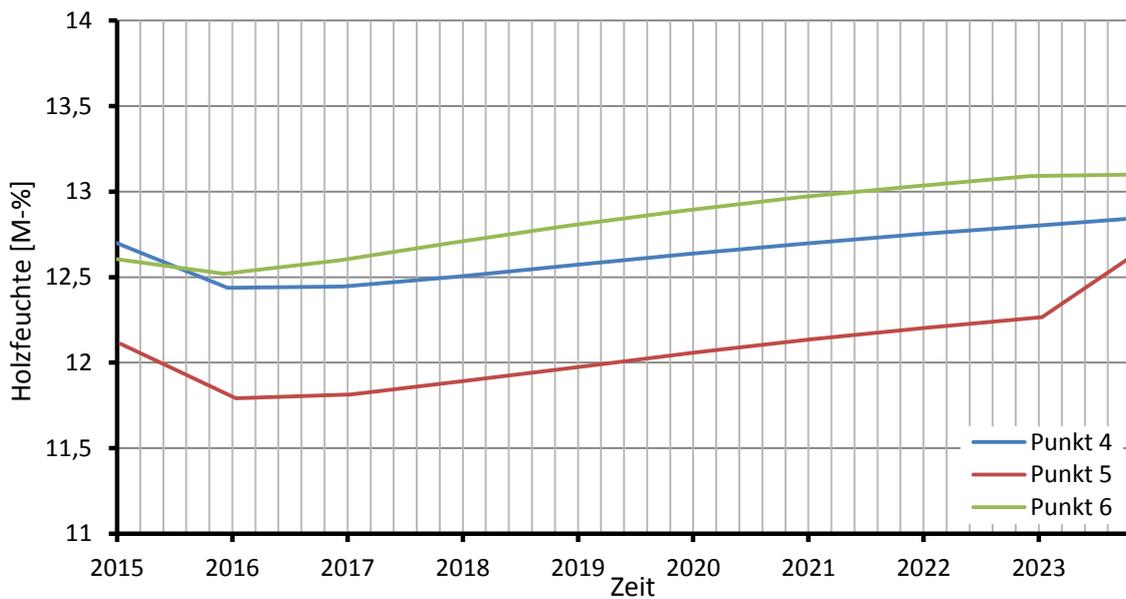


Abbildung 4.101: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 4 bis 6

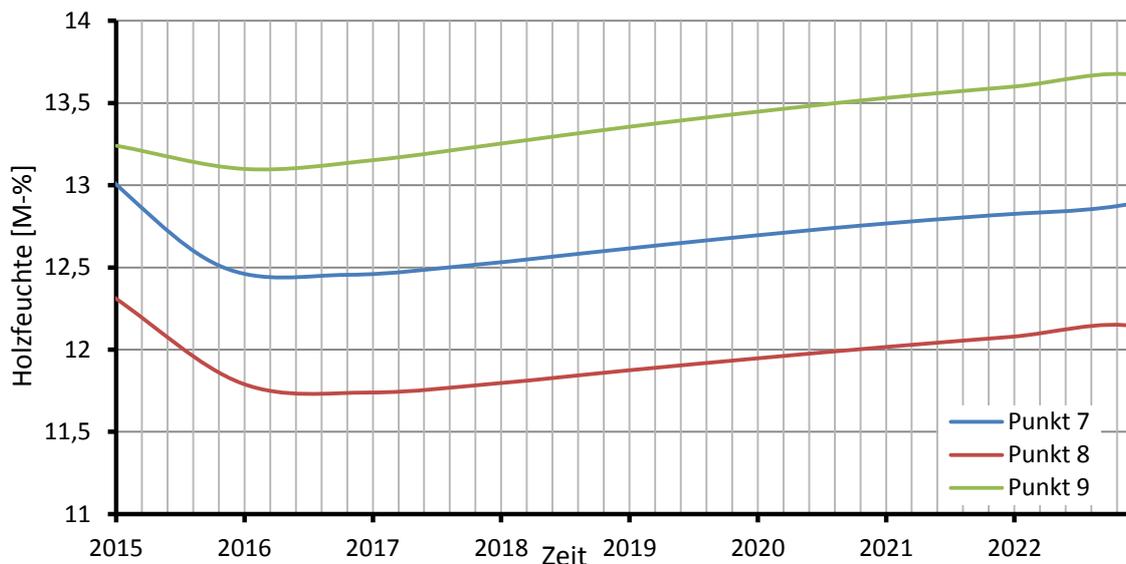


Abbildung 4.102: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 7 bis 9

Abbildung 4.100 zeigt einen etwas anderen Verlauf in der äußersten Monitoring-Position. Hier kommt es zu keiner anfänglichen Austrocknung der Baufeuchte. Der Verlauf lässt einen sofortigen Anstieg in den ersten zwei bis drei erkennen. Zwar fällt der Anstieg flacher aus als jener der Standardvariante, jedoch liegt dieser auch im gesamten Bereich um rund 1 % höher. In Abbildung 4.101 ist der Wechsel der äußeren und inneren Einzelschicht zu erkennen, welcher auch in Kapitel 4-7.1 beobachtet wurde. Anders als bei der Standardvariante ist die Holzfeuchte in der untersten Messreihe allerdings geringer als jene der mittleren Einzelschicht. Ein Effekt der sich durch die geringere Temperatur, verursacht durch die Wärmebrücke des Betons, erklären lässt. Mit sinkender Temperatur steigt die Holzfeuchte an. Im ungestörten Bereich (siehe Abbildung 4.102) zeigt sich ein ähnliches Bild wie jenes der Standardvariante in Abbildung 4.99.

## 4-9 STANDARDVARIANTE MIT WDVS

In Abbildung 4.100 bis Abbildung 4.102 ist die Entwicklung des maximalen Holzfeuchtegehaltes in den Punkten 1 bis 9 dargestellt.

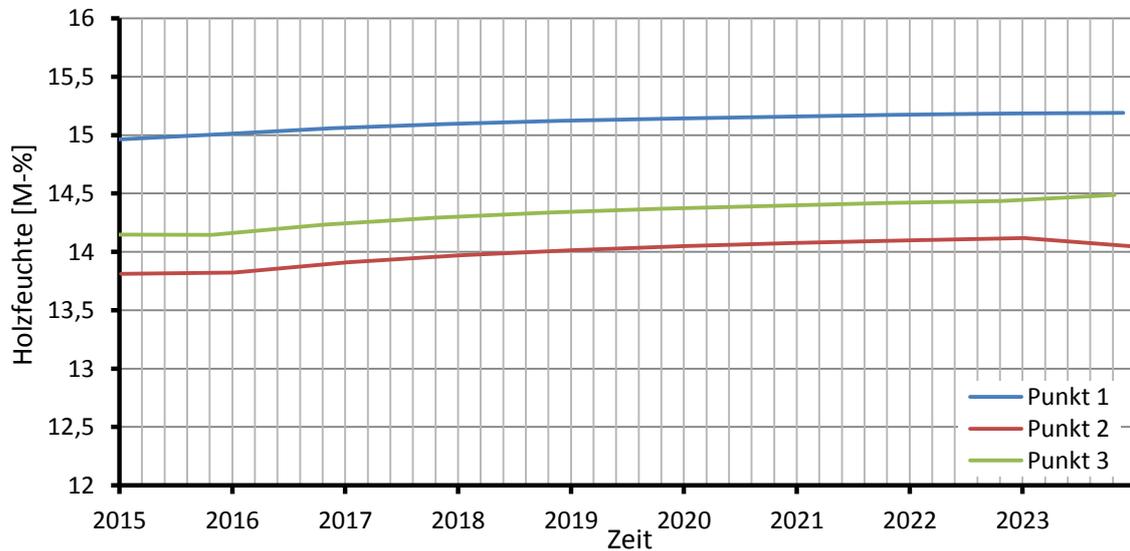


Abbildung 4.103: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 1 bis 3

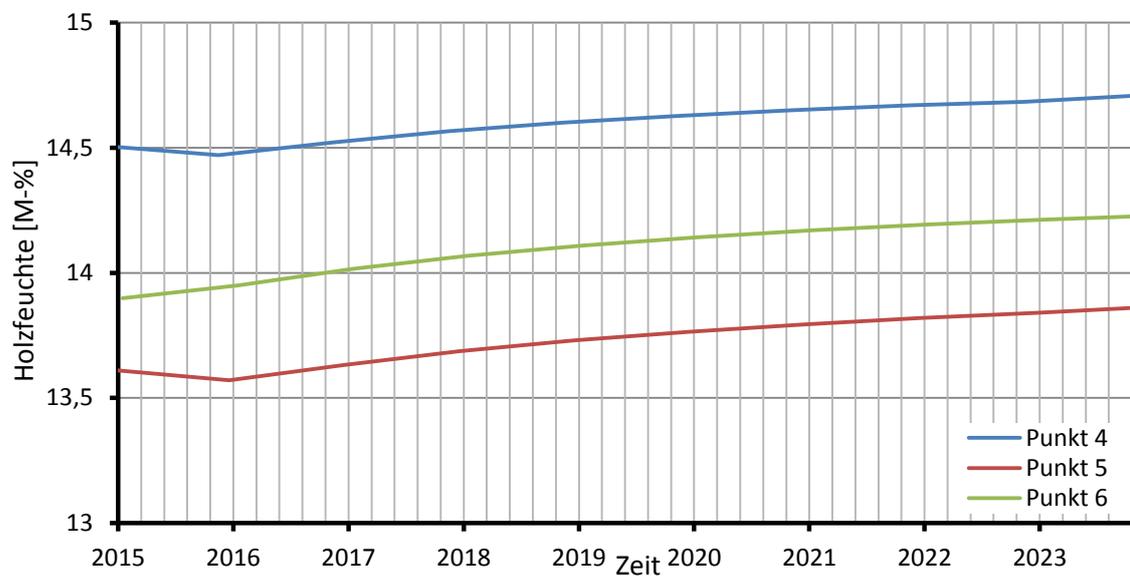
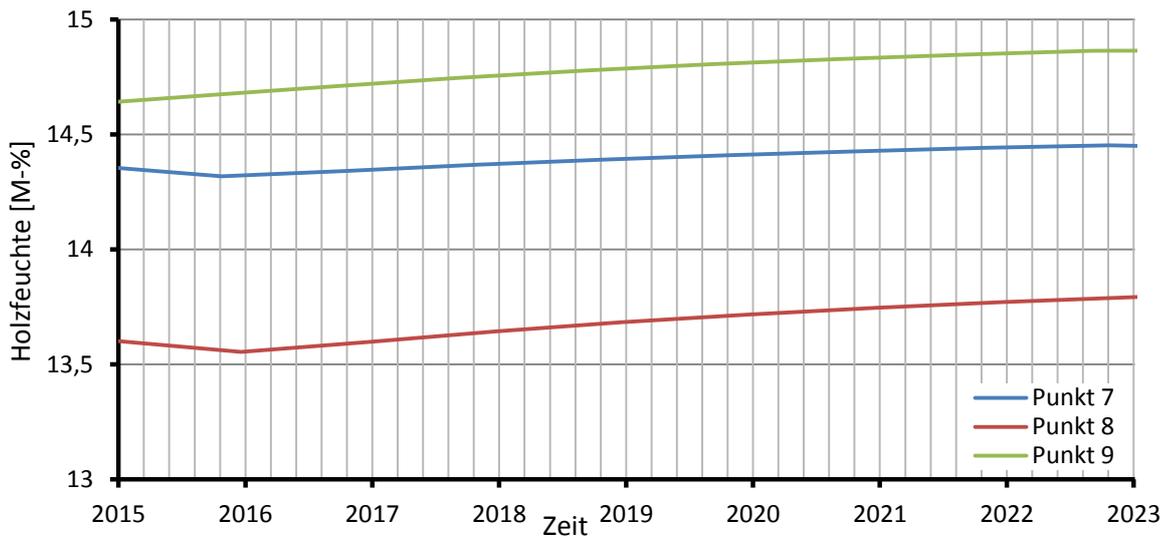


Abbildung 4.104: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 4 bis 6



*Abbildung 4.105: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 7 bis 9*

Die unterste Messreihe (siehe Abbildung 4.103) zeigt bereits nach rund vier Jahren einen nicht weiter ansteigenden Verlauf der Holzfeuchte. Auch in der mittleren und inneren Einzelschicht ist ein im Vergleich zur Standardvariante relativ flacher Verlauf zu erkennen, allerdings liegt die Holzfeuchte am Beginn der Simulation zwischen 1% bis 2% höher. Die Punkt 4 bis 6 (siehe Abbildung 4.104) zeigen dagegen wieder einen stärkeren Anstieg mit der Zeit und liegen ebenfalls um rund 1% bis 2% höher im Vergleich zu den anderen beiden Varianten. Auffallend an allen Messpunkten ist der flache Abfall der Holzfeuchtigkeit im ersten Jahr, was für ein geringeres Austrocknungspotential als bei hinterlüfteten Fassaden spricht.

## 4-10 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aller instationären Berechnungen tabellarisch zusammengefasst, um so eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse zu erreichen. Die Tabellen beinhalten jeweils die minimalen, maximalen und mittleren Werte von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte.

**Tab.: 29: Ergebnisse der Standardvariante mit Hinterlüftung**

Monitoring-Position	Temperatur [°C]			relative Luftfeuchte [%]			Holzfeuchte [M-%]		
	min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean
1	14,5	20,0	16,4	32,8	83,4	55,4	6,8	16,3	10,5
2	14,5	20,0	16,4	60,1	80,0	65,2	11,1	15,4	12,1
3	14,5	20,0	16,4	62,6	80,0	67,4	12,1	15,4	12,5
4	12,8	20,0	15,9	50,7	80,0	60,5	9,4	15,4	11,2
5	13,1	20,0	15,9	62,5	80,0	66,6	11,5	15,4	12,3
6	13,2	20,0	15,9	64,6	80,0	68,3	11,9	15,4	12,7
7	12,5	20,2	15,8	46,8	80,5	59,3	8,8	15,5	11,0
8	12,5	20,0	15,8	63,5	80,0	67,0	11,7	15,4	12,4
9	12,6	20,0	15,8	63,4	80,0	68,6	11,7	15,4	12,8

**Tab.: 30: Ergebnisse der Variante Betonsockel mit Hinterlüftung**

Monitoring-Position	Temperatur [°C]			relative Luftfeuchte [%]			Holzfeuchte [M-%]		
	min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean
1	15,3	20,0	16,8	31,2	82,4	54,0	6,6	16,0	10,3
2	15,3	20,0	16,8	58,2	80,0	63,0	10,7	15,4	11,6
3	15,3	20,0	16,8	59,8	80,0	63,7	11,0	15,4	11,8
4	13,4	20,4	16,6	49,2	80,0	58,5	9,2	15,4	10,8
5	14,0	20,0	16,6	59,9	80,0	64,3	11,0	15,4	11,9
6	14,1	20,0	16,6	60,1	80,0	65,4	11,1	15,4	12,1
7	12,5	20,2	15,8	46,8	80,5	59,3	8,8	15,4	11,0
8	12,5	20,0	15,8	63,5	80,0	67,0	11,7	15,4	12,4
9	12,6	20,0	15,8	63,4	80,0	68,6	11,7	15,4	12,8

**Tab.: 31: Ergebnisse der Standardvariante mit WDVS**

Monitoring-Position	Temperatur [°C]			relative Luftfeuchte [%]			Holzfeuchte [M-%]		
	min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean
1	12,3	20,0	14,9	42,3	80,0	61,0	8,1	15,4	11,5
2	12,4	20,0	14,9	67,5	80,0	70,6	12,5	15,4	13,2
3	12,5	20,0	14,9	69,0	80,0	72,5	12,9	15,4	13,7
4	11,3	20,0	14,9	45,3	80,0	61,6	8,6	15,4	11,5
5	11,6	20,0	14,9	67,7	80,0	70,8	12,6	15,4	13,3
6	11,7	20,0	14,9	69,6	80,0	72,3	13,0	15,4	13,6
7	10,7	20,2	14,8	46,9	80,0	61,7	8,8	15,4	11,5
8	10,9	20,0	14,8	68,8	80,0	71,1	12,8	15,4	13,3
9	10,9	20,0	14,8	68,0	80,0	73,0	12,6	15,4	13,8

In den Tabellen 13-15 sind sämtliche Ergebnisse aller Monitoring-Positionen angegeben, wobei die rot eingefärbten Werte jene Werte darstellen, welche die Anforderungen aus dem Kapitel 3-4.10 überschreiten. Die Anforderungen an die Gebrauchsklasse 0 (siehe Kapitel 3-4.8) werden allerdings an allen Monitoring-Positionen erfüllt. Nach ÖNORM B 3802-1:2015 besteht somit weder eine Gefahr des Insektenbefalles, der Bildung von Pilzen und der Bildung von Moderfäule.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Mittelwerte der betrachteten Bereiche der Brettsperrholzwand für alle drei Varianten in der Nutzungsklasse 1 (siehe Kapitel ) liegen. Die Mittelwerte schwanken dabei im Bereich von 10,3 % bis 13,8 %. Sieht man sich jedoch die maximalen Werte an, so liegen diese mit zum Teil 16,3 % deutlich über den maximal zugelassenen  $u = 12\%$  (siehe ÖNORM B 1995-1-1: 2014). Vor allem in den mittleren Einzelschichten der BSP-Wand kommt es zu Holzfeuchten die bis zu 5 Monate über  $u = 12\%$  liegen und somit nicht der Nutzungsklasse 1 entsprechen. Da jedoch nach ÖNORM EN 1995-1-1:2014 Hölzer erst ab einer Holzgleichsfeuchte von über 20 % in die Nutzungsklasse 2 fallen, können BSP-Wände im Bereich des Sockels auch nicht dieser Klasse zugeordnet werden. ÖNORM EN 1995-1-1:2014 erlaubt es allerdings, dass die geforderte Holzgleichsfeuchte von 12 % für einige Wochen überschritten werden darf. Zunächst stellt sich hier natürlich die Frage, wieviel Wochen denn genau „einige Wochen“ sind. Sieht man sich aber die Ganglinien der Auflagernahen Monitoring-Positionen der inneren zwei Schichten an, erkennt man eine Überschreitung der 12%-Marke für mehrere Monate. Die Bezeichnung „einige Wochen“ lässt zwar einigen Interpretationsspielraum, jedoch erscheint die Überschreitung der Holzfeuchte über mehrere Monate nicht im Sinne der Verfasser zu sein.

Holzwerkstoffe deren Feuchtegehalt jener Ausgleichsfeuchte entspricht die sich bei 85% relativer Luftfeuchte einstellen würde, fallen nach ÖNORM EN B 3802-1:2015 in die Gebrauchsklasse 0. Dies würde in etwa einer Holzfeuchte von 18% entsprechen. In ÖNORM EN B 3802-1:2015 wird die Holzfeuchte für Gebrauchsklasse 0 allerdings mit 20% angegeben. Brettsperrholzwände im Sockelbereich liegen somit in der Gefährdungsklasse 0. Im Gegensatz zu den Nutzungsklassen zielen die Gebrauchsklassen jedoch auf eine Vermeidung eines möglichen Schimmelpilzbefalles ab. Dennoch konnte in Kapitel 4-6.2.1 und 4-6.2.2 gezeigt werden, dass Schimmel, durch eine stetige Zunahme des Gesamtwassergehaltes, erst auch nach mehreren Jahren entstehen kann. Die Simulationen haben außerdem gezeigt, dass dies bereits unterhalb einer Holzfeuchte von 20% geschehen kann.

Zwar sind stationäre Berechnungsmethoden, seien diese ein- oder zweidimensional, wie das Verfahren nach Glaser noch immer Stand der Technik und für viele Bemessungssituationen hinreichend genau. Allerdings hat die vorliegende Untersuchung gezeigt, dass auch nach stationären Bedingungen als unbedenklich einzustufende Bauteilaufbauten, mit der Zeit ihr Wärme- und Feuchtverhalten ändern. Das bedeutet, dass durch eine stetige Feuchtigkeitszunahme die Wärmeleitfähigkeit und die Wasserdampfdiffusion beeinflusst werden. Auch das Risiko eines Schimmelpilzbefalles (siehe Kapitel 2-2.5) kann dadurch sehr rasch steigen und gerade im Holzbau zu erheblichen Schäden führen, abgesehen von den hygienischen und gesundheitlichen Problemen. Daher sollten den heutzutage verfügbaren Möglichkeiten, wie instationäre Simulationen auf Basis numerischer Berechnungsverfahren, unbedingt der Vorzug gegeben werden.

## 4-11 GEGENÜBERSTELLUNG: NUTZUNGSKLASSE VS. GEBRAUCHSKLASSE

Wie in Kapitel 3-4.8 bereits erwähnt, werden nach EN 1995-1-1:2014 drei Nutzungsklassen zur Zuordnung der Festigkeitswerte und der Berechnung von Verformungen für Holzbauteile festgelegt. Nach EN 335:2013 bzw. ÖNORM B 3802-1:2015 werden allerdings Gebrauchsklassen (siehe Kapitel 3-4.10) für die biologische Dauerhaftigkeit definiert. In EN 335:2013 findet sich des Weiteren in Anhang A die Tabelle A.1 (siehe Tabelle 16) in welcher den Nutzungsklassen, möglich entsprechende Gebrauchsklassen zugeordnet werden.

**Tab.: 32:** *Nutzungsklassen und deren mögliche entsprechende Gebrauchsklassen (35)*

Nutzungsklasse nach EN 1995-1-1	möglichst entsprechende Gebrauchsklasse nach EN 335:2013
Nutzungsklasse 1	Gebrauchsklasse 1
Nutzungsklasse 2	Gebrauchsklasse 1 Gebrauchsklasse 2, sofern das Bauteil in einer Situation ist, in der es einer gelegentlichen Befeuchtung, z.B. durch Kondensation, ausgesetzt sein kann.
Nutzungsklasse 3	Gebrauchsklasse 2 Gebrauchsklasse 3 oder höher, sofern im Außenbereich verwendet

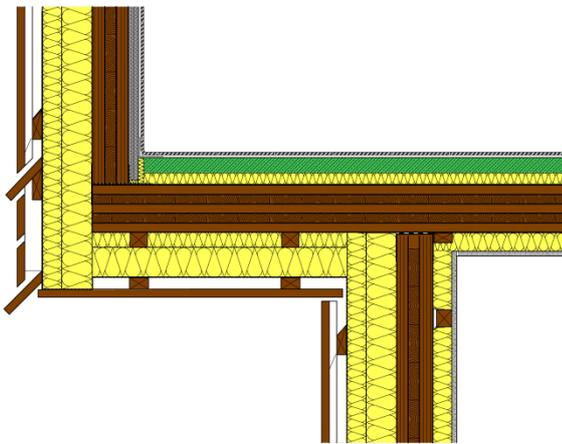
Anhang A in EN 335:2013 weist auch darauf hin, dass das System der Nutzungsklassen aus EN 1995-1-1:2014 und jenes der Gebrauchsklassen aus EN 335:2013 unterschiedlich und somit nicht deckungsgleich sind. Die oben angeführte Tabelle 16 soll demnach eine Orientierung hinsichtlich der für eine bestimmte Nutzungsklasse am wahrscheinlichsten entsprechenden Gebrauchsklasse bieten. Für den Planer sei es jedoch erforderlich, beide Systeme bei der Berechnung und Bemessung von tragenden Konstruktionen zu berücksichtigen.

Ruft man sich nochmals in Erinnerung, dass Nutzungsklasse 1 einen Holzfeuchtegehalt von  $u \leq 12\%$  fordert und die Gebrauchsklasse 1 nach ÖNORM B 3802-1:2015 einen ständigen Holzfeuchtegehalt von maximal 20% bei einer mittleren relativen Feuchte von 85% erlaubt, wird dem aufmerksamen Leser nun der nicht unbedeutende Unterschied von 8% auffallen, der dem Planer eine genaue Zuordnung der beiden Klassensysteme möglicherweise nicht erleichtern wird.

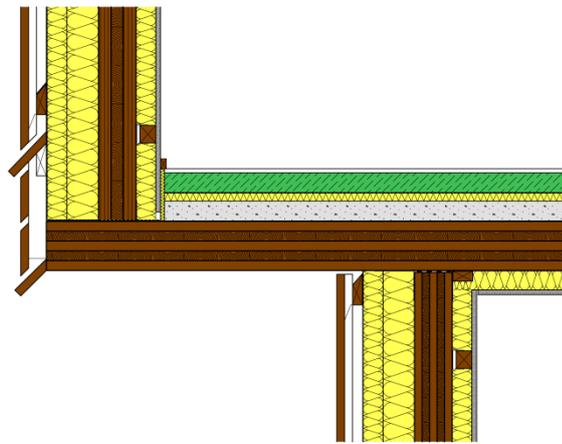
## 4-12 DECKENAUSKRAGUNGEN

### 4-12.1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Als Decke bezeichnet man horizontal ausgeführte Bauteile, die in erster Linie eine raumabschließende oder trennende Funktion haben. Sie dienen allerdings auch als Geh- und Standflächen. Der Aufbau und die Dimensionierung von Geschossdecken innerhalb von Wohn- und Betriebseinheiten werden neben den abzutragenden Nutzlasten auch durch den Schallschutz bestimmt. Die Nutzlasten werden vertikal zur Deckenebene eingeleitet, wodurch das Brettsperrholz als Platte wirkt. Bei Decken gegen unbeheizte Räume oder Außenluft, wie zum Beispiel Deckenauskragungen, sind hingegen auch Anforderungen an Wärme- und Feuchteschutz zu stellen. Besondere Aufmerksamkeit in diesem Zusammenhang ist hierbei Nass- oder Feuchträumen mit sichtbaren BSP-Deckenelementen zu schenken. Oft werden Deckenauskragungen mit einer sichtbaren Deckenunterkante gewünscht. Die Problematik hierbei besteht im Wärmeschutz, da es sich bei einer Deckenauskragung ohnehin um eine geometrische Wärmebrücke handelt. Im vorliegenden Bericht soll einerseits die Problematik dieses Bauteilanschlusses aufgezeigt und andererseits eine Lösung erarbeitet werden. Die detaillierten Aufbauten werden in Kapitel 4-12.2 behandelt. Abbildung 4.106 und Abbildung 4.107 zeigen gängige Ausführungsvarianten für Deckenauskragungen. Einmal als gedämmte und einmal als ungedämmte Variante mit sichtbarer Deckenunterkante.



*Abbildung 4.106: Deckenauskragung gedämmt*



*Abbildung 4.107: Deckenauskragung ungedämmt*

## 4-12.2 UNTERSUCHTE DECKENAUSKRAGUNGEN

### 4-12.2.1 Deckenauskragung Standardvariante

Deckenauskragungen können genutzt werden, um die Innenraumfläche zu erweitern ohne dabei die bebaute Grundfläche gleichzeitig zu vergrößern. Des Weiteren kann der unter der Auskragung liegende Bereich beispielsweise als Laubengang dienen. Auch können Deckenauskragungen eine architektonische Bereicherung darstellen. Die in Abbildung 4.108 dargestellte Deckenauskragung stellt für den vorliegenden Bericht die Referenzlösung dar. Dabei wurde eine Auskragung der Decke von 80 cm gewählt. Der auskragende Teil ist an der Unterseite durch 16 cm Mineralwolle gedämmt und mittels einer diffusionsoffenen Folie konvektionsdicht eingehüllt. Der Fußboden entspricht einem herkömmlichen Aufbau mit gebundener Schüttung, Trittschalldämmung und Estrich. Alternativ dazu kann der Fußboden auch anstatt eines Estrichs mit Polsterhölzern und dazwischen liegenden Holzwoleleichtbauplatten mit darüber liegendem Blindboden ausgeführt werden. Beide Außenwände bestehen aus einer hinterlüfteten Fassade und 13 cm Mineralwolle. An der Innenseite befindet sich eine Vorsatzschale mit dazwischen liegender Mineralwolle.

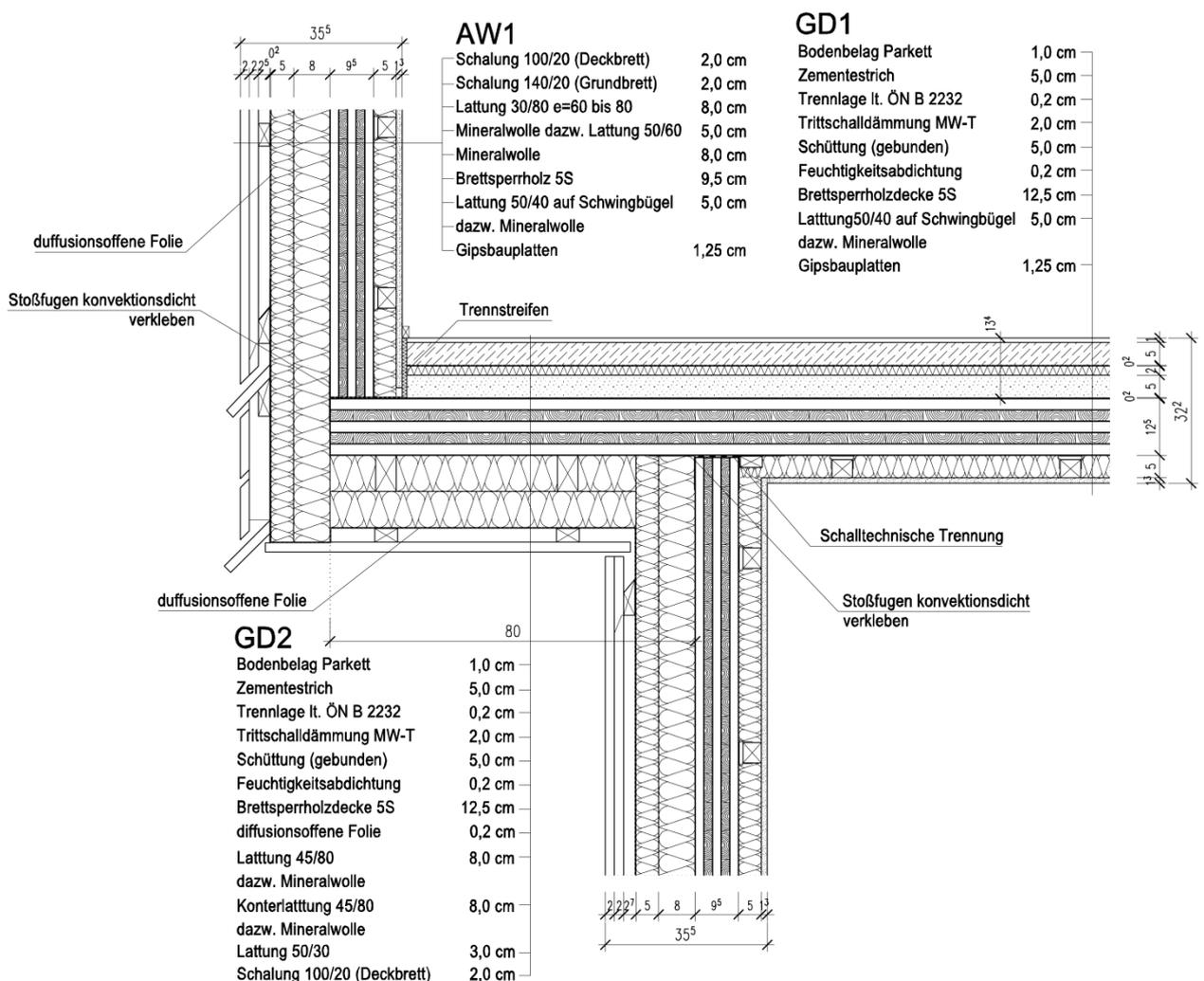


Abbildung 4.108: Deckenauskragung Standardvariante

### 4-12.2.2 Bauteilaufbauten

In den folgenden Tabellen sind die jeweiligen Aufbauten mit ihren entsprechenden bauphysikalischen Materialeigenschaften aufgelistet.

*Tab.: 33: Aufbau Außenwand AW1*

Außenwand AW 1									
Nr.	Material	d	$\rho$	$m = d \cdot \rho$	$\lambda$	R	$\mu$	Sd	c
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[W/(mK)]	[(m <sup>2</sup> K)/W]	[-]	[m]	[J/(kgK)]
	Innen								
1	Gipsfaserplatte	1,25	850	1065,05	0,2	0,06	8,3	0,10	850
2	Mineralwolle	5,00	60	300,00	0,04	1,25	1,3	0,07	850
3	Brettsperrholz	9,00	410	3690,00	0,10	0,75	300/60	27	1300
4	Mineralwolle	7,50	60	450,00	0,04	1,88	1,3	0,10	850
5	Mineralwolle	5,00	60	300,00	0,04	1,25	1,3	0,07	850
6	diffusionsoffene Folie	0,07	343	24,01	0,22	0,00	28,5	0,02	1260
7	Holz Fichte Lattung	2,50	500	1250,00	0,14	0,18	40	1,00	1600
8	Hinterlüftung	2,00	1,23	2,46	0,16	0,13	1	0,02	1008
9	Außenwandverkleidung	2,00	500	1000,00	0,14	0,14	40	0,80	1600
	Außen								

*Tab.: 34: Aufbau Geschoßdecke GD1*

Decke GD1									
Nr.	Material	d	$\rho$	$m = d \cdot \rho$	$\lambda$	R	$\mu$	Sd	c
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[W/(mK)]	[(m <sup>2</sup> K)/W]	[-]	[m]	[J/(kgK)]
	Innen								
1	Parkett	2,00	740	1480,00	0,16	0,13	0	0,00	1600
2	Zementestrich	5,00	2100	10500,00	1,60	0,03	15	0,75	850
3	Trennlage PE-Membran	0,20	410	82,00	0,33	0,01	35000	70,00	1260
4	Trittschaldämmung	2,00	60	120,00	0,04	0,50	1	0,02	1450
5	Schüttung gebunden	5,00	350	1750,00	0,70	0,07	7	0,35	1000
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,20	1100	220,00	0,23	0,01	102000	204,00	1260
7	Brettsperrholzdecke 5S	12,50	410	5125,00	0,12	1,04	300/60	37,50	1300
8	Mineralwolle	5,00	60	300,00	0,04	1,25	1,3	15,00	850
9	Gipsfaserplatte	1,25	850	1062,50	0,20	0,06	8,3	0,10	850
	Aussen								

**Tab.: 35: Aufbau Geschoßdecke GD2**

Decke GD2									
Nr.	Material	d	$\rho$	$m = d * \rho$	$\lambda$	R	$\mu$	Sd	c
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[W/(mK)]	[(m <sup>2</sup> K)/W]	[-]	[m]	[J/(kgK)]
	Innen								
1	Parkett	2,00	740	1480,00	0,16	0,13	0	0,00	1600
2	Zementestrich	5,00	2100	10500,00	1,60	0,03	15	0,75	850
3	Trennlage PE-Membran	0,20	410	82,00	0,33	0,01	35000	70,00	1260
4	Trittschalldämmung	2,00	60	120,00	0,04	0,50	1	0,02	1450
5	Schüttung gebunden	5,00	350	1750,00	0,70	0,07	7	0,35	1000
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,20	1100	220,00	0,23	0,01	102000	204,00	1260
7	Brettsperrholzdecke 5S	12,50	410	5125,00	0,12	1,04	300/60	37,50	1300
8	Mineralwolle	8,00	60	480,00	0,04	2,00	1,3	24,00	850
9	Mineralwolle	8,00	60	480,00	0,04	2,00	1,3	0,10	850
10	diffusionsoffene Folie	0,07	343	24,01	0,22	0,00	28,5	0,02	1260
11	Lattung Fichte 50/30	3,00	500	1500,00	0,12	0,25	40	1,20	1600
12	Schalung 100/20	2,00	500	1000,00	0,12	0,17	40	0,80	1600
	Aussen								

### 4-12.3 DECKENAUSKRAGUNG MIT UNGEDÄMMTER UNTERSEITE

Ausgehend von der in Kapitel 4-12.2.1 gezeigten Referenzvariante ist in Abbildung 4.109 eine davon abgeleitete Variante mit ungedämmter Unterseite dargestellt. Oftmals wird bei Deckenauskragungen, aus ästhetischen Gründen, eine Unterseite mit sichtbarem Brettsperrholz verlangt. Klarerweise muss in so einem Fall die Dämmebene an der Außenseite entfallen. Aus bauphysikalischer Sicht kann eine solche Ausführung, wie anschließend noch gezeigt werden wird, als suboptimal bezeichnet werden, da die dämmende Schicht nun auf die Innenseite verlegt werden muss. Dies kann einerseits durch den Austausch der gebundenen Schüttung durch eine wärmedämmende Schüttung erfolgen und andererseits durch die Erhöhung der Trittschalldämmung. Beides birgt jedoch die Nachteile einer Innendämmung mit sich, da nun das tragende Brettsperrholzelement auf der kühlen Seite liegt und dadurch das Kondensatrisiko an der Feuchtigkeitsabdichtung bzw. an der Grenze zur Schüttung gefördert wird. Ein weiteres Problem könnte bei starken Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen durch das Aufklaffen der Fugen entstehen.

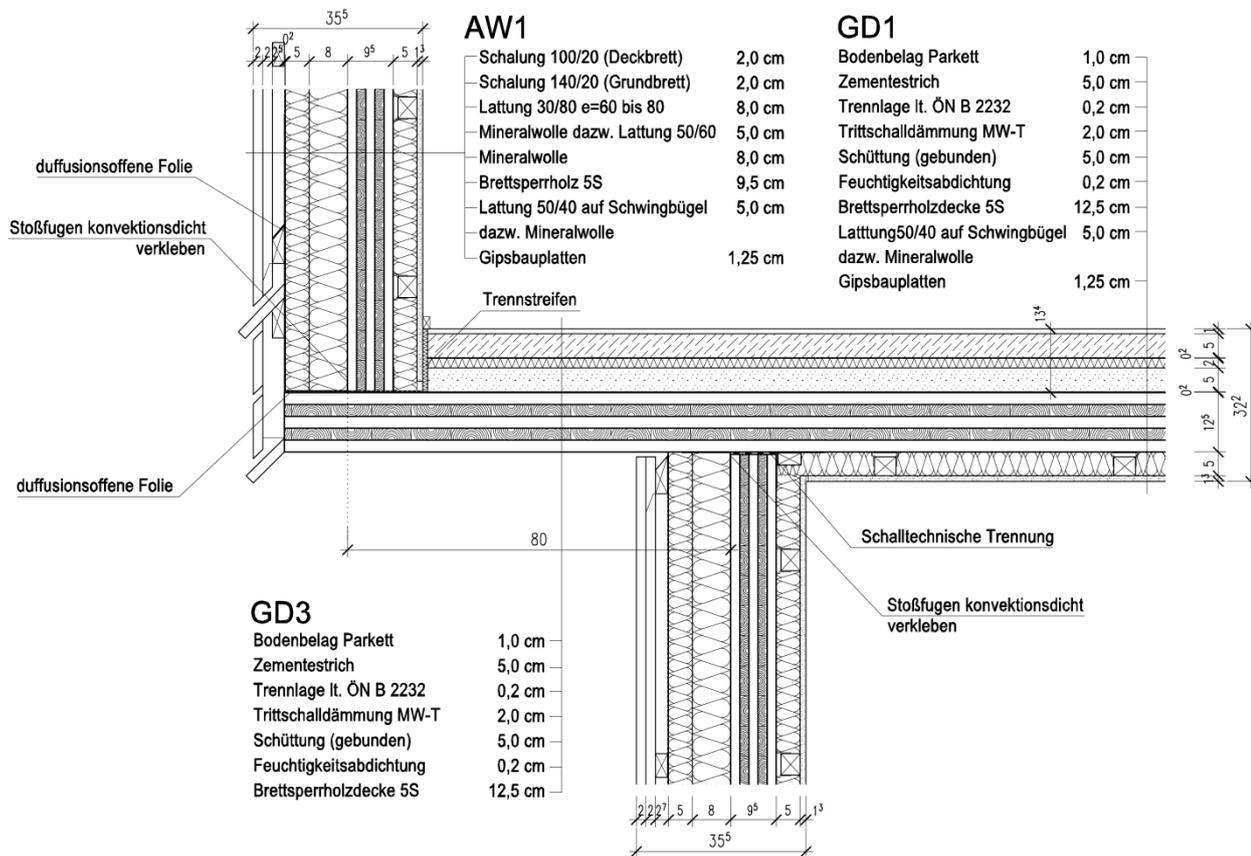


Abbildung 4.109: Deckenauskragung mit ungedämmter Unterseite

### 4-12.3.1 Bauteilaufbau

Da sich die Deckenauskrugung mit BSP-Sichtfläche nur durch den Bauteilaufbau der Decke unterscheidet, wird im Folgenden auch nur der Bauteilaufbau der Deckenauskrugung GD3 angegeben.

*Tab.: 36: Aufbau Geschoßdecke GD3*

Decke GD3									
Nr.	Material	d [cm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m = d * \rho$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	R [(m <sup>2</sup> K)/W]	$\mu$ [-]	Sd [m]	c [J/(kgK)]
	Innen								
1	Parkett	2,00	740	1480,00	0,16	0,13	0	0,00	1600
2	Zementestrich	5,00	2100	10500,00	1,60	0,03	15	0,75	850
3	Trennlage PE-Membran	0,20	410	82,00	0,33	0,01	35000	70,00	1260
4	Trittschalldämmung	2,00	60	120,00	0,04	0,50	1	0,02	1450
5	Schüttung gebunden	5,00	350	1750,00	0,70	0,07	7	0,35	1000
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,20	1100	220,00	0,23	0,01	102000	204,00	1260
7	Brettsperrholzdecke 5S	12,50	410	5125,00	0,12	1,04	300/60	37,50	1300
	Aussen								

## 4-12.4 DECKENAUSKRAGUNG MIT DARÜBER LIEGENDEM NASSRAUM

In Abbildung 4.110 ist eine Variante der Deckenauskragung als Nassraum dargestellt. Da die Funktionstüchtigkeit des Fußbodens dauerhaft gewährleistet werden muss, wird hier über dem Estrich eine vollflächige Feuchtigkeitsabdichtung hergestellt. Dies verhindert unzulässige Feuchtebeanspruchungen der Plattenwerkstoffe und den dadurch resultierenden Tragfähigkeitsabfall. Außerdem müssen Aufwölbungen der Fußbodenoberfläche verhindert werden, welche eine Schädigung des Fliesenbelages und folglich einen Feuchtigkeitseintrag im Unterboden zur Folge hätte. Fußböden mit Fliesenbelag müssen daher nicht nur eine vollflächige Abdichtung und einen dichten Fliesenbelag aufweisen, sondern auch eine dauerhaft wasserundurchlässige Verfugung. Um die Empfindlichkeit von Fliesenbelägen möglichst gering zu halten, sollten die Fliesenformate möglichst klein gehalten werden und ein elastischer Fliesenkleber verwendet werden. Da Wände in Feuchtezellen oft nur im Bereich der Spritzwasserzonen verfliesen werden, kommt es nicht selten vor, dass bei Wänden und Decken Sicht-BSP verwendet wird. Aufgrund der höheren Temperaturen und relativen Luftfeuchte, wird in Nassräumen das Brettsper Holz besonders beansprucht. Feuchtebereiche sollten allgemein so aufgebaut werden, dass kleinere Mengen an Feuchtigkeit schnell wieder austrocknen können und größere Mengen schnell sichtbar werden. Des Weiteren sollten in Nassräumen Dämmstoffe mit geringen feuchtespeichernden Eigenschaften verwendet werden.

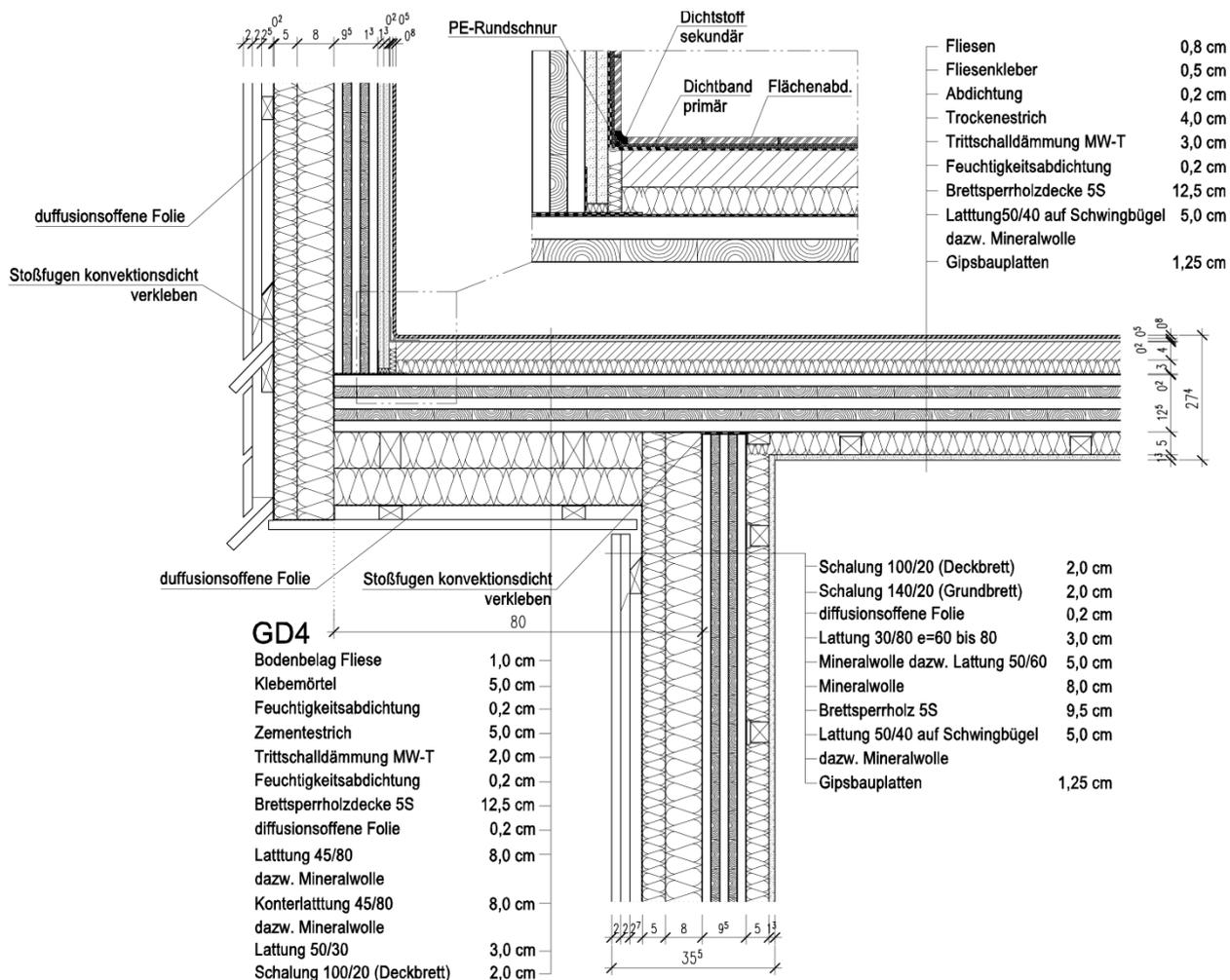


Abbildung 4.110: Deckenauskragung mit Ausführung als Nassraum

### 4-12.4.1 Bauteilaufbau

Da sich die Deckenauskragung mit BSP-Sichtfläche lediglich durch den Bauteilaufbau der Decke unterscheidet, wird im Folgenden nur der Bauteilaufbau der Deckenauskragung GD4 angegeben.

*Tab.: 37: Aufbau Geschoßdecke GD4*

Decke GD4									
Nr.	Material	d	ρ	m = d * ρ	λ	R	μ	Sd	c
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[W/(mK)]	[(m <sup>2</sup> K)/W]	[-]	[m]	[J/(kgK)]
	Innen								
1	Fliese	0,75	2300	1725,00	1,30	0,01	1000000	7500,00	840
2	Klebemörtel	0,50	1500	750,00	0,60	0,01	1	0,01	0
3	Feuchtigkeitsabdichtung	0,20	1100	220,00	0,23	0,01	102000	204,00	1260
4	Trockenestrich	4,00	2450	9800,00	2,10	0,02	4	0,16	1600
5	Trittschalldämmung	3,00	350	1050,00	0,70	0,04	7	0,21	1000
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,20	1100	220,00	0,23	0,01	102000	204,00	1260
7	Brettsperrholzdecke 5S	12,50	410	5125,00	0,12	1,04	300/60	37,50	1300
8	Mineralwolle	8,00	60	480,00	0,04	2,00	1,3	24,00	850
9	Mineralwolle	8,00	60	480,00	0,04	2,00	1,3	0,10	850
10	diffusionsoffene Folie	0,07	343	24,01	0,22	0,00	28,5	0,02	1260
11	Lattung Fichte 50/30	3,00	500	1500,00	0,12	0,25	40	1,20	1600
12	Schalung 100/20	2,00	500	1000,00	0,12	0,17	40	0,80	1600
	Aussen								

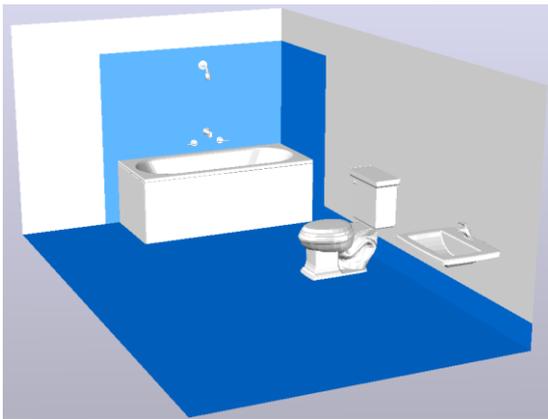
### 4-12.5 NASSRÄUME

Unter Nassräumen werden im Allgemeinen Nassbereiche verstanden die von trockenen Räumen (z. B. Aufenthaltsräume) umgeben sind. Bedingt durch die dementsprechende Nutzung sind Nassräume zeitweise erhöhter Feuchtigkeit und Spritzwasserbelastungen ausgesetzt. Typische Anwendungsbereiche für Nassräume (auch Feuchträume genannt) sind:

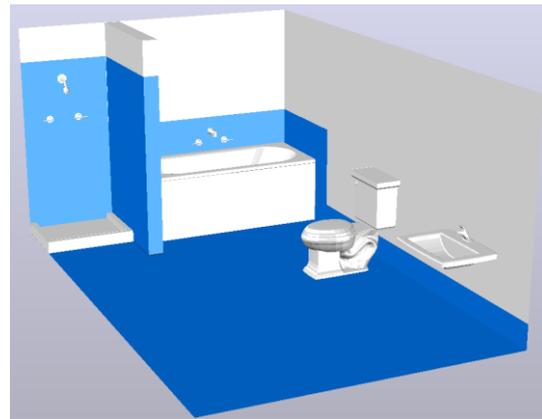
- Bäder, Toiletten und Küchen (im Wohnbereich)
- öffentliche Toiletten und Duschen (Sportstätten)
- Labors und Arztpraxen
- Wäschereien
- Großküchen
- Schwimmbäder

Die Beanspruchung kann je nach Anwendungsbereich verschieden hoch ausfallen. So kann man unmittelbar durch Spritzwasser beanspruchte Fußboden- und Wandaufbauten im Wohnbereich zu den eher mäßig beanspruchten Bereichen zählen, während beispielsweise Flachdächer, Schwimmbäder oder auch befahrene Flächen stark beanspruchte Bereiche repräsentieren.

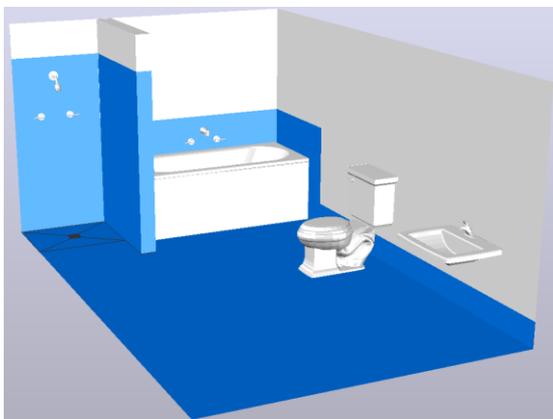
Da sich der vorliegende Bericht ausschließlich mit dem hygrothermischen Verhalten von Brettsperrholz im Wohnbau befasst, wurden auch nur die für den Wohnbau relevanten Bereiche untersucht. In den folgenden Abbildungen werden die grundsätzlichen Anwendungsbereiche aufgezeigt.



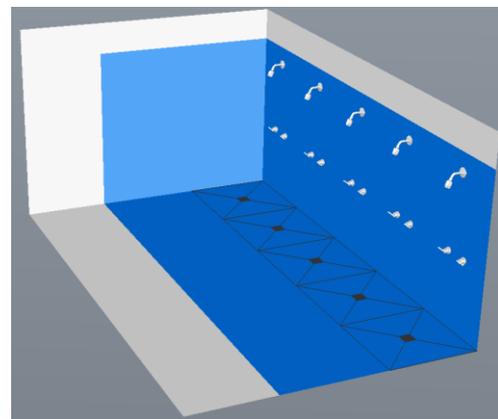
*Abbildung 4.111: Bad mit Badewanne als Dusche*



*Abbildung 4.112: Bad mit Wanne und Dusche (Duschtasse)*



*Abbildung 4.113: Bad mit Wanne und Dusche (Bodenablauf)*



*Abbildung 4.114: Beispiel für eine hohe Beanspr.*

In Abbildung 4.111 ist ein häusliches Badezimmer mit Badewanne dargestellt, wobei diese auch gleichzeitig eine DusCHFunktion hat. Dadurch vergrößert sich die Spritzwasserzone im Bereich der Badewanne und reicht somit über den Duschkopf hinaus. In Abbildung 4.112 und Abbildung 4.113 ist ein Badezimmer mit getrennter Dusche zu sehen, weswegen sich hier die Spritzwasserzone über der Badewanne verkleinert. Die Duschen können entweder mit Duschtasse oder auch barrierefrei mit einem planmäßig genutzten Bodenablauf ausgeführt werden. Der Vollständigkeit halber sei noch in Abbildung 4.114 ein Duschbereich mit erhöhter Spritzwasserbelastung dargestellt, wie sie beispielsweise in Sportstätten vorkommen. Die folgende Tabelle zeigt die Klassifizierung der Feuchtigkeitsbeanspruchungen nach ÖNORM B 3692:2014.

**Tab.: 38: Feuchtigkeitsbeanspruchung (8)**

Beanspruchungsklasse	Anwendungsbereiche (Beispiele)	Untergründe	Entwässerung	Abdichtung
<b>W1 sehr geringe Belastung</b> Flächen mit nicht häufigem, kurzzeitigem Einwirken durch Wischwasser	Wohnbereich: Wohnräume, Gangbereiche, WC's, Büros u. dgl.	feuchtigkeitsempfindliche <sup>a</sup> und feuchtigkeitsunempfindliche <sup>b</sup>	keine Abläufe erforderlich	keine besonderen Maßnahmen erforderlich
<b>W2 geringe Wasserbelastung</b> Flächen mit nicht häufigem, kurzzeitigem Einwirken durch Wisch-, Spritz- und Brauchwasser	Betriebsbereich: WC Anlagen, Wohnbereich: Küchen bzw. Räume mit ähnlicher Nutzung			Bei Fliesen-/keramischen Belägen: Ausführung gemäß ÖNORM B 3407 <sup>c</sup>
<b>W3 mäßige Wasserbelastung</b> Flächen mit häufigem, kurzzeitigem Einwirken durch Wisch-, Spritz- und Brauchwasser	Wandflächen ohne Ablauf <sup>d</sup> , Bodenflächen ohne Ablauf: z. B. Badezimmer, Duschtassen. Bodenflächen in WC-Anlagen ohne Bodenablauf; Windfang	feuchtigkeitsempfindliche <sup>a</sup> und feuchtigkeitsunempfindliche <sup>b</sup>	keine Abläufe erforderlich	
		feuchtigkeitsempfindliche <sup>a</sup> tragende Bauteile		
<b>W4 hohe Wasserbelastung</b> Flächen mit häufigem, länger anhaltendem Einwirken durch Wisch-, Spritz- und Brauchwasser	Wandflächen mit Ablauf <sup>d</sup> , Bodenflächen mit Ablauf: z. B. Badezimmer, Duschtassen mit niveaugleichen Einbauteilen, Waschküchen. Bodenflächen in WC-Anlagen mit Bodenablauf.	ohne Gefälle in Rohbauebene zulässig, Gefälle in Gehbelageebene erforderlich	Bodenablauf in Gehbelageebene	Abdichtung auf Rohbauebene gemäß vorliegender ÖNORM zuzüglich Verbundabdichtung bei Fliesen-/keramischen Belägen gemäß ÖNORM B3407 c
<b>W5 sehr hohe Wasserbelastung</b> Flächen mit dauerhaft anhaltendem Einwirken durch Wisch-, Spritz-, und Brauchwasser und/oder erhöhter chemischer Einwirkung	Schwimmbeckenumgänge, betrieblich industrielle Produktionsstätten wie z. B. Laboratorien, Lebensmittelverarbeitende Betriebe, Großküchen	Gefälle in Rohbauebene und Gefälle in Gehbelageebene erforderlich	Bodenablauf in Rohbauebene und Gehbelageebene erforderlich	
<b>W6 Außenbereich</b> Flächen im Außenbereich	Balkone, Terrassen, Loggien, Stiegen, offene Laubengänge	Abdichtung gemäß ÖNORM B 3691 zuzüglich Verbundabdichtung bei Fliesen-/keramischen Belägen gemäß ÖNORM B 3407 <sup>c</sup>		

<sup>a</sup> feuchtigkeitsempfindliche Untergründe wie z. B. Gipswerkstoffe, Calciumsulfatestriche, Holzwerkstoffe  
<sup>b</sup> weitgehend feuchtigkeitsunempfindliche Untergründe wie z. B. Beton, zementbasierende Putze, zementgebundene mineralische Bauplatten  
<sup>c</sup> gilt für keramische Beläge; bei anderen Belägen sind zumindest gleichwertige Maßnahmen zu planen und auszuführen  
<sup>d</sup> Betrifft bodenebene Abläufe in Wandflächen, nicht betroffen sind geschlossene Abläufe wie z. B. Waschmaschinenabfluss, Waschbeckenabfluss.

In Tabelle 39 sind die Mindestqualitäten für die Abdichtung von Feuchträumen nach ÖNORM B 3692:2014 dargestellt. Tabelle 40 zeigt alle erforderlichen Inspektions-, Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen, wobei im Zuge der Instandhaltung, Materialien oder Bauteile mit kurzer Nutzungsdauer notfalls zu erneuern sind.

**Tab. 39: Feuchtraumabdichtungen (8)**

Materialien	W1	W2	W3	W4/W5
	Mindestanzahl der Lagen und Mindestdicke			
Bitumenbahn gemäß ÖNORM B 3665	-	-	1 Lage, 4 mm	2 Lagen, 8 mm
Kunststoff-Abdichtungsbahnen gemäß ÖNORM	-	-	1,2 mm	1,5 mm
KMB gemäß ÖNORM EN 15814	-	-	4 mm	6 mm
Flüssigkunststoffe in Anlehnung an ETAG 005	-	-	1,8 mm	2,1 mm

Bei Verwendung von Bitumen-Kalkselbstklebebahnen darf die Nenndicke um 1 mm reduziert werden. Diese ist thermisch entsprechend den Herstellervorschriften zu aktivieren.

**Tab. 40: Inspektion, Wartung und Instandhaltung (8)**

Aufgabe	Maßnahme	Intervall
<b>Inspektion</b>	<p><b>Maßnahmen zur Festlegung des Istzustandes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zerstörungsfreie Aufnahme des Zustandes der Bauwerksabdichtung (über Terrain) der An- und Abschlüsse sowie der Durchdringungen.</li> </ul> <p>Die Ergebnisse der Inspektion sind die Basis für die Festlegung eventuell erforderlicher Wartungs-, Instandhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahmen.</p>	Jährlich
<b>Wartung</b>	<p><b>Maßnahmen zur Bewahrung des Sollzustandes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reinigen und spülen von Kontrollschächten, Dränlagen samt Dränleitungen und Bodeneinläufe;</li> <li>- Ablaufstellen wie Bodeneinläufe (Gullies), besonders bei Kellerabgängen, in Lichtschächten (Rost abnehmen, Schmutzfang reinigen und spülen);</li> <li>- Entwässerungsschächte, die von Laub und Schmutz zu befreien sind, sowie</li> <li>- Kontrolle der Sickerschächte</li> <li>- Kontrolle (zusätzlich zum jährlichen Rundgang) für dauerelastisch gedichtete Fugen (Anschlussfugen, Dehnungsfugen, Bauwerksfugen und dgl.;</li> <li>- Sockelbereich auf Risse und Feuchteschäden</li> <li>- Auswertung der Ergebnisse von Feuchtemonitoringsystemen</li> </ul>	Jährlich und zusätzlich nach Sturm, Unwetter und längeren Regenperioden
<b>Instandhaltung</b>	<p><b>Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustandes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) kleinere Instandhaltungsarbeiten, z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>- erneutes Absichern von Wandanschlussprofilen und Kittfugen,</li> <li>- Schutzanstriche auf korrosionsgefährdeten Metallteilen.</li> </ul> </li> <li>b) größere Instandsetzungsarbeiten, nach eingehender Untersuchung gegebenenfalls mit Freilegungsarbeiten festzulegen, z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausbessern größerer Schadstellen in der Abdichtung,</li> <li>- Ausbessern der Dränlagen u. dgl.</li> </ul> </li> </ul>	Je nach Inspektions- und Wartungsergebnis

## 4-13 BAUPHYSIKALISCHE BERECHNUNGEN UND SIMULATIONEN

In diesem Kapitel werden alle Bauteilaufbauten getrennt voneinander, und anschließend auch als zusammenhängendes Bauteil bauphysikalisch untersucht. Die getrennte Untersuchung erfolgt mittels einer U-Wert-Berechnung und dem Verfahren nach Glaser. Das gesamte Bauteil wird einerseits nach einem zweidimensionalen Glaserverfahren analysiert und andererseits einer instationären Berechnung über fünf Jahre unterzogen.

### 4-13.1 STATIONÄRE BERECHNUNGEN

#### 4-13.1.1 Randbedingungen für Wohnräume

Für das Innenklima wurde den stationären Berechnungen das Norminnenklima zugrunde gelegt. Im Innenraum beträgt die Temperatur  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$  bei einer relativen Feuchtigkeit von  $\varphi = 50\%$  für die Berechnung von Kondensatbildung und  $\varphi = 80\%$  für das Risiko von Schimmelpilzbildung. Der Keller wurde als konditionierter Raum mit denselben Randbedingungen berücksichtigt.

Für ein generelles Projekt in Österreich müssen laut ÖNORM B 8110-2:2003 die Klimadaten für die Regression SB (Beckenlandschaft im Süden) herangezogen werden. Der ungünstigste Wert fällt dabei auf die Landeshauptstadt Klagenfurt mit einer Außentemperatur von  $\theta_e = -12,8^\circ\text{C}$  bei  $\varphi = 80\%$  relativer Luftfeuchte. Die Werte der Wärmeübergangswiderstände können Tabelle 6 entnommen werden, wobei für einen eventuellen Kellerbereich aufgrund schlechterer Lüftungsverhältnisse ein Wärmeübergangswiderstand von  $0,25 \text{ [m}^2\text{k/W]}$  gewählt werden sollte.

#### 4-13.2 RANDBEDINGUNGEN FÜR NASSRÄUME

Tab. 41: Aufbau Sockelwand AW3

$R_{Se}$ und $R_{Si}$	Richtung des Wärmestromes		
	horizontal	aufwärts	abwärts
$R_{Si} \text{ [m}^2\text{K/W]} (h_i \text{ [W/m}^2\text{K]})$	0,13 (7,69)	0,10 (10,0)	0,17 (5,88)
$R_{Se} \text{ [m}^2\text{K/W]} (h_e \text{ [W/m}^2\text{K]})$	0,04 (25,0)	0,04 (25,0)	0,04 (25,0)

Für Nassräume sollte grundsätzlich eine höhere Temperatur und eine erhöhte relative Luftfeuchtigkeit angesetzt werden als bei Wohnräumen. In Sanitär- bzw. Feuchträumen kann die relative Luftfeuchte zwischen 65% und 100 % Prozent liegen. Für die Untersuchungen wurde deshalb ein Mittelwert von rund  $\varphi = 80\%$  bei einer Temperatur von  $23^\circ\text{C}$  festgelegt. Die Übergangswiderstände blieben dabei unverändert und sind Tabelle 6 zu entnehmen.

In Abbildung 4.116 und Abbildung 4.115 sind die verwendeten Randbedingungen für die Standardvariante und die Deckenauskragung mit darüber liegendem Nassraum dargestellt. Für die Deckenauskragung mit ungedämmter Unterseite gelten dieselben Randbedingungen wie für die Standardvariante.

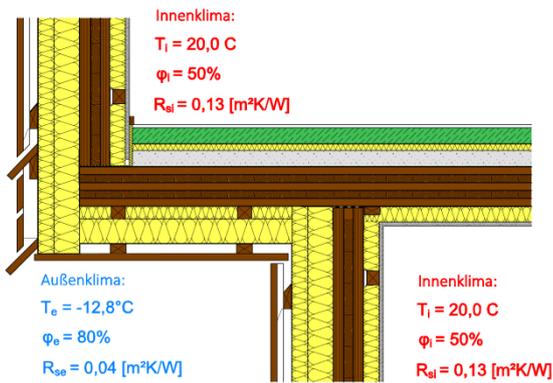


Abbildung 4.116: Standardvariante

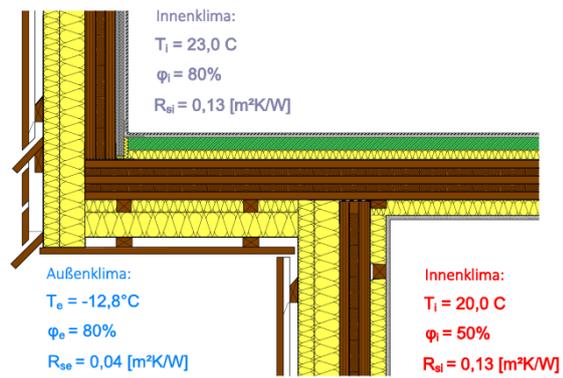


Abbildung 4.115: Nassraum

## 1.1.1 GEOMETRISCHE RANDBEDINGUNGEN

Wie bereits in Kapitel 4-5.3.2 beschrieben, sind für zweidimensionale Simulationen entsprechende Schnittebenen festzulegen, um jegliche Differenzen der Berechnungsergebnisse zwischen dem unterteilten Gebäude zu vermeiden. Die Mindestmaße sind in ÖNORM EN ISO 10211 geregelt und in den nachfolgenden Abbildungen für die untersuchten Deckenauskragungen dargestellt.

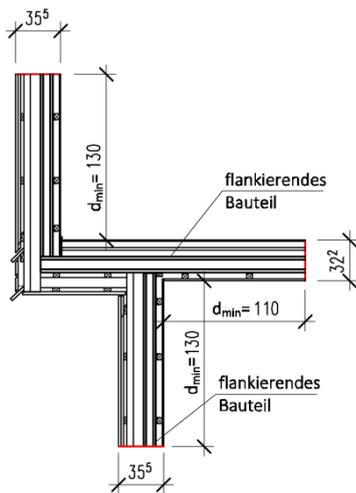


Abbildung 4.119: Standardvariante

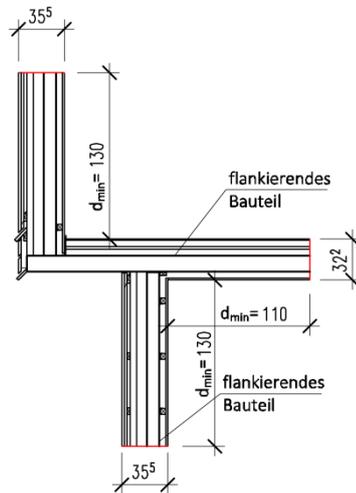


Abbildung 4.118: außen ungedämmt

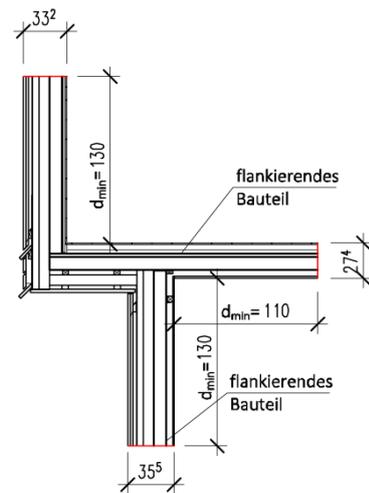


Abbildung 4.117: Nassraum

Auf sämtliche Randbedingungen und Eingabeparameter wie Außenklima, Innenklima, Schlagregen, Stoffkennwerte, Anfangsbedingungen und Zeitschritte wird in weiterer Folge nicht mehr eingegangen, da diese jenen aus Kapitel 4-5.3 entsprechen.

## 1.1.2 BERECHNUNG DER U-WERTE

### 1.1.2.1 Außenwand AW1

Tab.: 42: U-Wert Außenwand AW1

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu \cdot d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m <sup>2</sup> K)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,13		19,2	2224
1	Gipsfaserplatte	0,013	10,0	0,125	0,320	0,039	25,600	19,0	2191
2	Steinwolle	0,050	1,0	0,05	0,040	1,250	0,800	11,3	1337
3	Brettsperrholz	0,090	70,0	6,3	0,120	0,750	1,333	6,7	980
4	Steinwolle	0,075	1,0	0,075	0,040	1,875	0,533	-4,8	407
5	Steinwolle	0,050	1,0	0,05	0,040	1,250	0,800	-12,5	207
6	Diffusionsoffene Folie	0,002	28,5	0,057	0,230	0,009	115,000	-12,6	206
	Wärmeübergang außen					0,04		-12,8	202
				$\sum Sd =$	6,657	RT =	5,343		
						1/RT =	0,187		

Der Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwand AW1 ergibt sich demnach zu ungefähr **0,19 [W/m<sup>2</sup>K]**. Laut OIB-Richtlinie 6 wird für Wände gegen Außenluft ein U-Wert von mindestens 0,35 [W/m<sup>2</sup>K] gefordert. Aus wärmeschutztechnischer Sicht stellt dieser Aufbau also eine sehr gute Lösung dar.

### 1.1.2.2 Geschossdecke GD1

Tab.: 43: U-Wert Geschossdecke GD1

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu \cdot d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m <sup>2</sup> K)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,13		20,0	2337
1	Parkett	0,020	0,0	0,0	0,160	0,125	8,000	20,0	2337
2	Zementestrich	0,050	15,0	0,8	1,600	0,031	32,000	20,0	2337
3	Trennlage PE-Membran	0,002	35000,0	70,0	0,330	0,006	165,000	20,0	2337
4	Trittschalldämmung	0,020	1,0	0,0	0,040	0,500	2,000	20,0	2337
5	Schüttung gebunden	0,050	7,0	0,4	0,700	0,071	14,000	20,0	2337
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,002	102000,0	204,0	0,230	0,009	115,000	20,0	2337
7	Brettsperrholz 5S	0,125	70,0	8,8	0,120	1,042	0,960	20,0	2337
8	Mineralwolle	0,050	1,3	0,1	0,040	1,250	0,800	20,0	2337
9	Gipsfaserplatte	0,013	8,3	0,1	0,200	0,063	16,000	20,0	2337
	Wärmeübergang außen					0,04		20	2337
				$\sum Sd =$	284,039	RT =	3,267		
						1/RT =	0,306		

Der U-Wert der Geschossdecke GD1 beträgt **0,30 [W/m<sup>2</sup>K]**. Allerdings werden nach OIB für Geschossdecken innerhalb von Wohn- und Betriebseinheiten keine Anforderungen an den Wärmeschutz gestellt. Trotzdem stellt dieser Aufbau einen guten Wärmeschutz dar, wenn man bedenkt, dass für Decken gegen unbeheizte Räume ein U-Wert von 0,4 [W/m<sup>2</sup>K] gefordert wird.

### 1.1.2.3 Geschossdecke GD2 (auskragende Decke)

Tab.: 44: U-Wert Geschossdecke GD2

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu * d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m*k)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,13		19,4	2250
1	Parkett	0,020	0,0	0	0,160	0,125	8,000	18,8	2169
2	Zementestrich	0,050	15,0	0,75	1,600	0,031	32,000	18,7	2149
3	Trennlage PE-Membran	0,002	35000,0	70	0,330	0,006	165,000	18,6	2145
4	Trittschalldämmung	0,020	1,0	0,02	0,040	0,500	2,000	16,3	1849
5	Schüttung gebunden	0,050	7,0	0,35	0,700	0,071	14,000	15,9	1810
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,002	102000,0	204	0,230	0,009	115,000	15,9	1805
7	Brettsperrholz 5S	0,125	70,0	8,75	0,120	1,042	0,960	11,0	1311
8	Mineralwolle	0,080	1,3	0,104	0,040	2,000	0,500	1,6	684
9	Mineralwolle	0,080	1,3	0,104	0,040	2,000	0,500	-7,8	314
10	diffusionsoffene Folie	0,001	28,5	0,01995	0,220	0,003	314,286	-7,9	313
11	Lattung Fichte 50/30	0,030	40,0	1,2	0,120	0,250	4,000	-9,0	283
12	Schalung 100/20	0,020	40,0	0,8	0,120	0,167	6,000	-9,8	264
	Wärmeübergang außen					0,04		-12,8	202
				$\sum Sd =$	RT =	6,374			
					1/RT =	0,157			

Für den auskragenden Deckenteil GD2 errechnet sich der U-Wert zu ca. **0,16 [W/m<sup>2</sup>K]**. Laut OIB wird für Decken gegen Außenluft ein Wärmedurchgangskoeffizient von mindestens 0,20 [W/m<sup>2</sup>K] verlangt. Die Geschossdecke GD2 verfügt dementsprechend über einen ausreichenden Wärmeschutz.

### 1.1.2.4 Geschossdecke GD3 (auskragende Decke ohne Dämmung)

Tab.: 45: U-Wert Geschossdecke GD3

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu * d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m*k)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,17		17,4	1983
1	Parkett	0,020	0,0	0	0,160	0,125	8,000	15,4	1754
2	Zementestrich	0,050	15,0	0,75	1,600	0,031	32,000	15,0	1700
3	Trennlage PE-Membran	0,002	35000,0	70	0,330	0,006	165,000	14,9	1690
4	Trittschalldämmung	0,020	1,0	0,02	0,040	0,500	2,000	7,1	1012
5	Schüttung gebunden	0,050	7,0	0,35	0,700	0,071	14,000	6,0	938
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,002	102000,0	204	0,230	0,009	115,000	5,9	929
7	Brettsperrholz 5S	0,125	70,0	8,75	0,120	1,042	0,960	-10,2	255
	Wärmeübergang außen					0,17		-12,8	202
				$\sum Sd =$	RT =	2,124			
					1/RT =	0,471			

Durch den Wegfall der äußeren Dämmung steigt klarerweise der U-Wert auf **0,47 [W/m<sup>2</sup>K]** stark an und ein ausreichender Wert ist nicht mehr gegeben. Wenn nun eine sichtbare BSP-Decke gefordert wird, gibt es zwei Möglichkeiten um den geforderten U-Wert von 0,2 [W/m<sup>2</sup>K] zu erreichen. Die erste Möglichkeit bestünde darin, die Dicke der Brettsperrholzdecke zu erhöhen. Allerdings wäre in diesem Fall eine Stärke von mindestens 47 cm notwendig und somit sehr unwirtschaftlich. Die zweite Möglichkeit wäre die dämmenden Schichten an der Innenseite anzuordnen. Beispielsweise durch die Verwendung von

wärmedämmenden Schüttungen oder auch durch Erhöhung der Trittschalldämmung. Natürlich wäre auch eine Kombination beider Optionen denkbar.

### 1.1.2.5 Geschossdecke GD3 (mit Innendämmung)

Tab.: 46: U-Wert Geschossdecke GD3 (optimiert)

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu \cdot d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m <sup>2</sup> K)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,17		18,9	2182
1	Parkett	0,020	0,0	0	0,160	0,125	8,000	18,1	2074
2	Zementestrich	0,050	15,0	0,75	1,600	0,031	32,000	17,9	2048
3	Trennlage PE-Membran	0,002	35000,0	70	0,330	0,006	165,000	17,8	2043
4	Trittschalldämmung	0,040	1,0	0,04	0,040	1,000	1,000	11,4	1343
5	Lose Schüttung mit Zellulose	0,100	2,0	0,2	0,040	2,500	0,400	-4,9	405
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,002	102000,0	204	0,230	0,009	115,000	-4,9	403
7	Brettsperrholz 5S	0,125	70,0	8,75	0,120	1,042	0,960	-11,7	223
	Wärmeübergang außen					0,17		-12,8	202
				$\Sigma Sd =$	283,740	RT =	5,053		
						1/RT =	0,198		

Durch die Verdoppelung der Trittschalldämmung von einer auf zwei Lagen und die Verwendung einer losen Schüttung mit Zellulose, kann bereits ein ausreichender Wärmeschutz von **0,20 [W/m<sup>2</sup>K]** gewährleistet werden. Jedoch können durch die Anordnung einer Innendämmung auch feuchtetechnische Probleme auftreten, die noch in Kapitel 4-13.4 untersucht werden.

### 1.1.2.6 Geschossdecke GD4 (Nassraum)

Tab.: 47: U-Wert Geschossdecke GD4 (Nassraum)

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu \cdot d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m <sup>2</sup> K)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,13		19,4	2255
1	Fliese	0,008	0,0	0	0,160	0,047	21,333	19,2	2225
2	Klebemörtel	0,005	15,0	0,075	1,600	0,003	320,000	19,2	2224
3	Feuchtigkeitsabdichtung	0,002	35000,0	70	0,330	0,006	165,000	19,2	2220
4	Trockenestrich	0,040	4,0	0,16	0,040	1,000	1,000	14,7	1674
5	Trittschalldämmung	0,030	7,0	0,21	0,700	0,043	23,333	14,5	1653
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,002	102000,0	204	0,230	0,009	115,000	14,5	1649
7	Brettsperrholz 5S	0,125	70,0	8,75	0,120	1,042	0,960	9,9	1215
8	Mineralwolle	0,080	1,3	0,104	0,040	2,000	0,500	1,0	654
9	Mineralwolle	0,080	1,3	0,104	0,040	2,000	0,500	-8,0	311
10	diffusionsoffene Folie	0,001	28,5	0,01995	0,220	0,003	314,286	-8,0	310
11	Lattung Fichte 50/30	0,030	40,0	1,2	0,120	0,250	4,000	-9,1	281
12	Schalung 100/20	0,020	40,0	0,8	0,120	0,167	6,000	-9,8	263
	Wärmeübergang außen					0,04		-12,8	202
				$\Sigma Sd =$	285,423	RT =	6,739		
						1/RT =	0,148		

Durch Verwendung eines Trockenestrichs und einer stärkeren Trittschalldämmung verbessert sich bei GD4 der U-Wert im Vergleich zu GD1 auf **0,15 [W/m<sup>2</sup>K]**.

### 4-13.3 BERECHNUNG NACH GLASER 1D

#### 4-13.3.1 Außenwand AW1

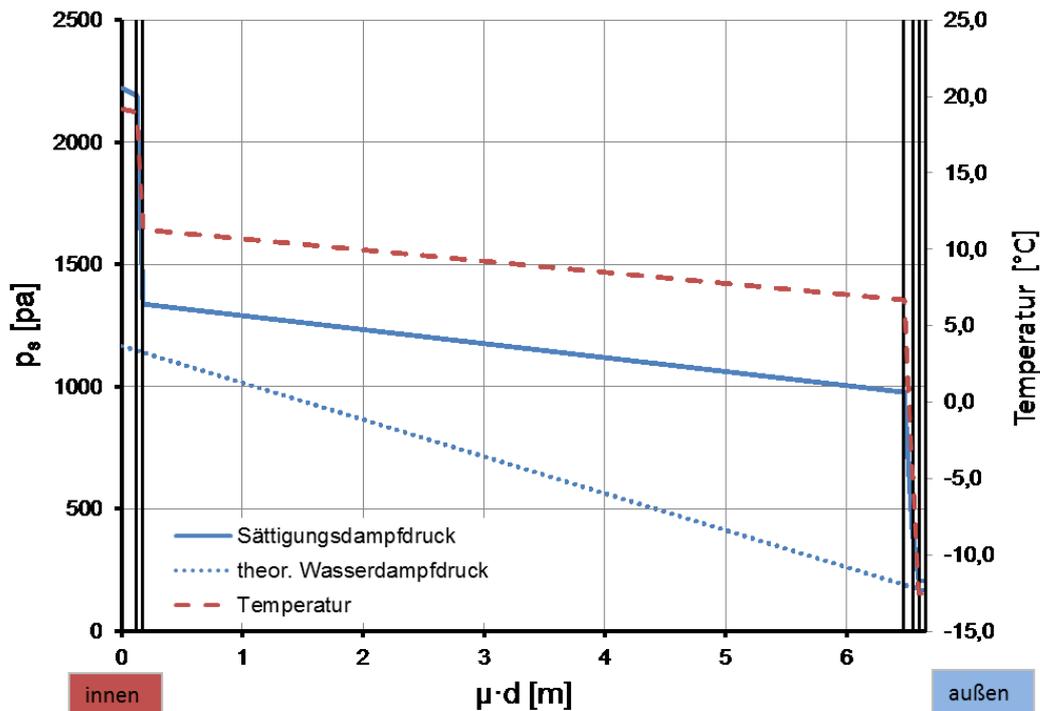


Abbildung 4.120: Verfahren nach Glaser: Außenwand AW1

Abbildung 4.120 lässt erkennen, dass der Verlauf des theoretischen Wasserdampfdruckes nie den Verlauf des Sättigungsdampfdruckes schneidet. Somit entspricht der theoretische Wasserdampfdruck dem tatsächlichen und es besteht keine Gefahr der Kondenswasserbildung. Der größte Wert der Abszisse entspricht dem gesamten  $S_d$ -Wert des Bauteiles welcher mit 6,7 [m] sehr gering ausfällt. Obwohl Brettsper Holz im Vergleich einen höheren Diffusionswiderstand als alle anderen in diesem Bauteil verwendeten Materialien hat, spricht dies trotzdem für eine diffusionsoffene Bauweise.

#### 4-13.3.2 Geschossdecke GD1

Da die Geschossdecke GD1 eine Trenndecke zwischen zwei beheizten Räumen darstellt, wird in diesem Kapitel auf eine Analyse nach dem Glaserverfahren verzichtet. Bei stationären Untersuchungen bleiben die Temperaturen unverändert und daher kann zwischen zwei beheizten Räumen kein Temperatur- bzw. Druckgefälle entstehen. Als Resultat findet hier also weder ein Wärme- noch ein Diffusionsstrom statt.

### 4-13.3.3 Geschossdecke GD2 (auskragende Decke)

Auch bei Geschossdecke GD2 ist nach Glaser keine Kondensation im Inneren des Bauteiles zu erwarten, da der theoretische Wasserdampfdruck stets unter dem Sättigungsdampfdruck liegt. Im Bereich von  $s_d = 0-70$  m ist ein annähernd konstanter Temperaturverlauf zu erkennen. Erst ab der Trittschalldämmung findet ein Temperaturabbau von ca.  $3^\circ\text{C}$  statt. Anschließend verlaufen die Temperatur und der Sättigungsdampfdruck wieder konstant bis zur Brettspertholzdecke. Hier findet wieder ein leichter Sprung auf  $11^\circ\text{C}$  statt. Ab den äußeren Dämmschichten aus Mineralwolle kommt es dann klarerweise zum größten Temperatursprung. Dieser beträgt in jeder Schicht  $9,4^\circ\text{C}$ .

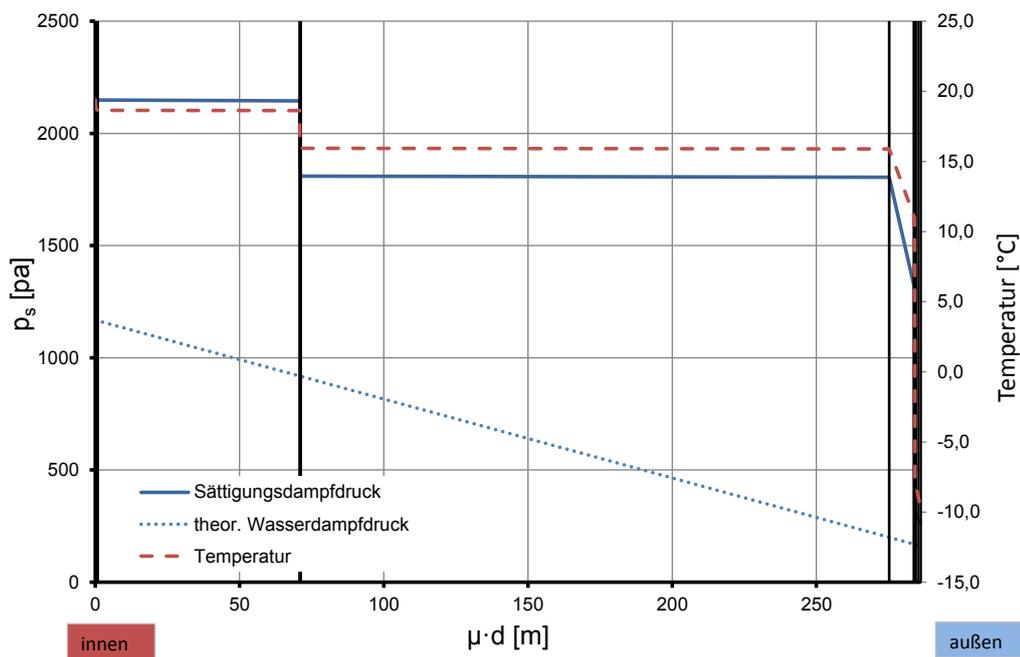


Abbildung 4.121: Verfahren nach Glaser: Geschossdecke GD2

### 4-13.3.4 Geschossdecke GD3 (ungedämmt)

Geschossdecke GD3 zeigt einen qualitativ ähnlichen Verlauf (siehe Abbildung 4.122) im Vergleich zu GD2, allerdings liegen aufgrund der fehlenden Außendämmung die Temperaturen nach der Trittschalldämmung um  $8^\circ\text{C}$  tiefer und der Verlauf des Sättigungsdampfdruckes kommt an dieser Stelle dem theoretischen Wasserdampfdruck sehr nahe. Das Brettspertholz selbst ist dabei Temperaturen von bis zu  $-10,2^\circ\text{C}$  ausgesetzt.

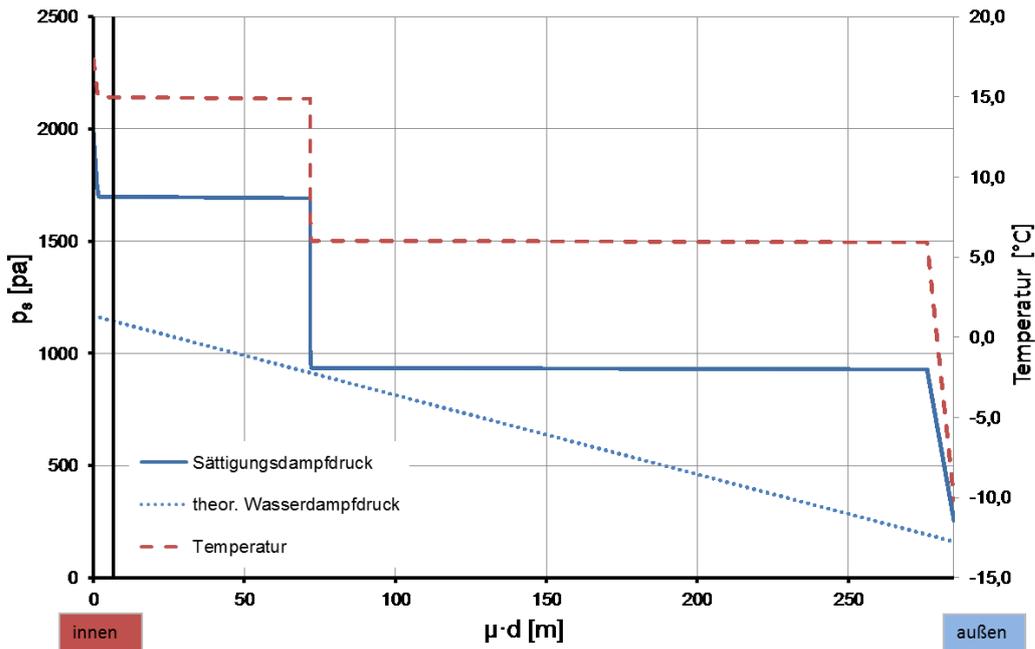


Abbildung 4.122: Verfahren nach Glaser: Geschossdecke GD3 (ungedämmt)

#### 4-13.3.5 Geschossdecke GD3 (mit Innendämmung)

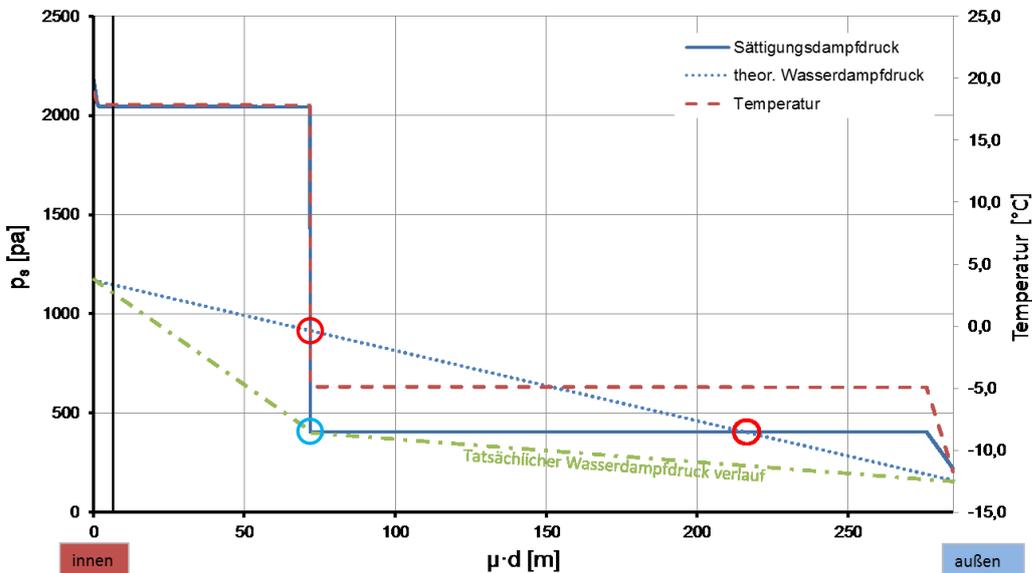


Abbildung 4.123: Verfahren nach Glaser: Geschossdecke GD3 (mit Innendämmung)

Wie bereits in Kapitel 1.1.2.5 erwähnt, kann mit verschiedenen Maßnahmen der U-Wert der Geschossdecke GD3 (ungedämmt) zwar verbessert und den wärmeschutztechnischen Anforderungen gerecht werden, allerdings besteht mit einer Innendämmung meist die Gefahr von Kondensatbildung im

Bauteilinneren (siehe Abbildung 4.123). Der Verlauf des theoretischen Wasserdampfdruckes schneidet den des Sättigungsdampfdruckes in zwei Punkten (rote Markierung). Mit Hilfe der Seilregel kann nun der tatsächliche Verlauf des Wasserdampfdruckes ermittelt und der Punkt der Tauwasserbildung bestimmt werden. Dieser liegt genau zwischen Trittschalldämmung und wärmedämmender Schüttung (blaue Markierung).

#### 4-13.3.6 Geschossdecke GD4

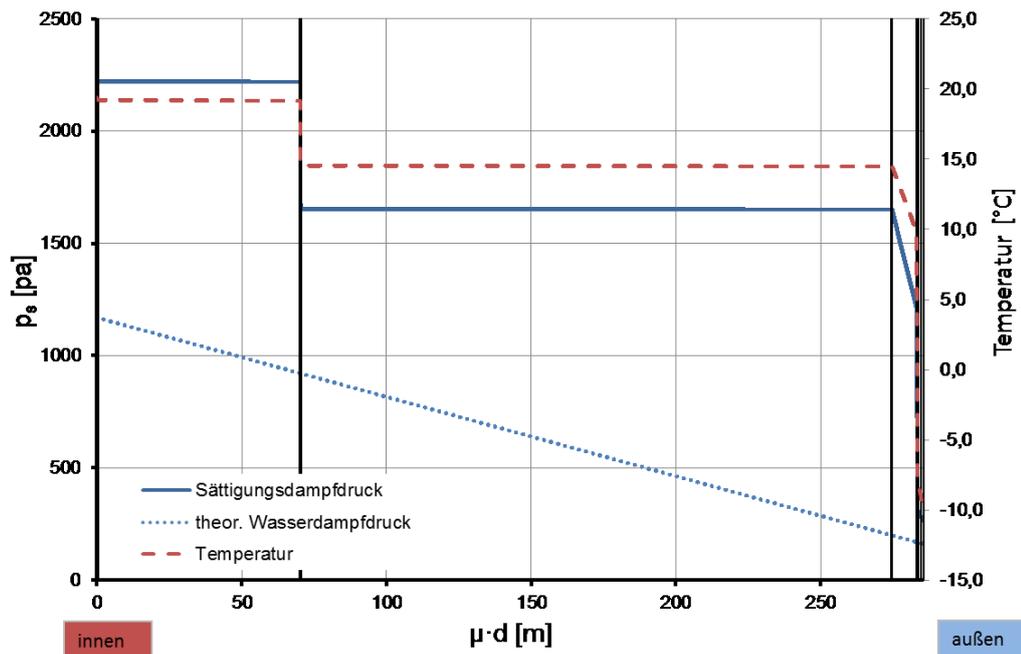


Abbildung 4.124: Verfahren nach Glaser: Geschossdecke GD4

Der Temperaturverlauf von Geschossdecke GD4 ähnelt jenem von GD2, allerdings ist hier die Temperatur im Bauteil generell zwischen 0,5°C und 1,0°C höher. Da der Verlauf des theoretischen Wasserdampfdruckes weit vom Sättigungsdampfdruckverlauf liegt, besteht keine Gefahr der Kondenswasserbildung.

## 4-13.4 BERECHNUNG NACH GLASER 2D

### 4-13.4.1 Deckenauskrugung Standardvariante

Wie bereits in Kapitel erwähnt, stellt der auskragende Deckenteil eine geometrische Wärmebrücke dar, da hier eine relativ große Außenfläche einer kleineren beheizten Innenfläche gegenübersteht (Außenecke). Dadurch bedingt, wandern die Isotherme (siehe Abbildung 4.125) von der kalten Seite weiter nach innen hin zur warmen Seite. Dabei wird die Brettsperrholzdecke von der 0°C Isotherme geschnitten und liegt in einem kleinen Bereich sogar unter null Grad. Die minimale Oberflächentemperatur beträgt 19,7°C und liegt damit deutlich unter der Taupunkttemperatur von  $T_{RH100\%} = 9,3\text{°C}$ . Auch die Gefahr der Bildung von Schimmel an der Oberfläche ist hier nicht gegeben. Der  $f_{Rsi}$ -Faktor errechnet sich zu 0,991 und liegt damit auch über dem geforderten Wert von 0,775 bzw. 0,673. Somit ist nach ÖNORM B 8110-2 ein ausreichenden Wärmeschutz gegeben.

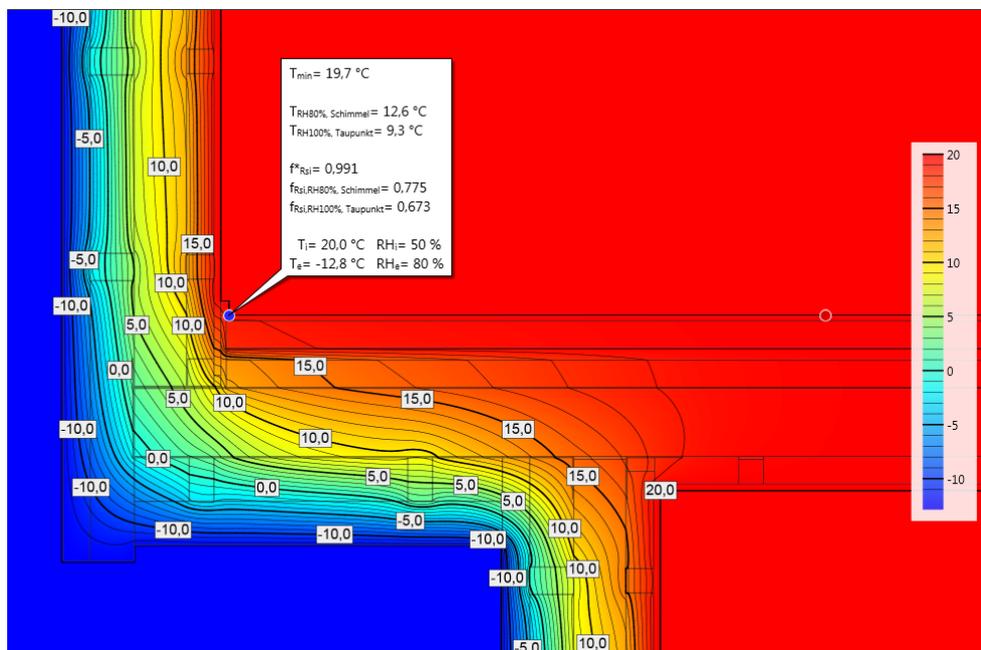


Abbildung 4.125: Temperaturverlauf OG

Sieht man sich den unteren Bereich der Auskrugung an, fällt einem sofort der gegensätzliche Temperaturverlauf auf. Im Bereich der Innenecke steht einer eher kleinen Außenfläche eine große Innenfläche gegenüber. Nun wandern die Isotherme von der warmen inneren Seite, hin zur Außenseite. Dieser Bereich ist demnach überdämmt und die Brettsperrholzwand liegt im Bereich zwischen 10-15 °C. Wie in Abbildung 4.126 zu sehen ist, unterscheidet sich die Oberflächentemperatur von 19,8°C aber nur minimal von jenen im Erdgeschoß. Somit besteht auch hier keine Gefahr von Oberflächenkondensat. Auch der  $F_{Rsi}$ -Faktor weist eine unbedeutende Differenz auf.

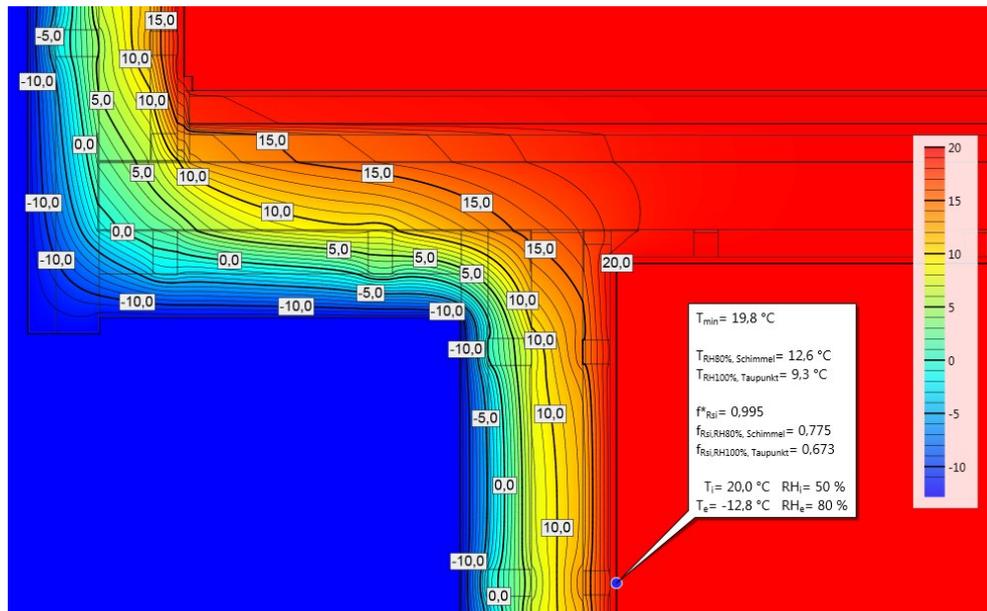


Abbildung 4.126: Temperaturverlauf EG

Am Wärmestrom in Abbildung 4.127 lässt sich der Wärmebrückeneffekt gut erkennen. Zwar fällt dieser insgesamt nicht schwer ins Gewicht, jedoch sieht man im Bereich der Außenecke die breit aufgefächerten Vektoren, während hingegen an der Innenecke die Vektoren zu annähernd einem Punkt zusammen laufen. Daraus resultiert eine geringere Wärmestromdichte und es kann, wie in Abbildung 4.128 ersichtlich, zu negativen  $\Psi$ -Werten kommen.

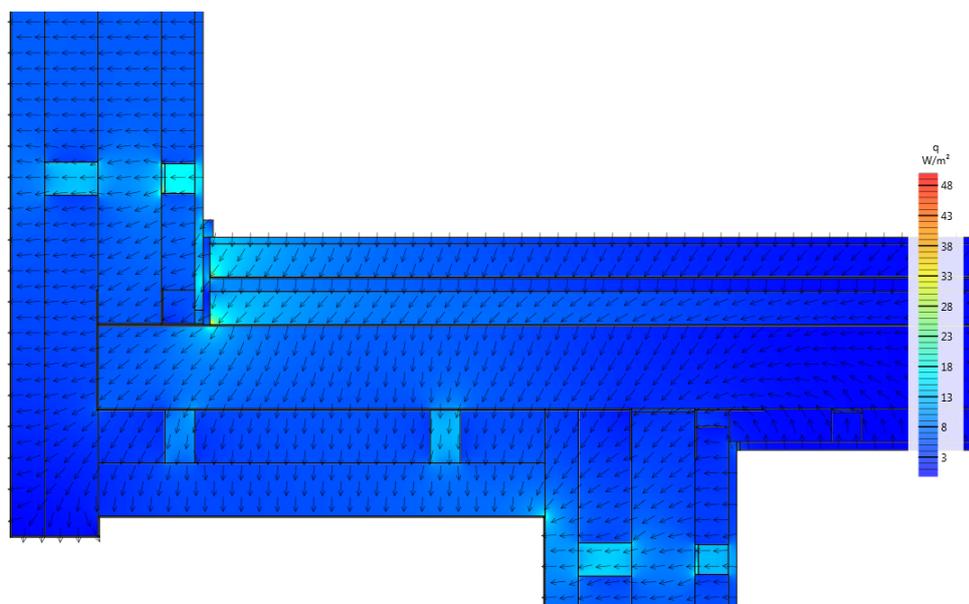


Abbildung 4.127: Wärmestrom Deckenauskragung

Abbildung 4.128 zeigt die beiden außenmaßbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizienten  $\Psi$ . Der  $\Psi$ -Wert der Innenecke ist mit  $0,042 \text{ [W/mK]}$  eher gering und deutet auf einen gut gedämmten Bereich hin. Wie schon angedeutet wird der  $\Psi$ -Wert der Außenecke aufgrund des gewählten Außenmaßbezuges negativ. Bei Bilanzierung wird der Transmissionswärmeverlust also „überschätzt“. Allerdings wird dieser Fehler durch das negative Vorzeichen wieder korrigiert.

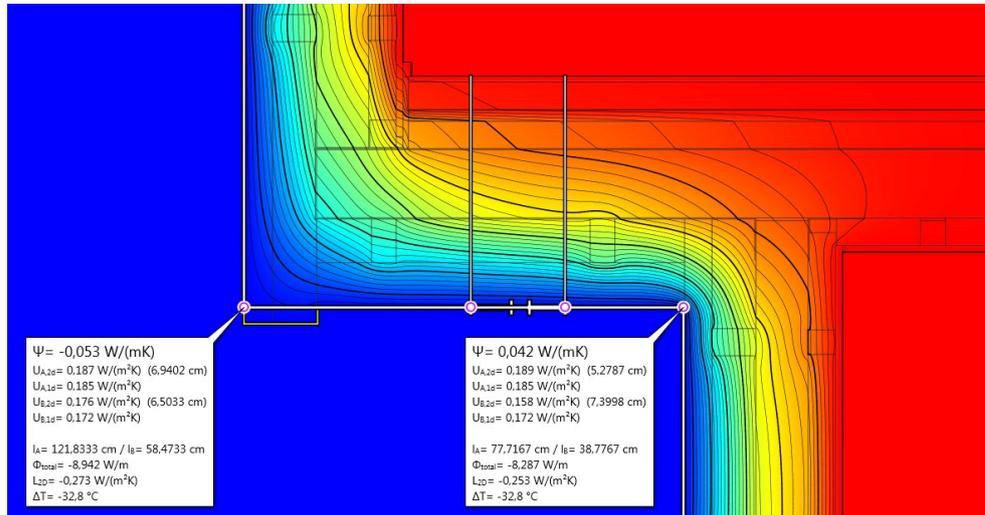


Abbildung 4.128:  $\Psi$ -Wert

Im Detail betrachtet erkennt man, dass die Brettsperrholzwand in einem Temperaturbereich unterhalb des Taupunktes liegt (siehe Abbildung 4.129). Unter den angenommenen Randbedingungen entsteht hier also in einem sehr kritischen Punkt Kondensat. Verschärft wird dieser Zustand noch durch das Klebeband (rot eingezeichnet) zur Sicherstellung der Konvektionsdichtheit, da sich das Kondensat in diesem Bereich sammeln kann und somit ein Abtransport durch Ausdiffundieren nicht mehr möglich ist.

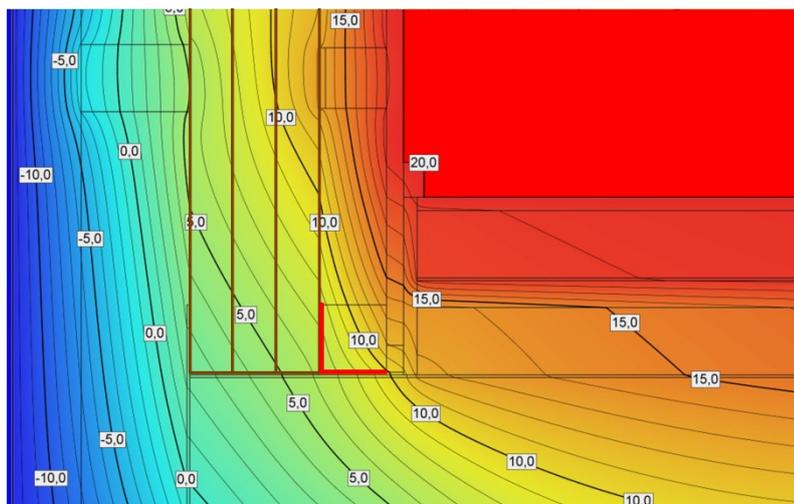
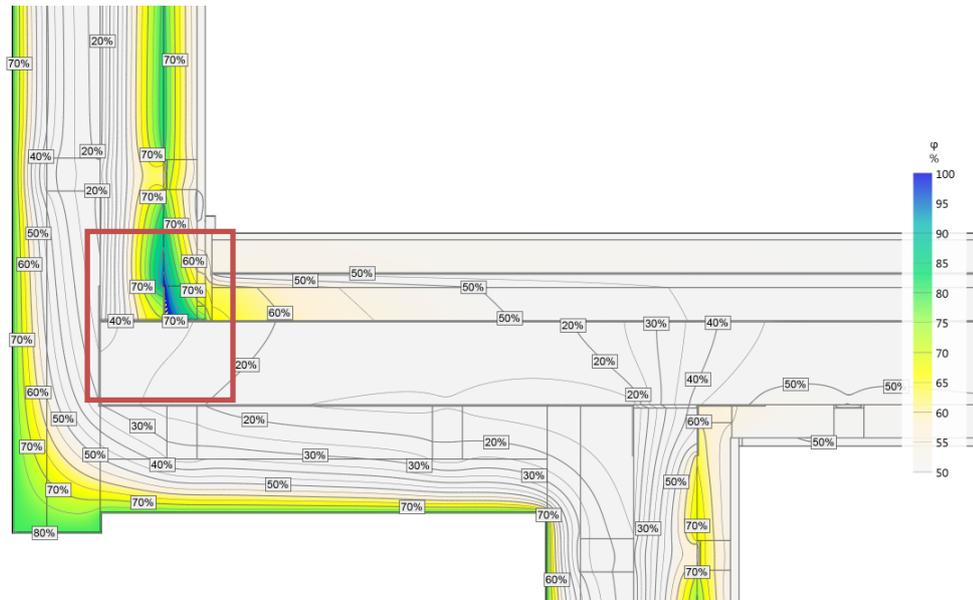


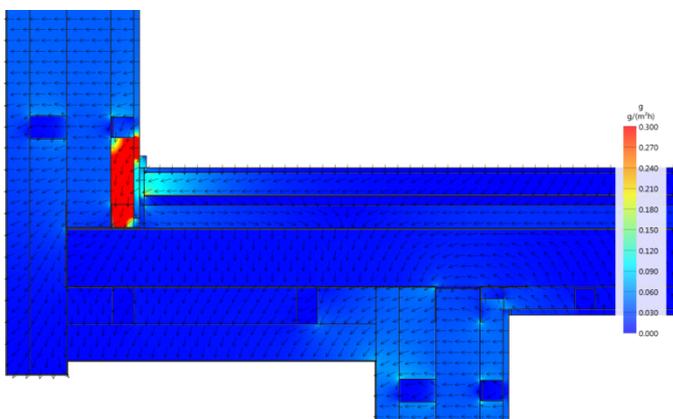
Abbildung 4.129: Brettsperrholzwand im Detail

Abbildung 4.130 lässt deutlich die Kondenswasserbildung im Bereich der BSP-Wand erkennen. Der schraffierte Bereich innerhalb der roten Markierung, stellt Bereiche außerhalb der Skala dar. Das bedeutet, dass hier die relative Feuchte von 100% überschritten wird und Kondensat im inneren des Bauteiles entsteht. In weiterer Folge muss nun die Frage geklärt werden ob dieses Kondenswasser im Laufe der Zeit auch wieder verdunsten bzw. abtransportiert werden kann. Solche fragen lassen sich allerdings nur mit instationären Simulationen und / oder mit langjährigen Messungen klären (siehe Kapitel 4-14 und Kapitel 6).

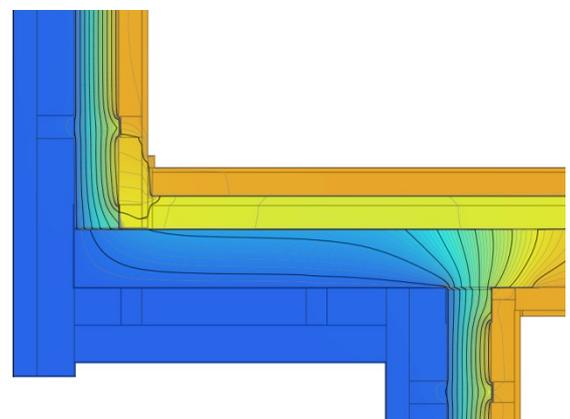


*Abbildung 4.130: relative Feuchte*

In der folgenden Abbildung 4.132 ist der Dampfstrom dargestellt. Der rote Bereich markiert einen starken Feuchtigkeitsbeitrag der durch den geringen Diffusionswiderstand zwischen Sesselleiste und Polsterholz entsteht. Da der Diffusionsstrom immer dem Partialdruckgefälle folgt, ist dieser hier auch nach unten gerichtet (siehe Vektoren). Abbildung 4.131 zeigt den Partialdruck im gesamten Bauteil.



*Abbildung 4.132: Dampfstrom*



*Abbildung 4.131: Partialdruck*

Abschließend ist in Abbildung 4.133 die Kondensatmenge in Gramm pro Tag dargestellt. Diese beträgt 0,54 [g/d]. Nach ÖNORM B 8110-2:2003 gilt Kondenswasser als schädlich, wenn dieses nicht gespeichert werden kann (z. B. durch kapillare Schichten) und mehr als 0,5 [kg/m<sup>2</sup>] überschreitet. Im konkreten Fall behindert nun das Klebeband den kapillaren Abtransport des Kondenswassers. Auch die umgebende Mineralwolle weist keine kapillare Wirkung auf und kann somit nichts zum Abbau von Feuchtigkeitsspitzen beitragen. Durch Verwendung von Holzfaserdämmplatten oder einer Zellosedämmung könnte hier Abhilfe geschaffen werden.

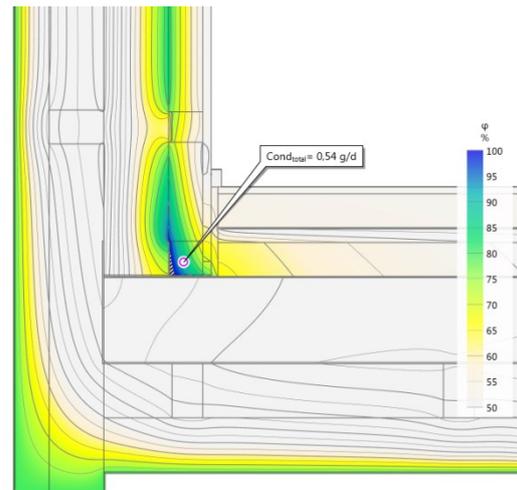


Abbildung 4.133: Kondensatmenge

#### 4-13.4.2 Deckenauskrägung mit ungedämmter Unterseite

Obwohl sich die minimale Oberflächentemperatur im Vergleich zur gedämmten Varianten nur im Zehntelbereich unterscheidet, liegt der gesamte auskragende Teil der BSP-Decke im Bereich unterhalb von 0°C. Auch der untere, kritische Teil der BSP-Wand liegt unter dem Gefrierpunkt, was zu einer Kondensatbildung im Bauteilinneren führen kann. Da sich Temperatur an der inneren Oberfläche nur geringfügig ändert, bleibt auch der  $f_{Rsi}$ -Faktor mit 0,982 [-] beinahe unverändert und weist damit eine Differenz von nur ca. 0,1 [-] auf.

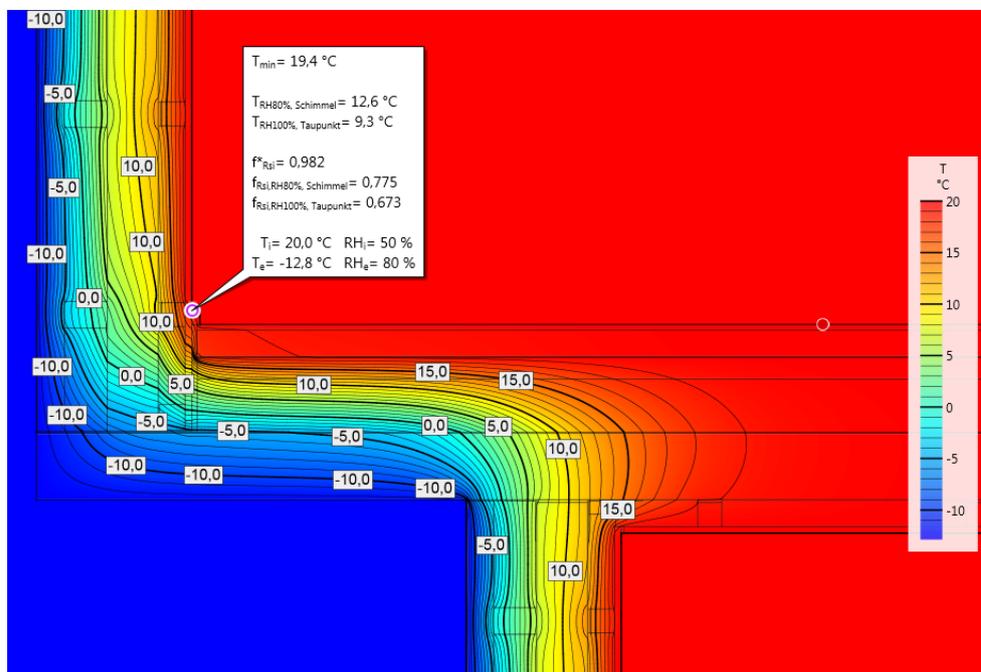


Abbildung 4.134: Temperaturverlauf OG

In Abbildung 4.136 ist der untere Teil der Auskrägung dargestellt. Da die Wandaufbauten unverändert blieben verlaufen die Isotherme im ungestörten Bereich so, wie in Abbildung 4.126. Lediglich im Bereich der Innenecke erkennt man im Anschlussbereich der Wand zur Decke einen Temperaturabfall von ca.

5°C. Generell ist hier wieder eine Verschiebung der Isotherme nach innen zu beobachten, was einen erhöhten Einfluss der Wärmebrücke bedeutet. Die Oberflächentemperatur  $T_{\min}$  und der Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  ändern sich nur marginal und betragen 19,7°C bzw. 0,992 [-]. Die folgende Abbildung 4.135 zeigt den Wärmestrom, welcher im Vergleich zur vorangegangenen, gedämmten Variante, zwei wesentliche Unterschiede aufweist. Zum Einen ist das der hohe Wärmefluss im Bereich der Sesselleiste, und zum Anderen jener im Anschluss der Wand zur Decke. Dies spiegelt sich auch in den  $\Psi$ -Werten wider (siehe Abbildung 4.137). Im Gegensatz zur Variante mit gedämmter Unterseite steigt hier der  $\Psi$ -Wert in der inneren Ecke um über 30% auf 0,062 [W/mK] an.

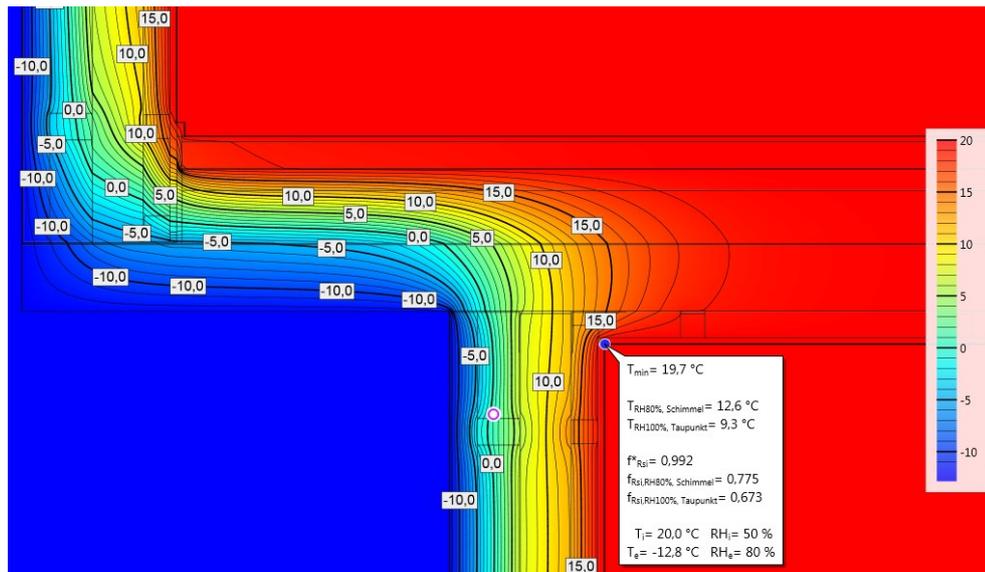


Abbildung 4.136: Temperaturverlauf EG

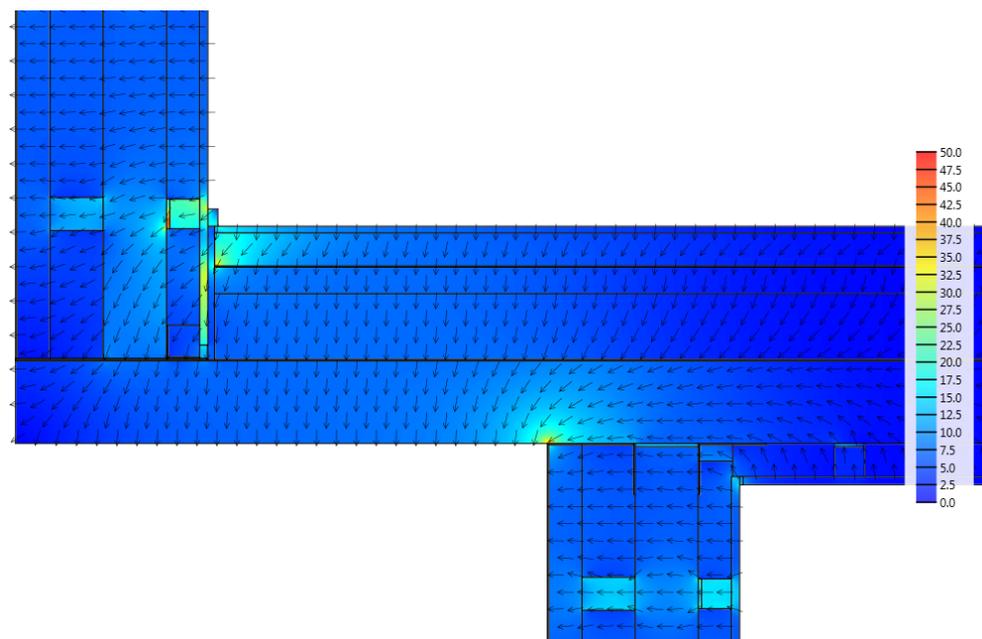


Abbildung 4.135: Wärmestrom Deckenauskrangung (ungedämmte Unterseite)

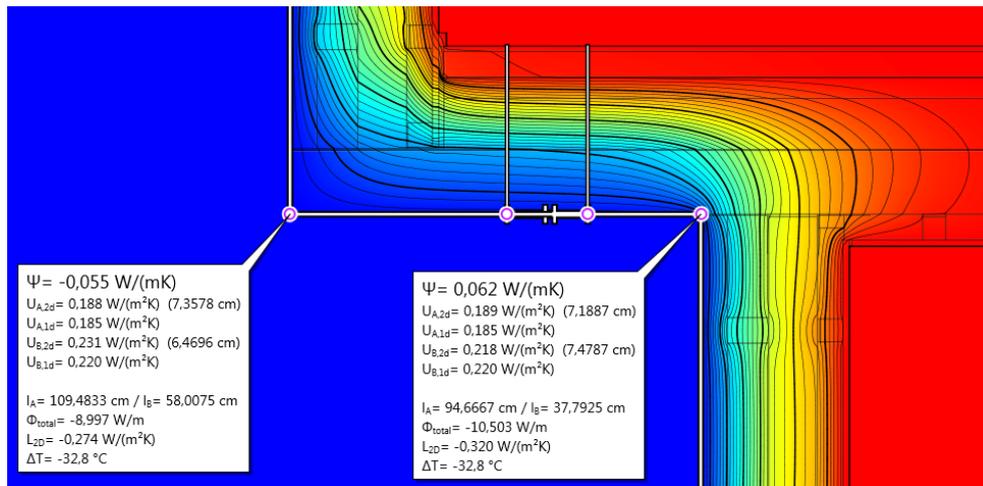


Abbildung 4.137:  $\Psi$ -Wert

Betrachtet man nun wieder die Brettsperrholzwand im Detail, so erkennt man sofort den deutlichen Unterschied zur gedämmten Variante und das damit verbundene Risiko von Kondensatbildung im Bauteilinneren. Im Auflagerbereich herrschen hier unter den in Kapitel 4-13.1.1 angeführten Randbedingungen bis zu minus 7°C. Würde sich nun Kondenswasser bilden, käme es zu einer Ansammlung im Bereich der Feuchtigkeitsabdichtung. Theoretisch könnte es hier sogar zum Gefrieren (siehe Abbildung 4.138) des Kondensates kommen und somit zur Zerstörung der Fußbodenkonstruktion durch die Volumenzunahme des gefrierenden Wassers. Der Temperaturunterschied in der Auflagerzone, bei Ausführung einer Deckenauskragung mit ungedämmter Unterseite, beträgt 10°C.

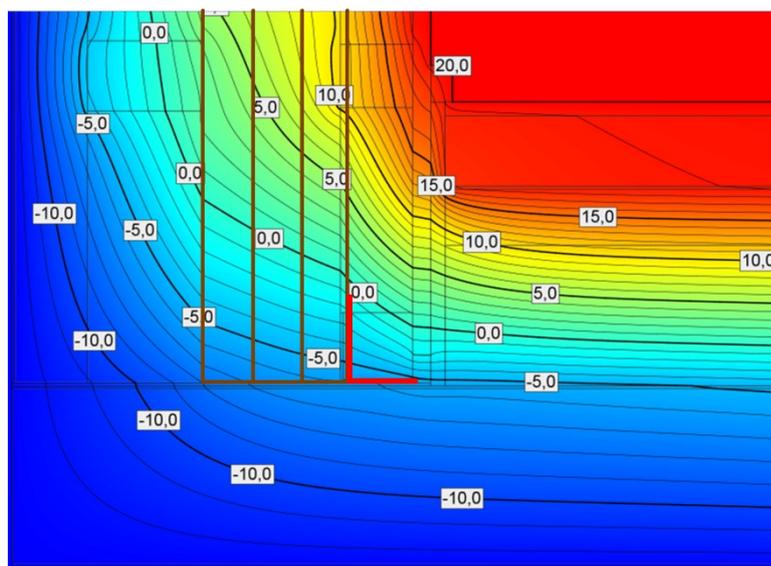
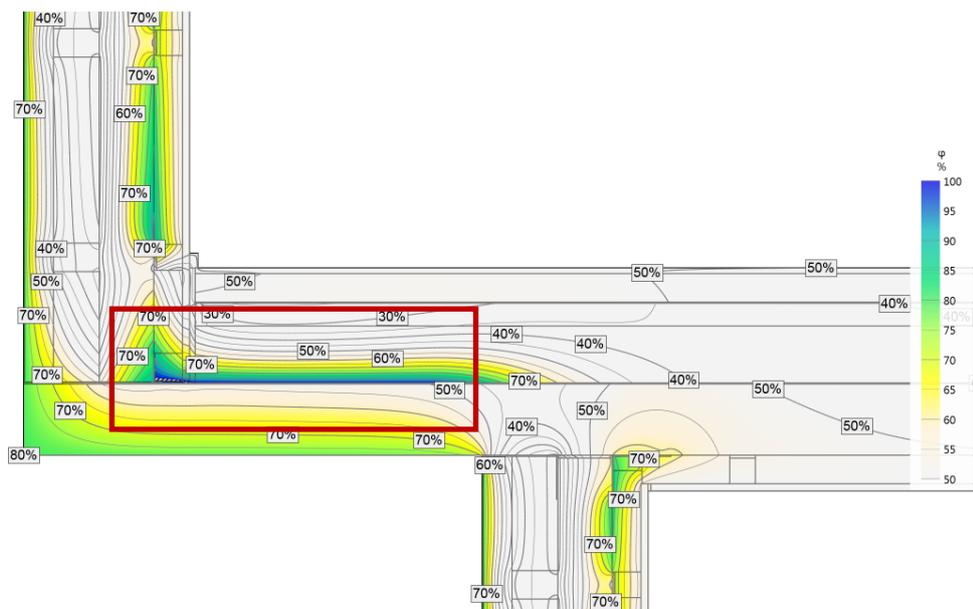


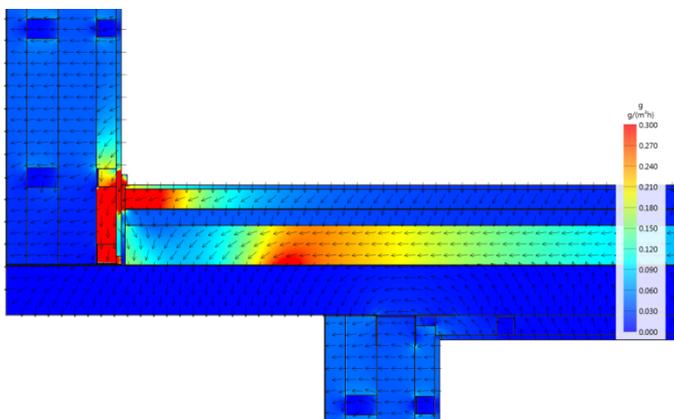
Abbildung 4.138: Brettsperrholzwand im Detail

Wie schon angesprochen, kann es aufgrund der niedrigen Temperaturen zur Bildung von Kondensat kommen. In Abbildung 4.139 ist die relative Feuchte im Bauteil dargestellt, welche zeigt, dass es tatsächlich unter den gegebenen Umständen zur Bildung von Kondensat kommt, welches sich entlang der Feuchtigkeitsabdichtung sammelt. Da Abdichtungen in der Praxis des Öfteren nicht zu 100% dicht ausgeführt werden bzw. oft Leckagen aufweisen, könnte das anfallende Kondensat die BSP-Decke erreichen und somit einen Feuchtigkeitseintrag hervorrufen. In Verbindung mit den tiefen Temperaturen im Bereich der Auskragung, könnte diese Kombination ein totales Versagen der betreffenden Bauteile zur Folge haben.

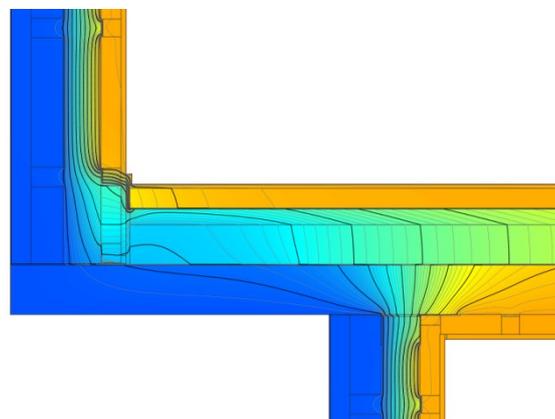


**Abbildung 4.139: relative Feuchte**

Da die Dämmebene nun innerhalb der BSP-Decke liegt und wegen der geringen Dichte auch einen geringen Diffusionswiderstand aufweist, kommt es dadurch bedingt auch zu einem hohen Dampfstrom in dieser Ebene (siehe Abbildung 4.141). Der Wasserdampf gelangt von den beiden konditionierten Räumen in die Dämmschicht, und wird dort zur kalten Seite transportiert wo dieser, wegen der Feuchtigkeitsabdichtung nicht mehr ausdiffundieren kann. Kondenswasserbildung ist die Folge. Auch im Bereich der Sesselleiste ist ein erhöhter Dampfstrom zu beobachten (vgl. auch Abbildung 4.132).



**Abbildung 4.141: Dampfstrom**



**Abbildung 4.140: Partialdruck**

Die Berechnung der Kondensatmenge ergibt sich zu 1,46 [g/d] und ist damit Vergleich zur gedämmten Variante um fast das Dreifache höher. Es mag möglicherweise den Anschein machen, dass rund 1,5 Gramm pro Tag keine besorgniserregende Kondensatmenge darstellen, jedoch hängt diese berechnete Menge stark von der auskragenden Fläche ab (siehe Abbildung 4.142). Des Weiteren kommt es auch nur dann zur Bildung von gefährlichem Kondensat, wenn die Außentemperatur so weit abfällt, dass die Taupunkttemperatur auf der Innenseite der Feuchtigkeitsabdichtung unterschritten wird. Dementsprechend ist die anfallende Menge an Kondensat auch von der Anzahl der „kalten“ Tage im Jahr abhängig.

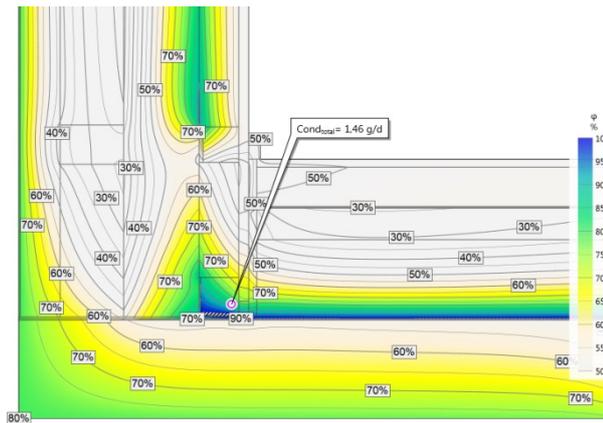


Abbildung 4.142: Kondensatmenge

#### 4-13.4.3 Deckenauskrangung mit darüber liegendem Nassraum

Aufgrund der veränderten Randbedingungen in Nassräumen (siehe Kapitel 4-13.2), steigt auch die minimale Oberflächentemperatur von 19,7°C auf 20,6°C an und die Isothermen verschieben sich leicht nach außen. Dies hat ein generelles Ansteigen der Temperatur der einzelnen Bauteilschichten zur Folge. Die erhöhte Temperatur von 23°C im Nassraum zieht aber auch ein Absinken des  $f_{Rsi}$ -Wertes mit sich. Dieser beträgt nun  $f_{Rsi} = 0,933$  und liegt damit unter dem geforderten von  $f_{Rsi, RH 80\%} = 1,0$ . Unter diesen Randbedingungen besteht also die Gefahr der Schimmelbildung an der Bauteiloberfläche. Zur Vermeidung von Kondenswasser ergibt sich der Temperaturfaktor zu  $f_{Rsi, RH 100\%} = 0,898$  und erfüllt damit den Nachweis  $f_{Rsi} \geq f_{Rsi, RH 100\%}$ .

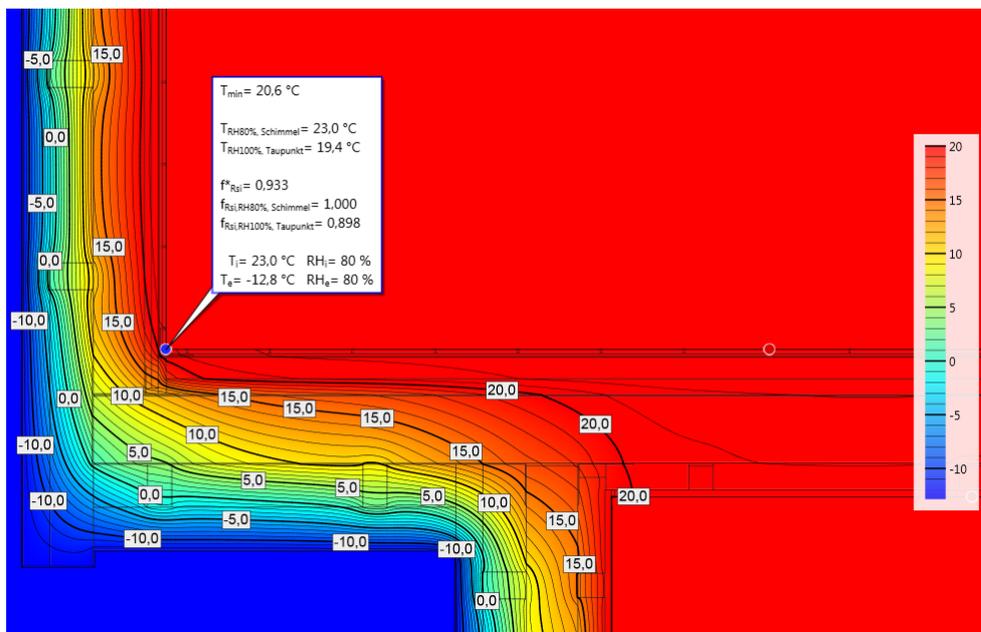
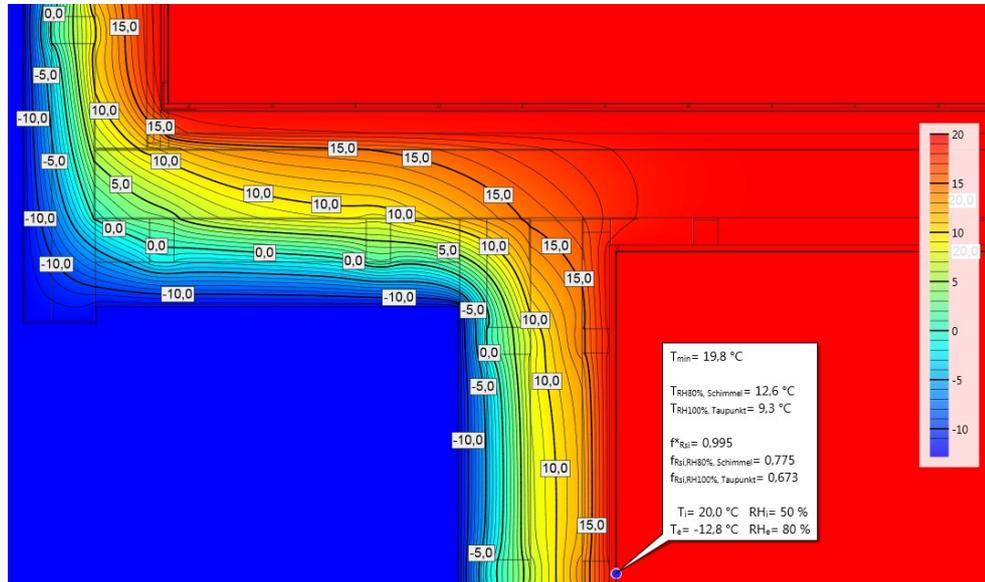


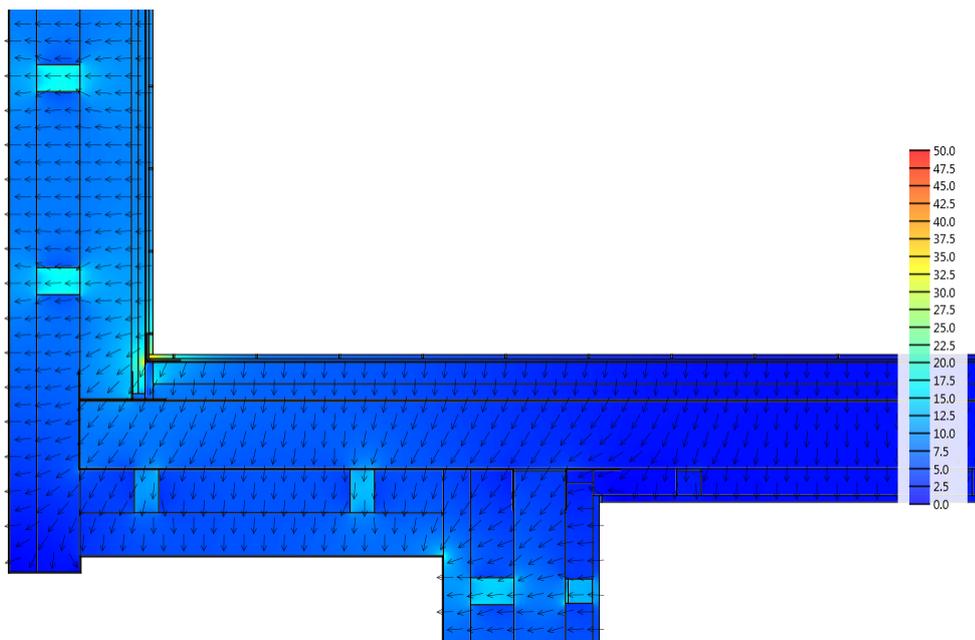
Abbildung 4.143: Temperaturverlauf OG

Da sich der Bereich im Erdgeschoss weder durch den Aufbau noch durch die Randbedingungen unterscheidet, entspricht dieser jenem aus Kapitel 4-13.4.1, weswegen hier nicht näher darauf eingegangen wird.



*Abbildung 4.144: Temperaturverlauf EG*

Im Vergleich zur Standardvariante fällt in Abbildung 4.145 der erhöhte Wärmestrom im auskragenden Teil der Decke auf. Aufgrund der höheren Temperatur im Nassraum (23°C) entsteht auch ein höheres Temperaturgefälle und damit ein stärkerer Wärmestrom. Dieser konzentriert sich im unteren Teil der Wand und ist an dem hellen Bereich und den Vektoren zu erkennen.



*Abbildung 4.145: Wärmestrom Deckenauskrägung [ $\text{W/m}^2$ ]*

Die Berechnung der  $\Psi$  – Werte ergab keine nennenswerten Unterschiede zur Standardvariante, weshalb im Weiteren nicht näher darauf eingegangen wird.

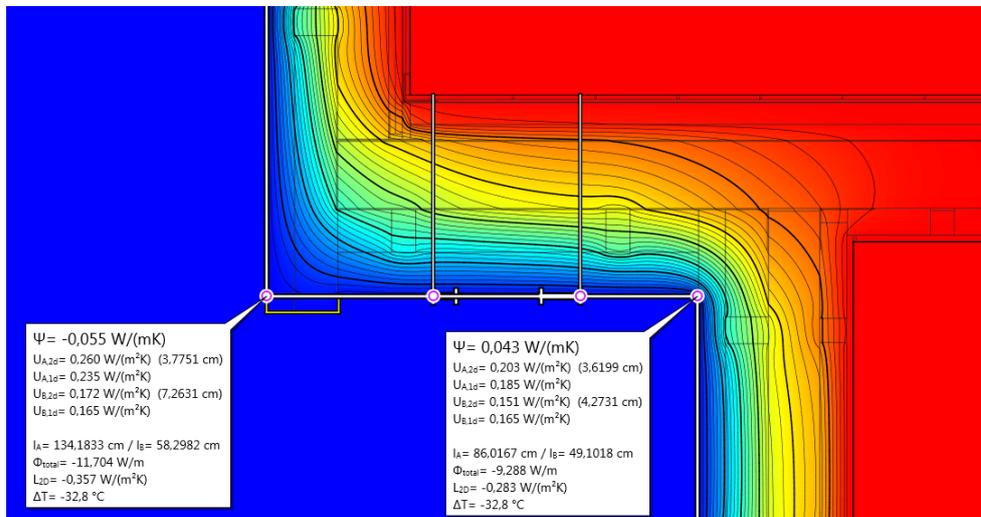


Abbildung 4.146:  $\Psi$  - Wert

Wie auch in Abbildung 4.143 ersichtlich, zeigt auch Abbildung 4.147, dass sich die Isothermen aufgrund der Innentemperatur nach außen verschieben und die Temperaturen Brettsperrholzwand um rund  $5^\circ\text{C}$  erhöhen. Die Gefahr der Kondensatbildung ist in diesem Bereich nicht gegeben.

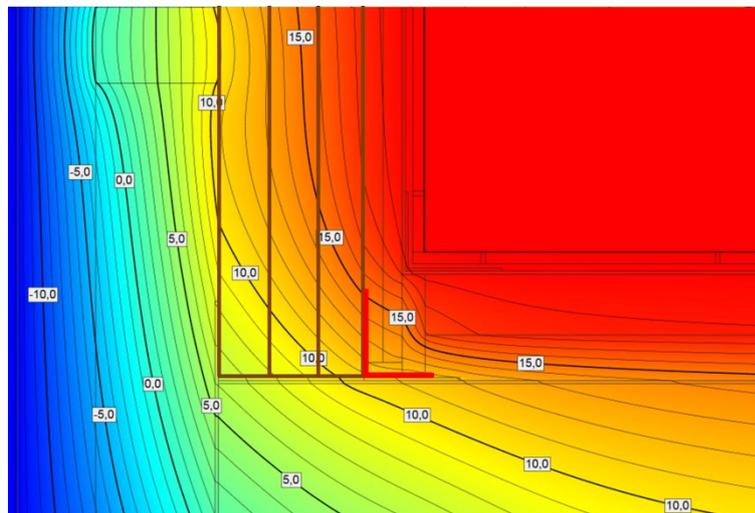


Abbildung 4.147: Brettsperrholzwand im Detail



## 4-14 INSTATIONÄRE BERECHNUNGEN

### 4-14.1 VORGEHENSWEISE

Die grundlegende Vorgehensweise wurde bereits in Kapitel 4-5.2 erläutert weswegen in die diesem Kapitel nur noch auf die Lage der einzelnen Monitoring-Positionen eingegangen wird. Die Monitoring-Positionen für die „Variante mit darüber liegendem Nassraum“ entsprechen jenen der Standardvariante.

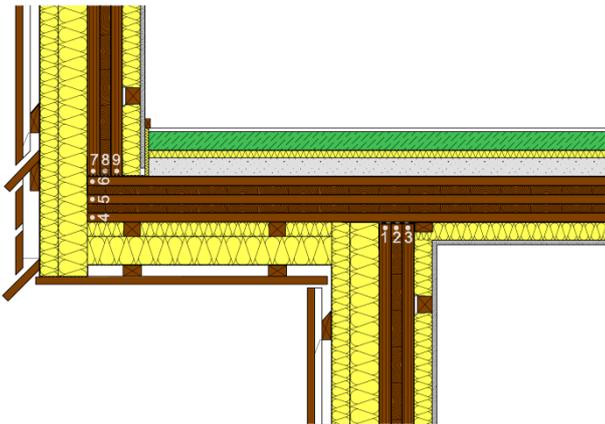


Abbildung 4.151: Monitoring-Positionen (Standardvariante)

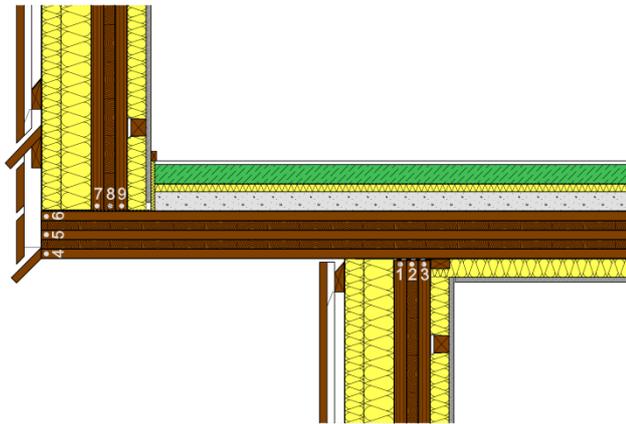


Abbildung 4.152: Monitoring-Positionen (ungedämmt)

### 4-14.2 DECKENAUSKRAGUNG „STANDARDVARIANTE“

#### Punkte 1 - 3

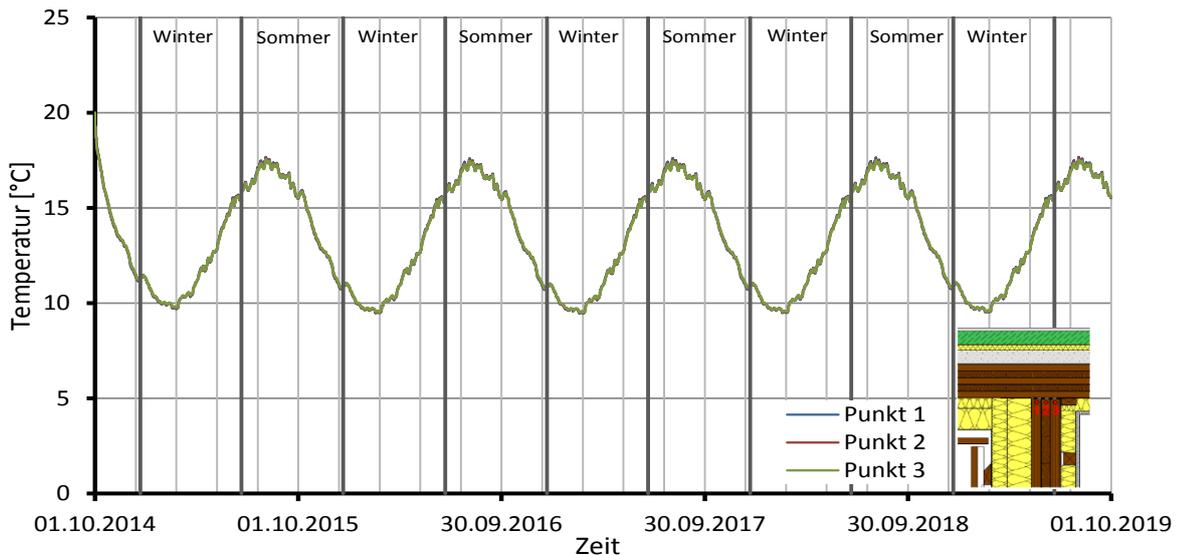
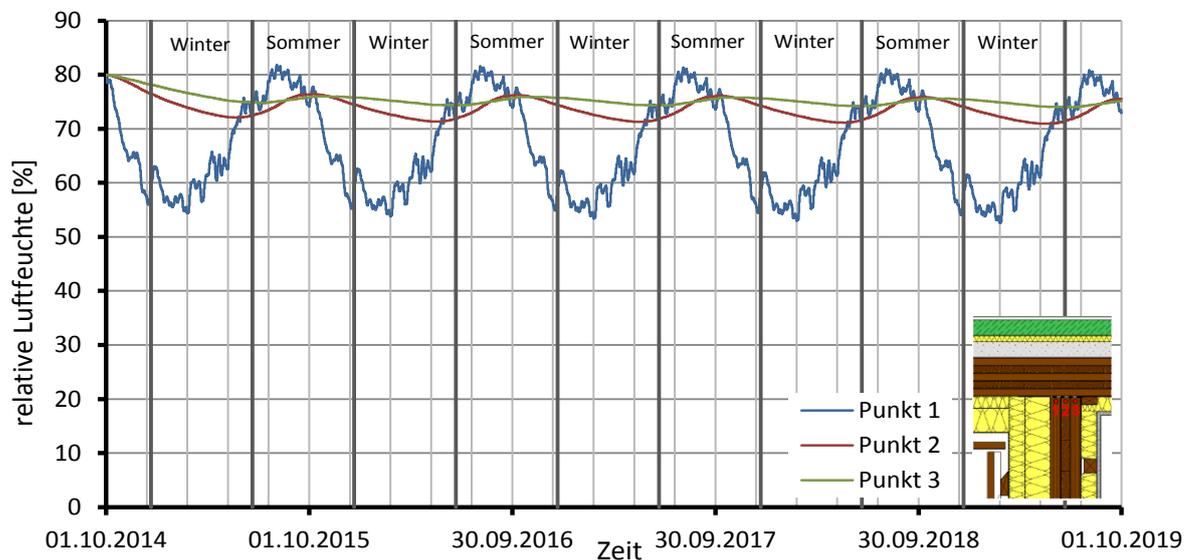


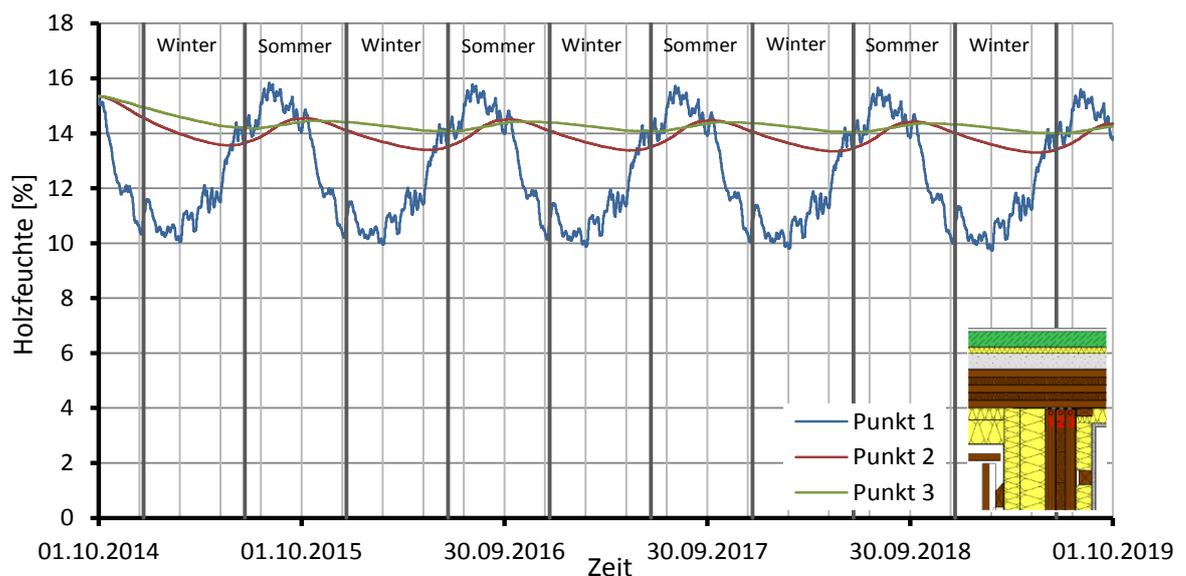
Abbildung 4.153: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3

Wie schon in Kapitel 4-5 gezeigt wurde, ist der Temperaturverlauf der Monitoring-Positionen 1 bis 3 (siehe Abbildung 4.153) innerhalb der Brettsperrholzwand beinahe ident. Allerdings bewegen sich die Ganglinien innerhalb eines größeren Temperaturbereiches, welcher zwischen rund 10°C und 18°C liegt. Damit liegen die Temperaturen generell um rund 5°C tiefer als bei den Sockelanschlüssen. Dies ist auf die relativ große und bewitterte Fläche der Auskragung zurückzuführen.



**Abbildung 4.154: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 1-3**

Die Verläufe der relativen Feuchte in Abbildung 4.154 zeigen Ganglinien die zwar weniger stark schwanken als jene im Bereich des Sockels, jedoch weisen die Mittelwerte in den Punkten 2 und 3 um rund 10% erhöhte Werte auf. Dies spiegelt sich auch in den Verläufen der Holzfeuchte wider. Die Mittelwerte liegen in den Punkten 2 bis 3 bei rund 14%, während die Holzfeuchte in Punkt 1 zwischen 10% und 16% schwankt, was auf eine zusätzliche Außenklimabelastung im Bereich der Innenecke zurückzuführen ist.



**Abbildung 4.155: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3**

Punkte 4 - 6

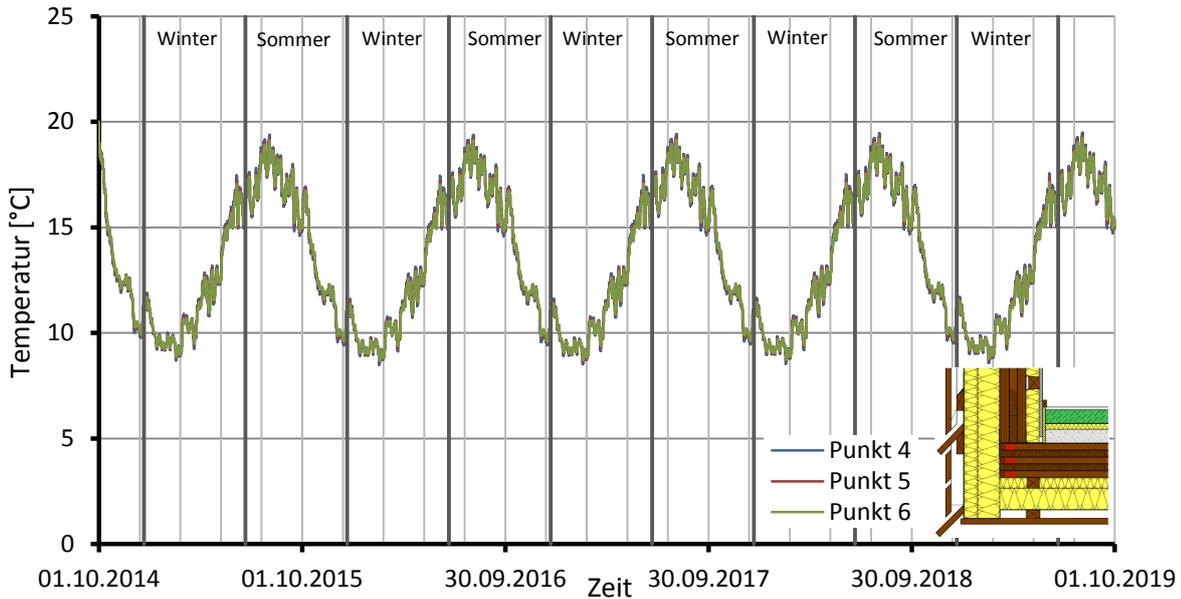


Abbildung 4.156: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6

Die Verläufe Temperaturen in den Positionen 4 bis 6 an der Stirnseite der fünfschichtigen BSP-Decke in Abbildung 4.156 zeigen einen stärker schwankenden Bereich als jene in den Punkten 1 bis 3. Obwohl die minimalen Temperaturen annähernd gleich verlaufen, weisen die maximalen Temperaturen um bis zu zwei Grad höhere Werte auf. Begründet können die höheren Werte im Vergleich zu den Punkten 1 bis 3 durch die Sonneneinstrahlung werden, da durch den auskragenden Deckenteil ein Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung behindert wird.

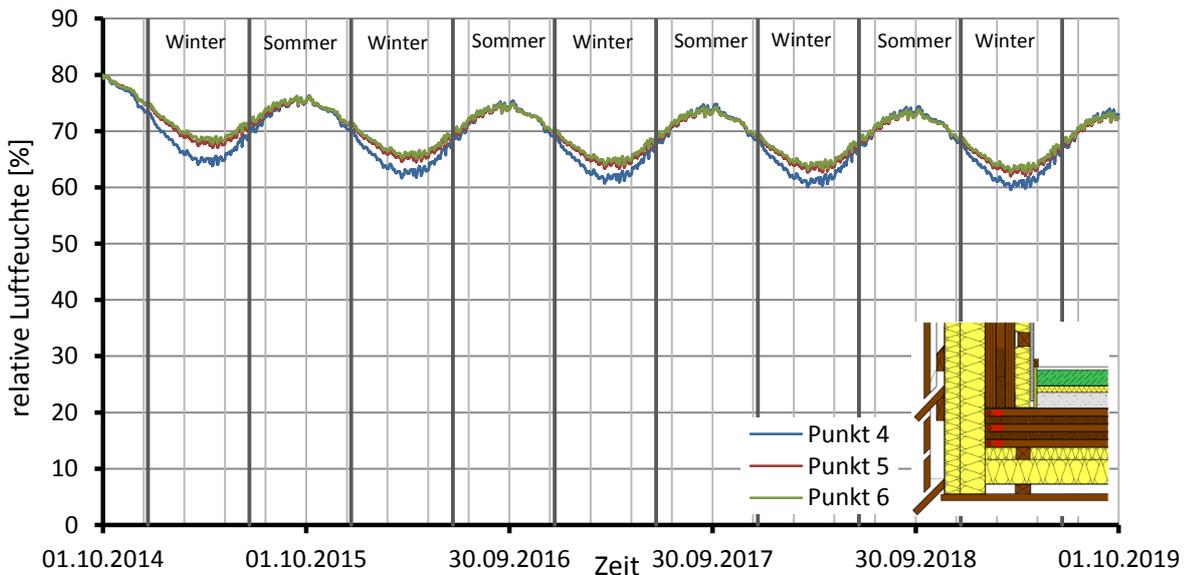
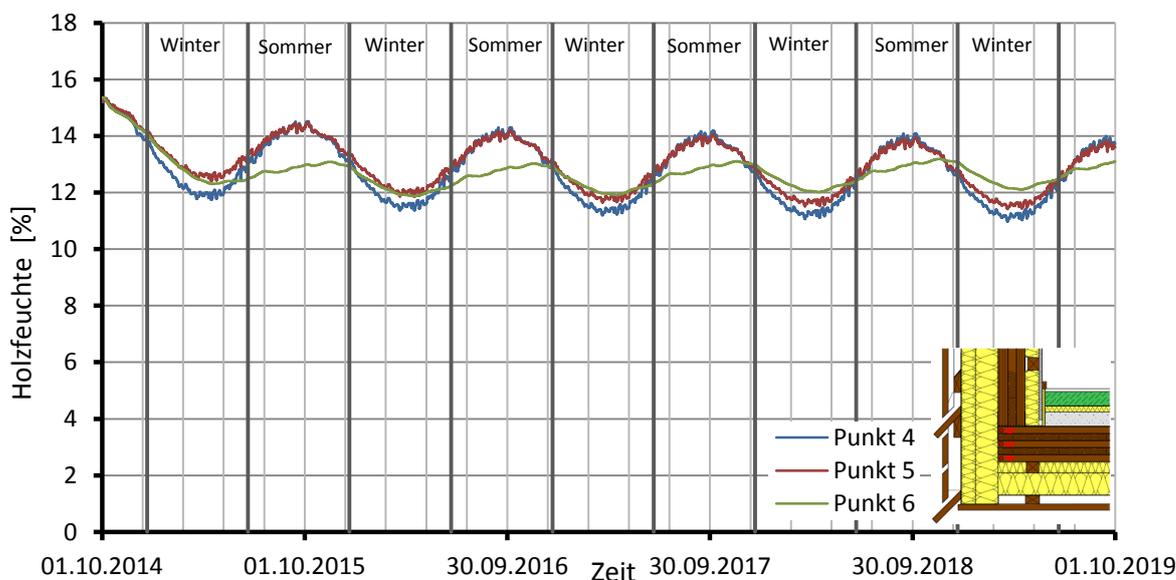


Abbildung 4.157: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 4-6

Auffallend an den Ganglinien der relativen Feuchte in Abbildung 4.157, ist der annähernd unterschiedslose Verlauf in allen drei Punkten. Zum einen kann dieses Zusammenfallen der Ganglinien durch die Anordnung der Monitoring-Positionen, welche im Vergleich zu den bisherigen Simulationen nicht von außen nach innen verlaufen, sondern übereinander angeordnet sind und somit nicht in Richtung des Diffusionsstromes verlaufen, wodurch es zu keinem zeitlichen Versatzersatz der Ganglinien kommt. Zum anderen findet in diesen Punkten der Wärme- und Dampfstrom nicht quer zur Faser statt, sondern längs zur Faser, weswegen die Dampfdiffusion wesentlich schneller vor sich geht aber auch einen höheren Feuchtegehalt zur Folge hat.

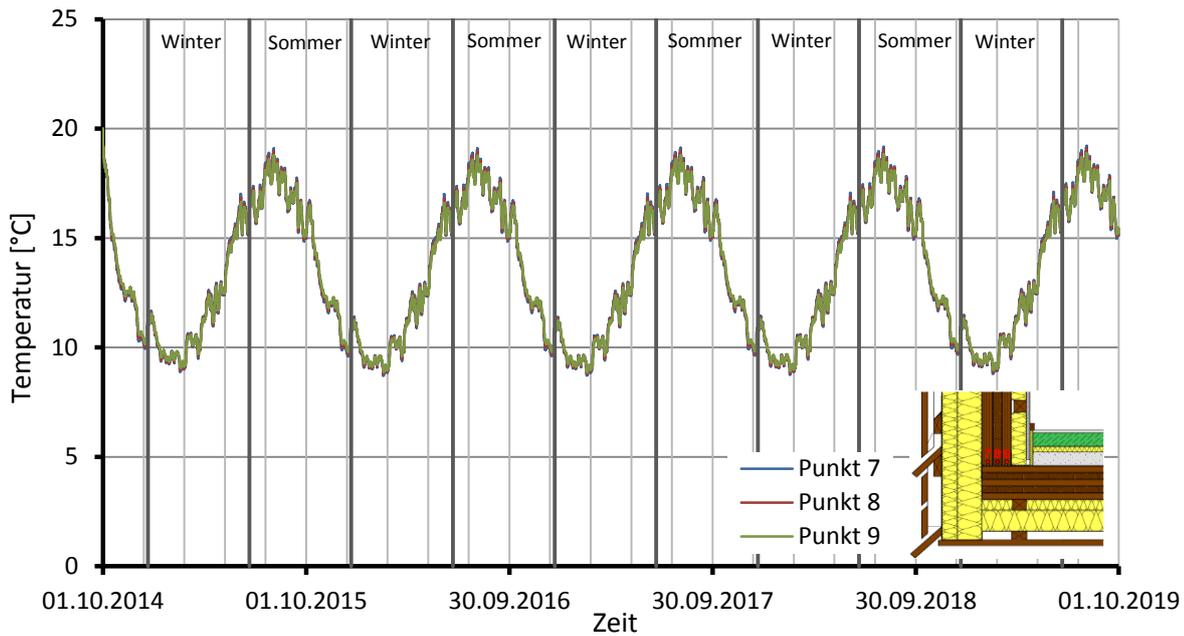


*Abbildung 4.158: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6*

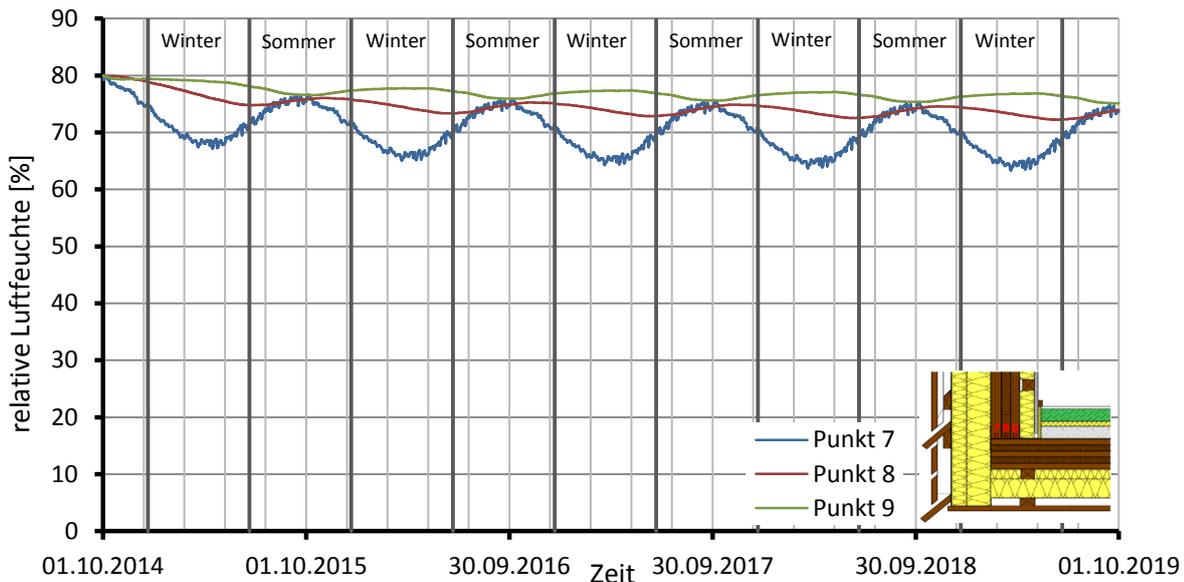
Betrachtet man den Verlauf der Holzfeuchte in Abbildung 4.158, erkennt man in den Punkten 4 und 5 eine qualitative Übereinstimmung mit den Verläufen aus Abbildung 4.157. Die Ganglinie der Monitoring-Position 6 unterscheidet sich hingegen teilweise um 1% von jener der relativen Feuchte. Begründung findet dieser Effekt durch die Lage der gewählten Monitoring-Positionen. Während die Punkte 4 und 5 ausschließlich von Mineralwolle umgeben sind, liegt Punkt 6 in einer eher „geschützten“ Lage. Stirnseitig wird Punkt 6 von einer diffusionsoffenen Witterungsbahn umgeben, während oberhalb der inneren Einzelschicht eine Feuchtigkeitsabdichtung angeordnet ist. Der Feuchtigkeitseintrag im Bereich der Punkte 4 bis 6 erfolgt daher nur durch die Bewitterung und weniger durch Diffusion von innen nach außen. Der Eintrag in die innere Einzelschicht (Punkt 6) ist demnach geringer und äußert sich mit einer etwas geringeren Holzfeuchte in diesem Punkt.

### **Punkte 7 – 9**

Die Temperaturverläufe der Punkte 7 bis 9 (siehe Abbildung 4.159) sind beinahe deckungsgleich mit jenen der Punkte 4 – 6 (siehe Abbildung 4.156). Grund dafür ist der geringe Abstand der Messreihen untereinander, da innerhalb eines kleinen Bereiches auch annähernd gleiche Temperaturverhältnisse herrschen. Dieser Umstand trifft allerdings nicht auf den Feuchtetransport in Bauteilanschlüssen zu. Aufgrund der Affinität zu den Monitoring-Positionen 4 bis 6 wird an dieser Stelle nicht weiter auf die Temperaturverläufe eingegangen.



*Abbildung 4.159: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9*



*Abbildung 4.160: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 7-9*

Die Ganglinien der relativen Luftfeuchte (siehe Abbildung 4.160) und jener der Holzfeuchte (Abbildung 4.161) zeigen für die innere und die mittlere Einzelschicht einen sehr stabilen Verlauf im Bereich von rund 75% bzw. 14,5 M-%. Die äußere Schicht zeigt sich dagegen stärker vom Außenklima beeinflusst und liegt im Bereich zwischen 65% und 85% bzw. 12 M-% und 14 M-%. Außerdem ist eine regelmäßige Überschneidung der Ganglinien im Sommer zu erkennen. Diese Annäherung lässt sich durch die gleichen Lufttemperaturen im Innen- und Außenbereich und der damit verbundenen gleichen relativen Luftfeuchte erklären. Außerdem ist eine leicht abfallende Tendenz über den gesamten Berechnungszeitraum der relativen Luftfeuchte und auch der Holzfeuchte zu erkennen.

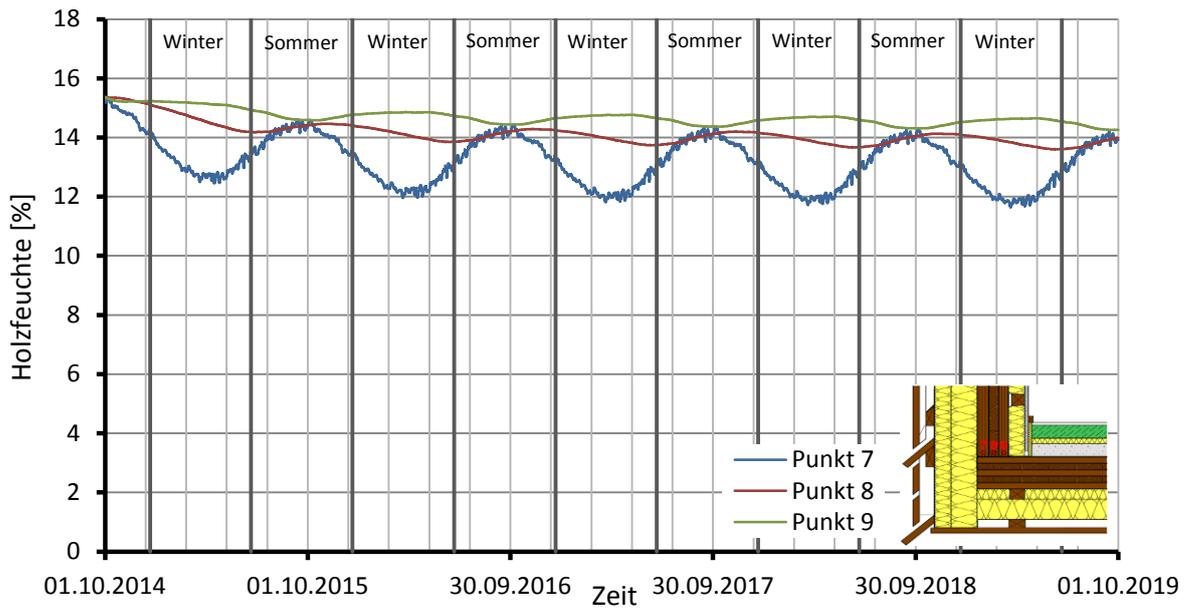


Abbildung 4.161: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9

Zusammenfassend ist in Abbildung 4.162 bis Abbildung 4.164 jeweils die Umhüllende der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Holzfeuchte aller Monitoring-Positionen dargestellt.

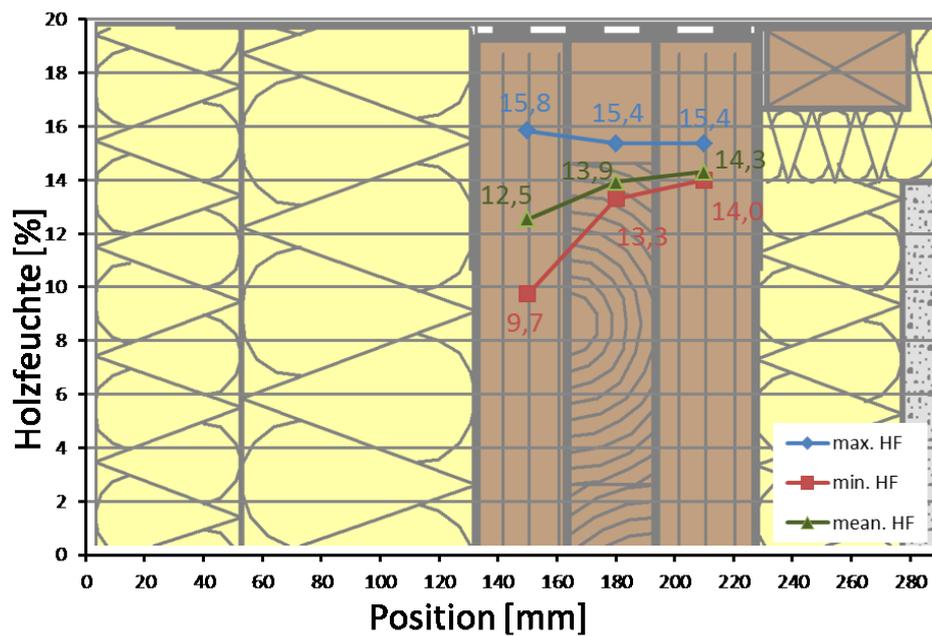


Abbildung 4.162: Umhüllende der Punkte 1-3

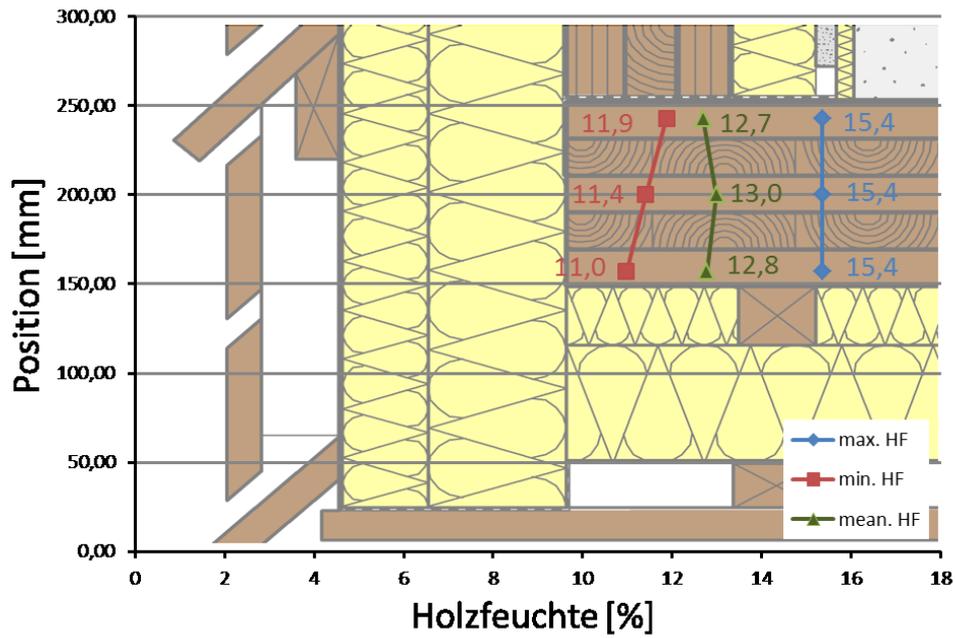


Abbildung 4.163: Umhüllende der Punkte 4-6

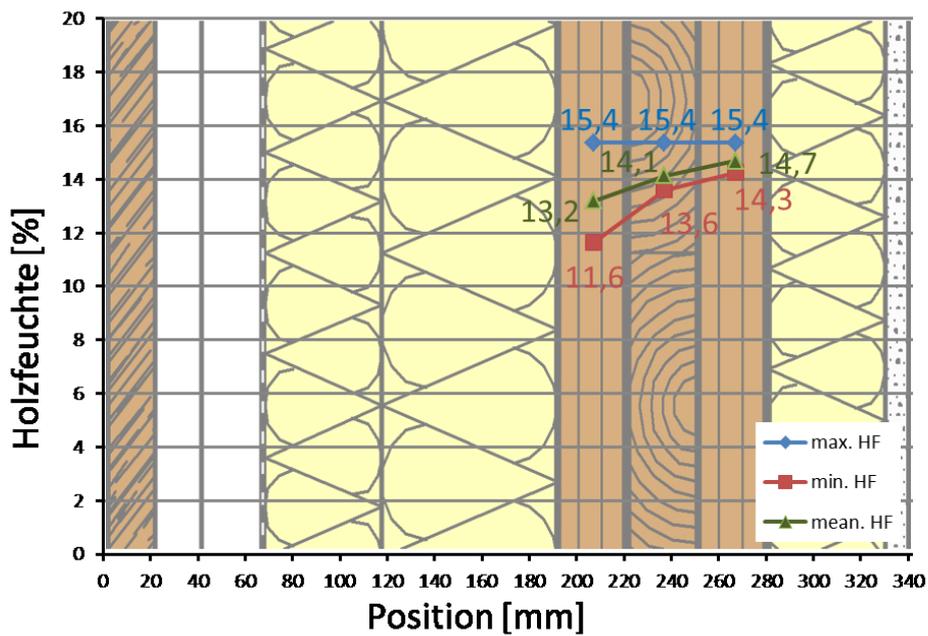


Abbildung 4.164: Umhüllende der Punkte 7-9

## 4-14.3 DECKENAUSKRAGUNG MIT UNGEDÄMMTER UNTERSEITE

### Punkte 1 – 3

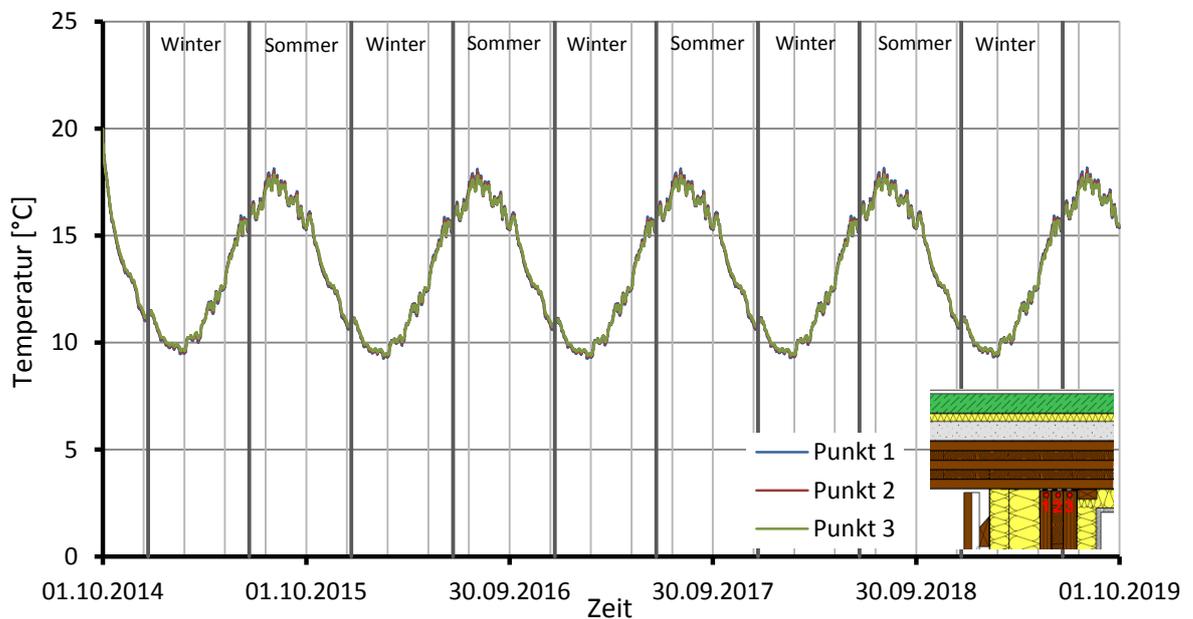


Abbildung 4.165: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3

Die Temperaturen in den Punkten 1 – 3 (siehe Abbildung 4.165) verlaufen ident zur jenen der Standardvariante, weshalb in weiterer Folge auf eine genaue Interpretation der Ganglinien verzichtet wird. Es kann jedoch gesagt werden, dass die Dämmung an der Unterseite der Auskragung einen geringen Einfluss auf die Temperaturverteilung der BSP-Wand hat.

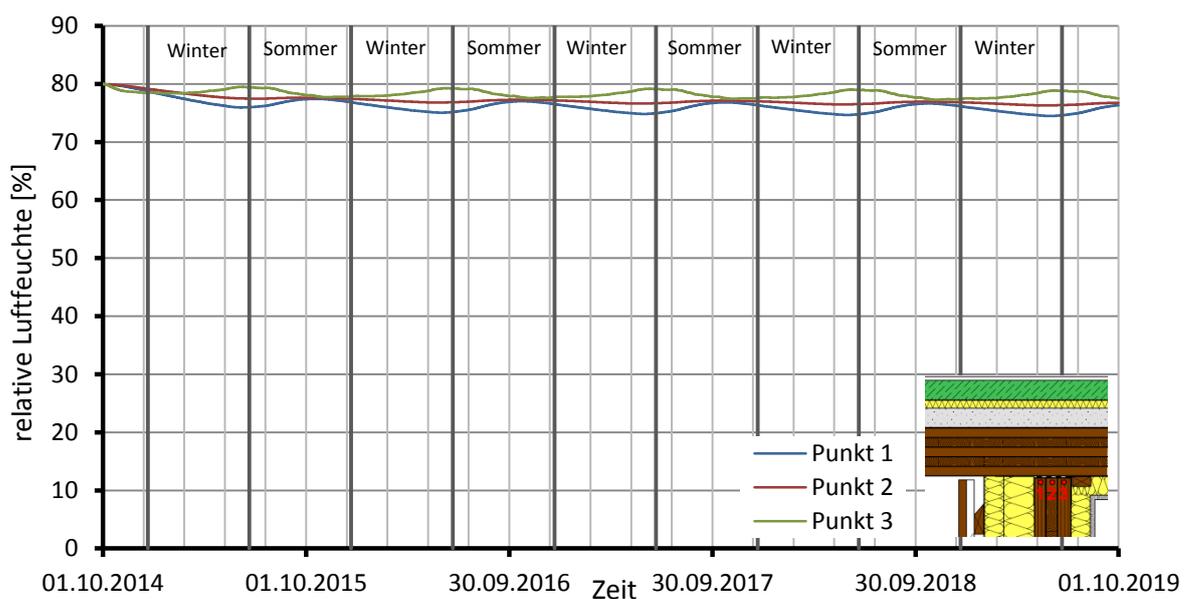
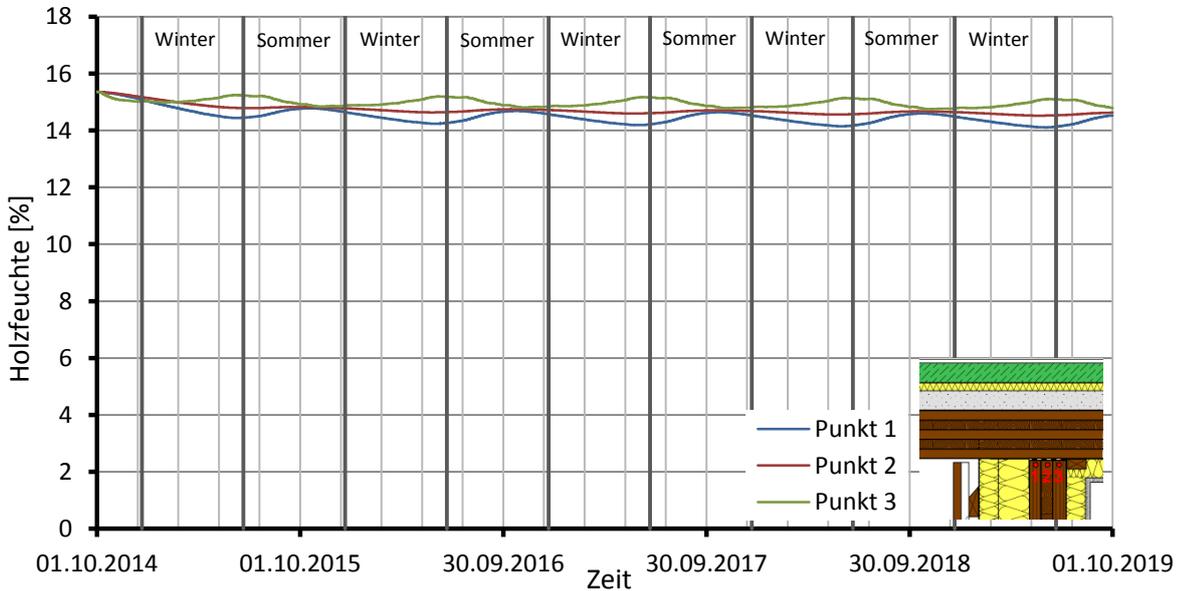


Abbildung 4.166: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 1-3

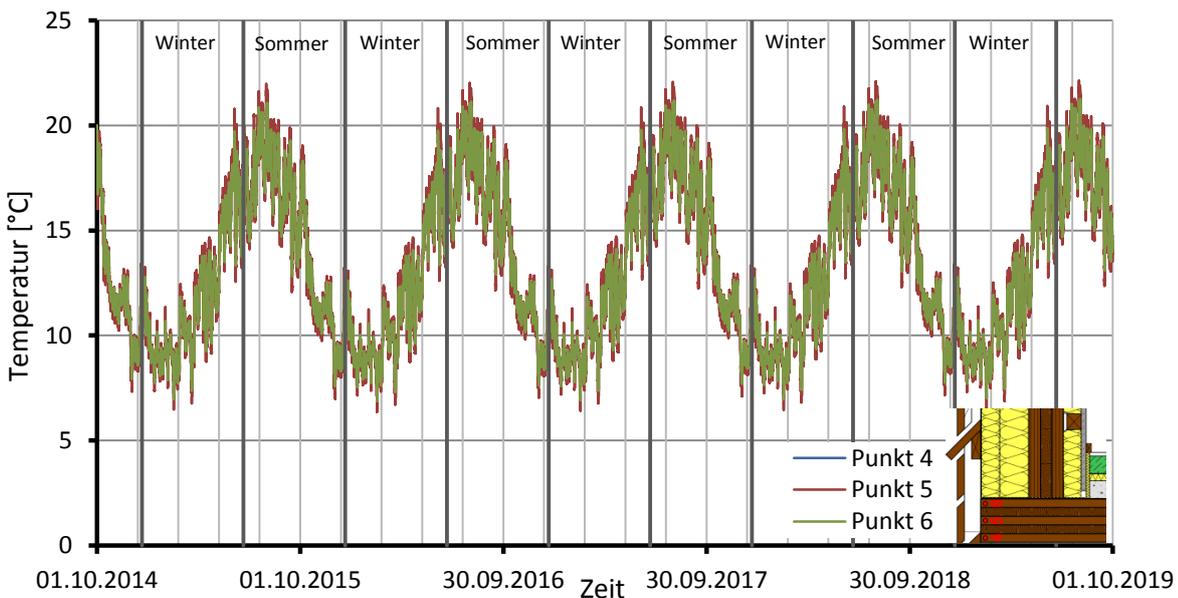
Bei Betrachtung der Ganglinien in Abbildung 4.166 ist jedoch eine erhöhte relative Luftfeuchte im Bereich der äußeren Einzelschicht zu erkennen, während die beiden inneren Schichten ähnliche Verläufe wie jene der Standardvariante zeigen. (vgl. Abbildung 4.154). In Punkt 1 beträgt die mittlere relative Luftfeuchte rund 73% und in den Punkten 2 und 3 rund 75% bzw. 77%.



*Abbildung 4.167: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3*

Die Holzfeuchte (siehe Abbildung 4.167) schwankt aufgrund der stärkeren Austrocknungsmöglichkeiten stärker und liegt somit zwischen rund 13% und 15%. In der mittleren und inneren Einzelschicht liegen beinahe konstante Verläufe um die 15% vor. Im Vergleich liegt die Holzfeuchte aufgrund der erhöhten relativen Luftfeuchte um etwa 1% höher als bei der Standardvariante.

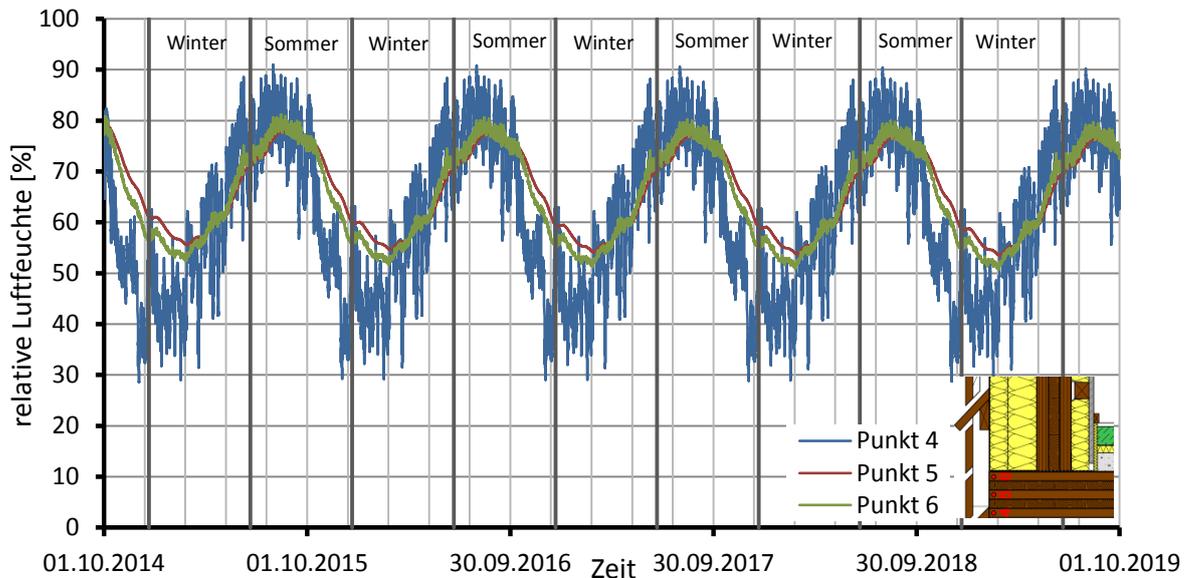
#### Punkte 4 – 6



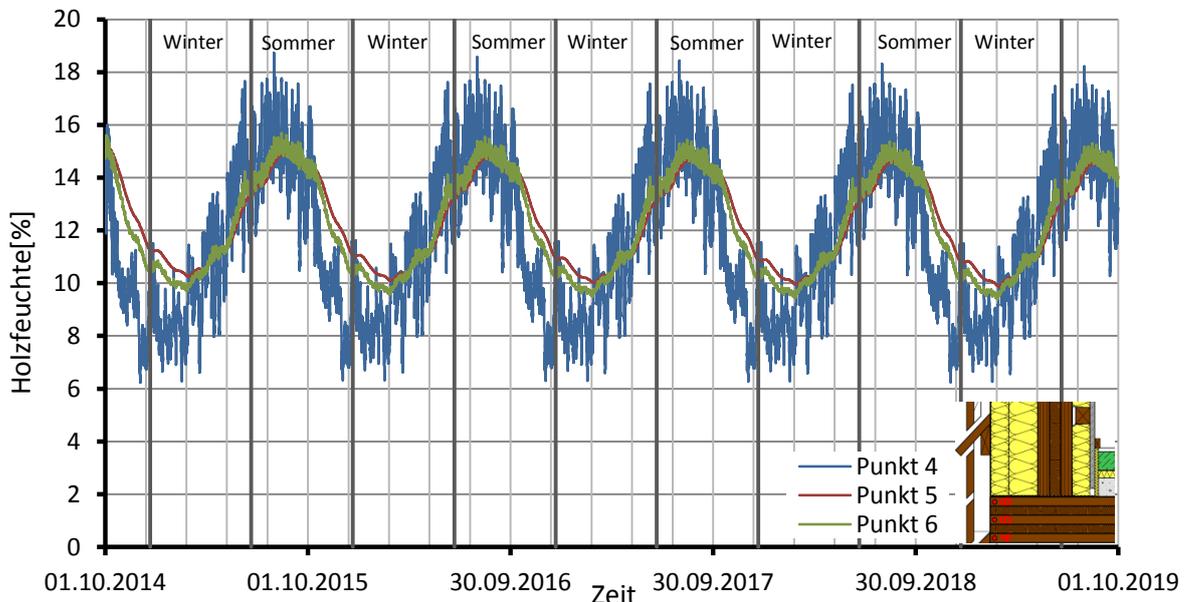
*Abbildung 4.168: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6*

Bei Betrachtung der Ganglinien der Temperatur in Abbildung 4.168 erkennt man den starken Einfluss des Außenklimas an den starken Schwankungen und dem breiten Schwankungsbereich zwischen rund 7°C und 22°C. Durch den Wegfall der Dämmung ist die Stirnseite der BSP-Decke lediglich gegen Schlagregen durch die äußere Holzschalung geschützt und weist daher keinen sonstigen Wärmeschutz auf.

Auch in Abbildung 4.169 sind die starken Schwankungen, vor allem im äußersten Punkt 4, der relativen Luftfeuchte zu erkennen. Da die Punkte 5 und 6 nicht unmittelbar der Witterung ausgesetzt sind, verlaufen die Ganglinien etwas glatter bzw. ohne auffällig starke Schwankungen.



*Abbildung 4.169: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6*

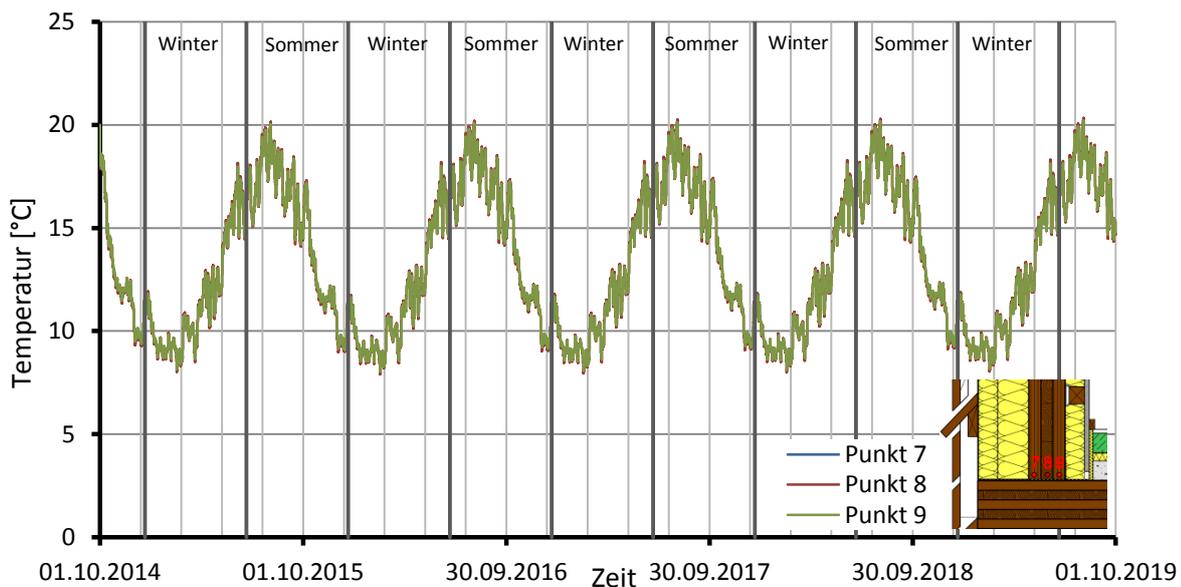


*Abbildung 4.170: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6*

Da die Holzfeuchtigkeit (siehe Abbildung 4.170) im Allgemeinen von der relativen Luftfeuchte abhängt, sind die Ganglinien beider Größen affin zueinander. Die Aufnahme bzw. Abgabe der Holzfeuchte findet unterhalb des Sättigungsbereiches (rund 30%) im Wesentlichen durch Diffusion statt, weshalb sich die Randbereiche der BSP-Decke relativ rasch dem Umgebungsklima anpassen (siehe Punkt 4) da die inneren Bereiche mehr Zeit zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte benötigen. Durch die Differenz der Holzfeuchte zwischen den äußeren und den inneren Schichten entsteht ein Feuchtegefälle, wobei dieser Feuchtegradient im konkreten Beispiel nur von der Klimabeanspruchung abhängig ist. Beim Schwinden in den Randzonen wird die Volumenänderung durch das Querschnittsinnere behindert, und es entstehen Spannungen. Die Ränder erfahren hierbei Querkzugbeanspruchungen, während es im Inneren zu Druckspannungen kommt. Überschreitet nun die Querkzugspannung am Rand die Querkzugfestigkeit des Holzes, kommt es zu Rissen an der sichtbaren Unterseite der BSP-Decke.

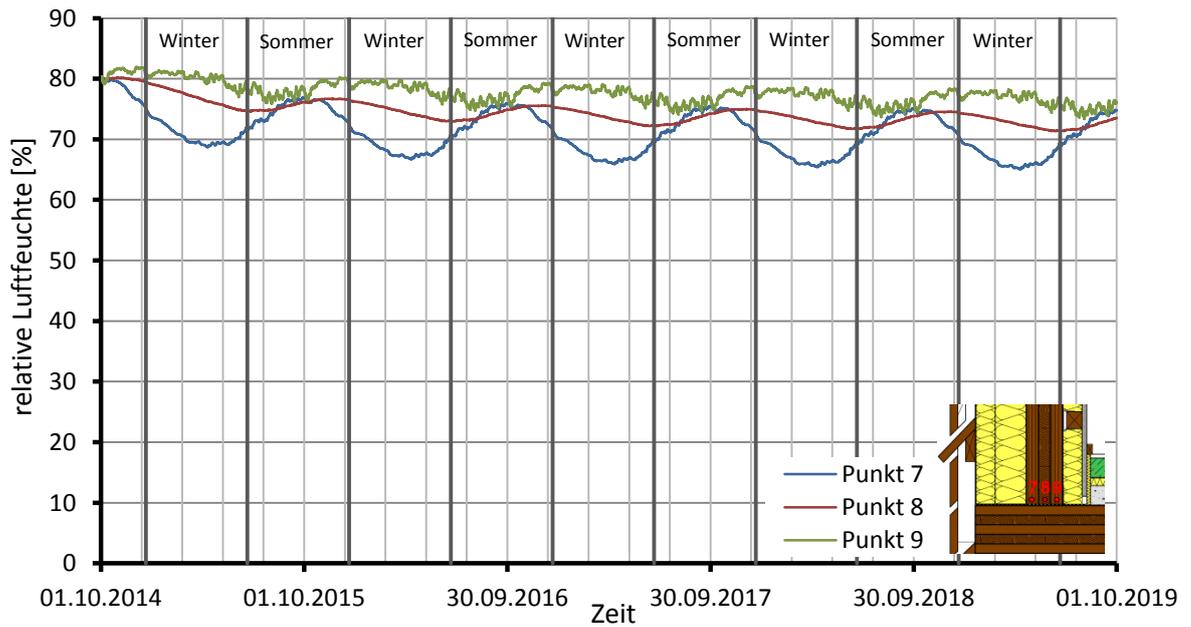
**Punkte 7 – 8**

Die in Abbildung 4.171 dargestellten Verläufe der Temperatur bewegen sich gegenüber jenen der Punkte 4-6 in einem geringeren Temperaturbereich und liegen damit zwischen rund 9°C und 20°C. Der Grund liegt einerseits an der Außendämmung der BSP-Wand und andererseits an der, durch die Decke, geschützten Unterseite der Wand. Ein Vergleich mit den Verläufen aus Kapitel 4-14.2 lässt nur einen geringen Unterschied von rund 2°C in den Sommermonaten erkennen. Das bedeutet, dass der Bereich der Monitoring-Positionen 7 bis 8 auch ohne zusätzliche Außendämmung relativ gut durch die BSP-Decke gedämmt wäre.



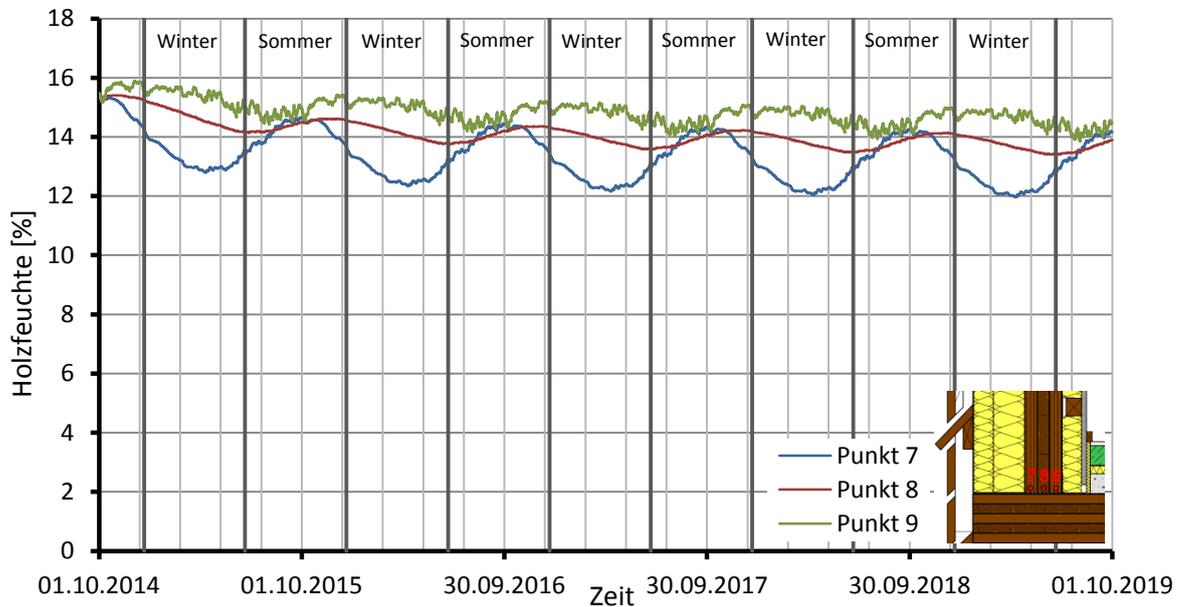
*Abbildung 4.171: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9*

Die relative Luftfeuchte im äußeren Punkt 7 bewegt sich zwischen 65% und 75% und orientiert sich stärker am Außenklima als jene der Punkte 8 und 9. In der mittleren Schicht nimmt die relative Luftfeuchte bereits einen homogenen Verlauf an und liegt im Mittel bei rund 73%. Der gezackte Verlauf in Punkt 9 deutet auf das stärker einflussnehmende Innenklima hin. Alle drei Verläufe zeigen eine über die Jahre klar abnehmende Tendenz und nähern sich jeweils in den Sommermonaten zu fast identen Werten an.



*Abbildung 4.172: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 7-9*

Die Holzfeuchte liegt im Mittel bei etwa 14%, wobei die Maximalwerte in den Wintermonaten auf der Innenseite der BSP-Wand mit etwa 15% erreicht werden. Die Annäherung der Ganglinien im Sommer beruht auf der Tatsache, dass in den Sommermonaten für einen gewissen Zeitraum innen und außen gleich hohe Temperaturen herrschen und die Dampfdiffusion aufgrund des fehlenden Partialdruckgefälles zum Erliegen kommt.



*Abbildung 4.173: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9*

Abschließend sind in den Abbildung 4.174 bis Abbildung 4.176 die Umhüllenden der Holzfeuchte über den BSP-Querschnitt dargestellt.

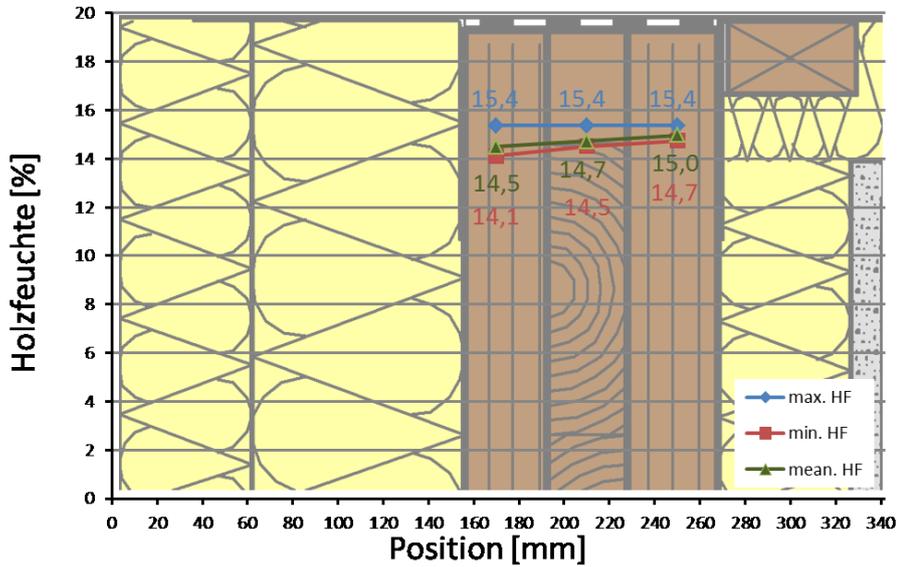


Abbildung 4.174: Umhüllende der Holzfeuchte in den Punkten 1-3

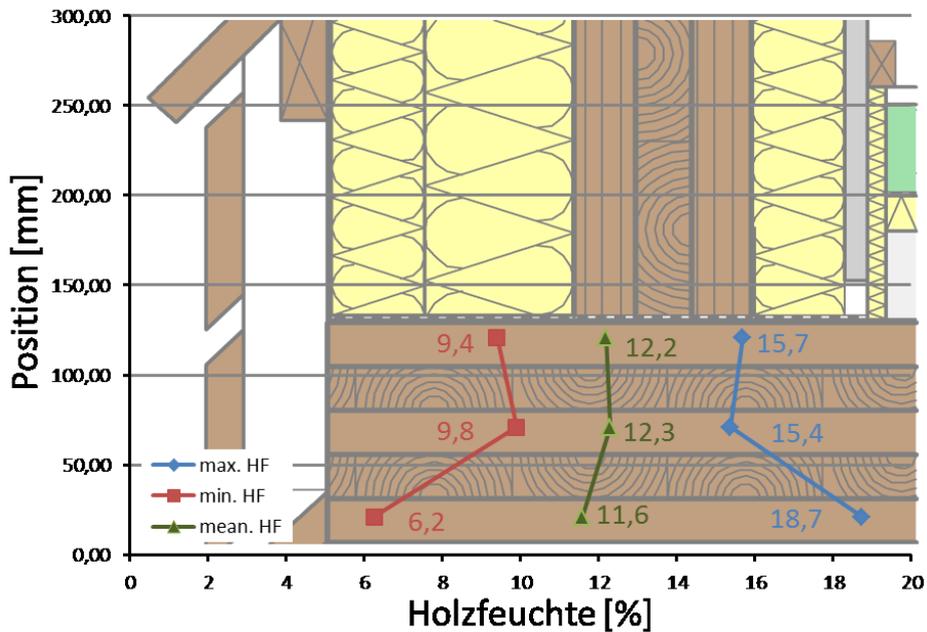


Abbildung 4.175: Umhüllende der Holzfeuchte in den Punkten 4-6

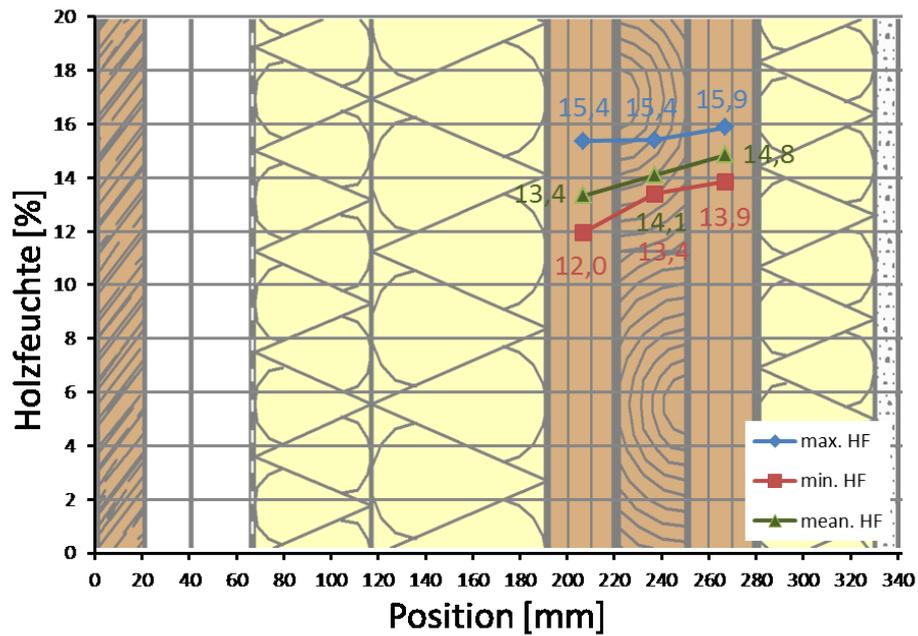


Abbildung 4.176: Umhüllende der Holzfeuchte in den Punkten 7-9

#### 4-14.4 DECKENAUSKRAGUNG MIT DARÜBER LIEGENDEM NASSRAUM

Da durch die zweilagige Abdichtungsebene auf der Innenseite des Nassraumes keine bzw. nur eine sehr geringe Dampfdiffusion stattfindet (siehe Abbildung 4.150), wird im Folgenden auf eine instationäre Analyse verzichtet.

## 4-15 BERECHNUNG DES SCHIMMELPILZRISIKOS

### 4-15.1 DECKENAUSKRAGUNG STANDARDVARIANTE

Abbildung 4.178 bis Abbildung 4.184 zeigen die Isolethendiagramme sämtlicher Monitoring-Positionen. In allen Punkten kommt es zu einer Überschreitung der LIM-Kurven weswegen eine Analyse mittels des biohygrothermischen Verfahrens notwendig ist. Die Diagramme zeigen, dass in es in den Punkten 1 – 3 zwar zu einer Überschreitung der LIM-Kurven kommt, jedoch fallen diese in den ersten ein bis zwei Jahren wieder ab, wodurch die entsprechenden Bedingungen für das Sporenwachstum nicht mehr gegeben sind. In den Monitoring-Positionen 4 – 6 kommt es allerdings zu einer relativen langen Überschreitung von vier Jahren. In Punkten 7 – 9 hingegen kann die Feuchtigkeit schneller ausdiffundieren, weswegen das Schimmelpilzrisiko hier geringer ist. Lediglich in Punkt 7 liegt der Wassergehalt etwas über dem für das Sporenwachstum notwendigen Wassergehaltes.

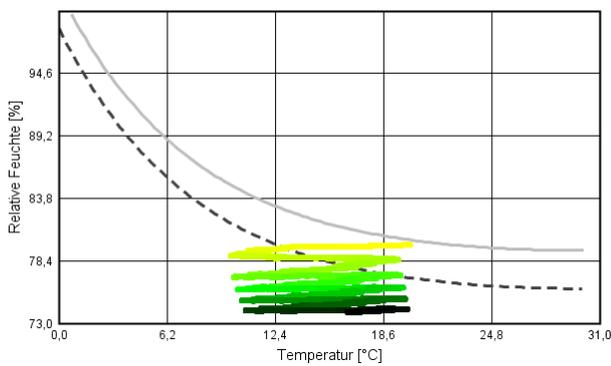


Abbildung 4.178: Isolethen Punkt 1

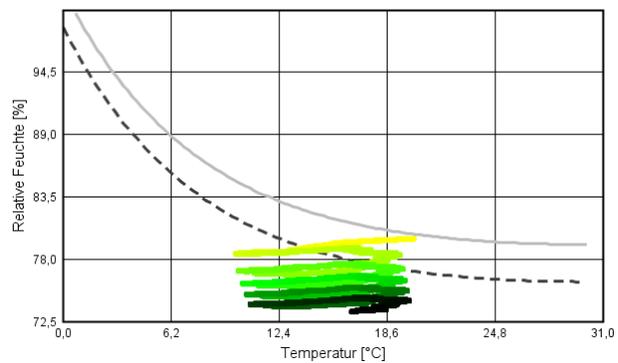


Abbildung 4.177: Isolethen Punkt 2

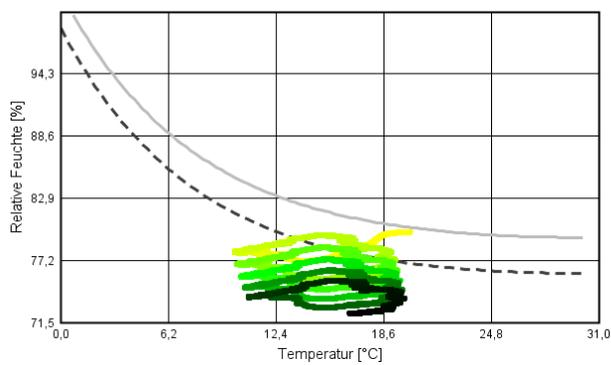


Abbildung 4.179: Isolethen Punkt 3

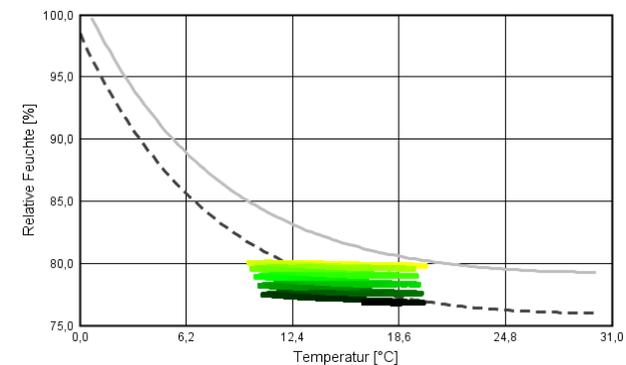


Abbildung 4.180: Isolethen Punkt 4

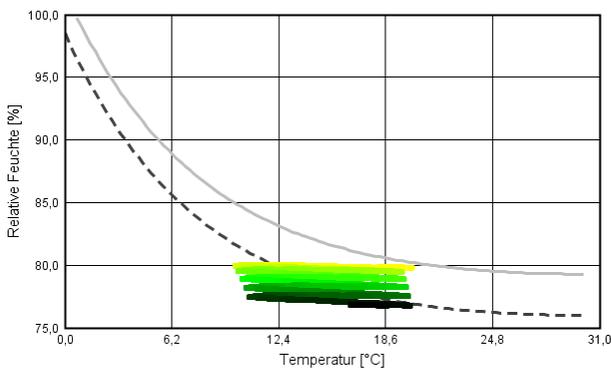


Abbildung 4.181: Isolethen Punkt 5

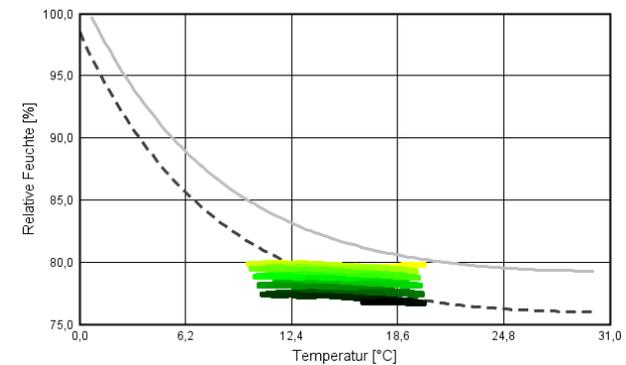


Abbildung 4.182: Isolethen Punkt 6

Abbildung 4.186 zeigt das Diagramm des biohygrothermischen Verfahrens in Punkt 1. Man erkennt, dass das Wachstum der Spore schon im ersten Frühling beginnt und in etwa 27 [mm/Jahr] beträgt. Danach fällt der Wassergehalt der Spore unter den Grenzwassergehalt und die Modells spore stoppt ihr Wachstum. Im darauffolgenden Frühling kommt es noch zu einer leichten Überschreitung und einem Wachstum von ca. 1 [mm/Jahr].

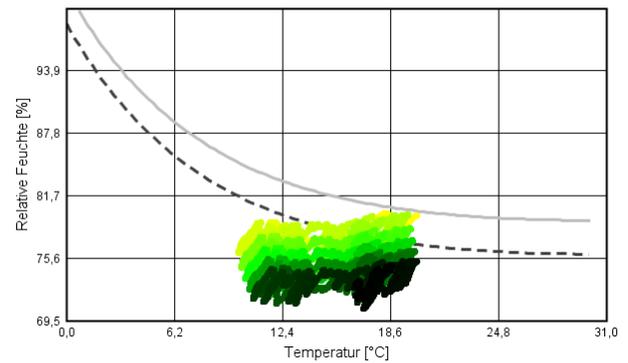


Abbildung 4.183: Isolethen Punkt 7

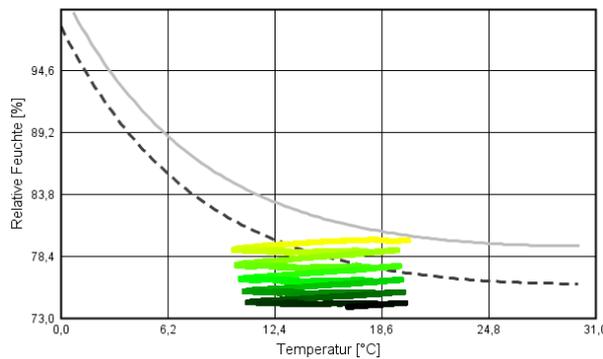


Abbildung 4.184: Isolethen Punkt 9

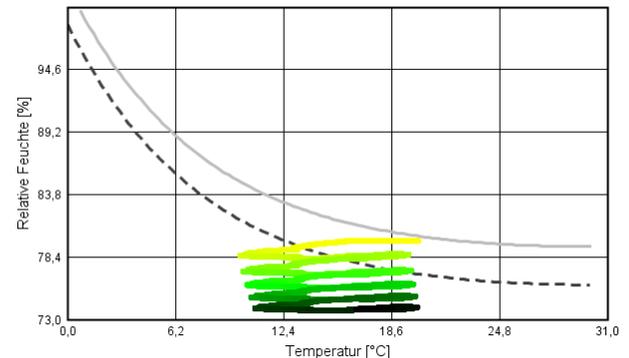


Abbildung 4.185: Isolethen Punkt 8

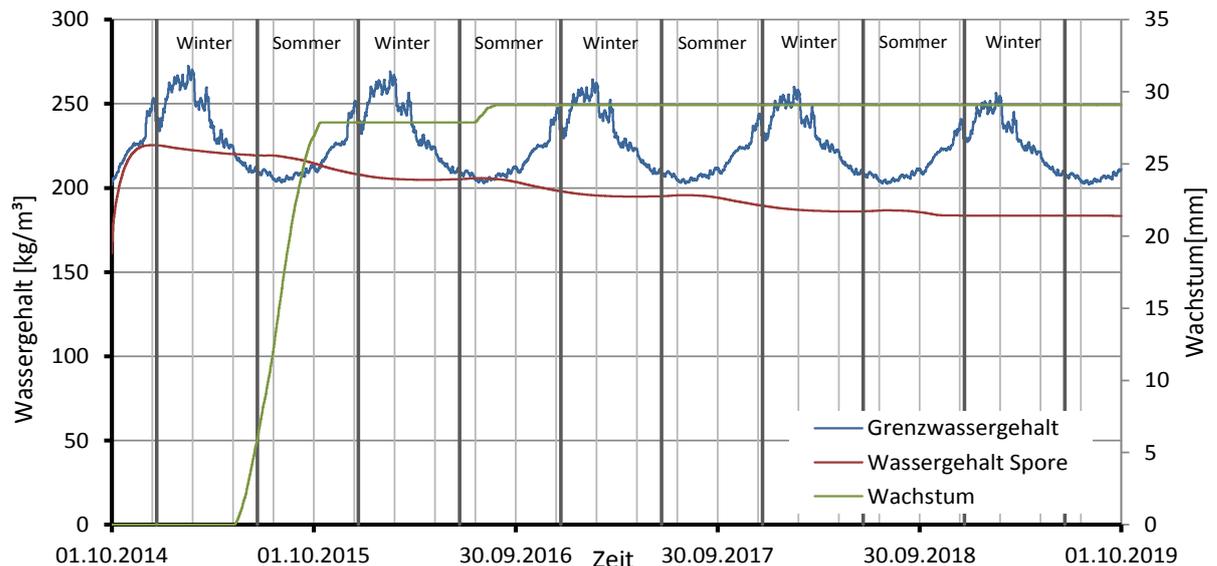
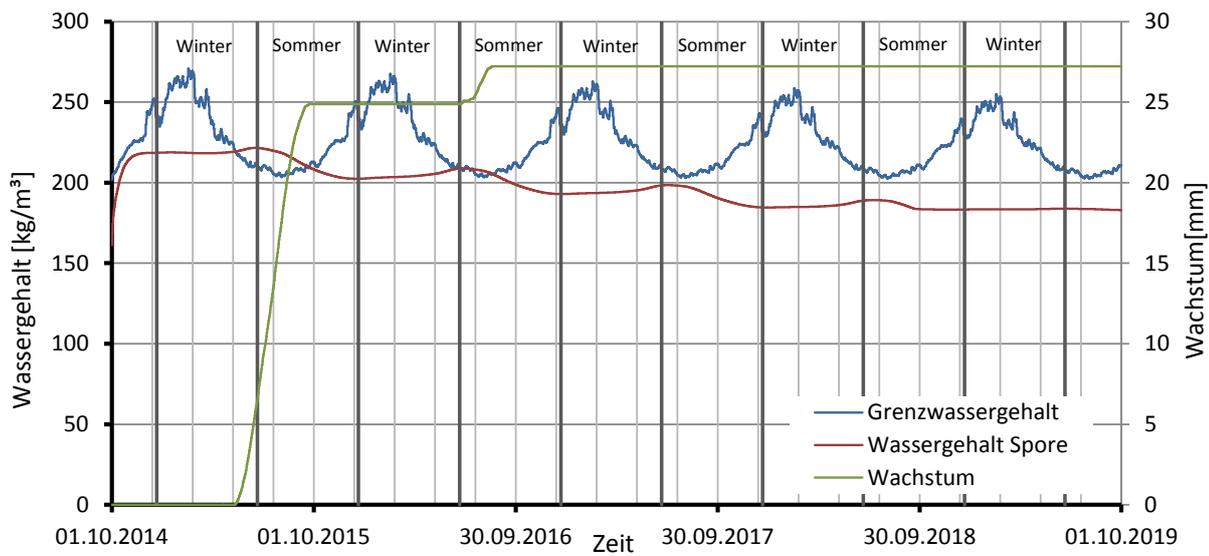


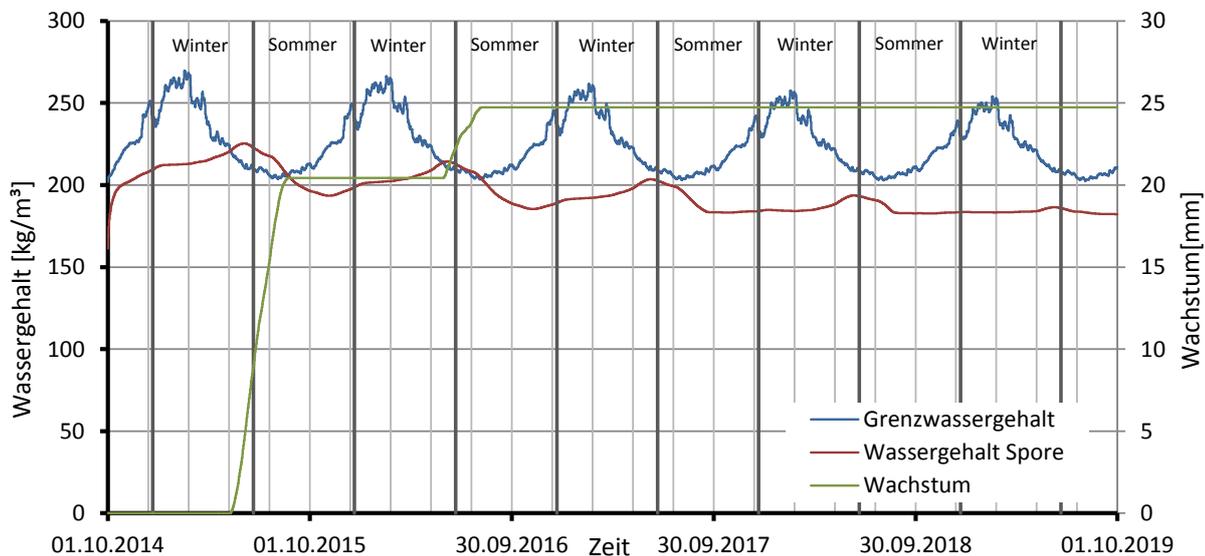
Abbildung 4.186: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 1

Ein ähnliches Bild zeigt sich in Monitoring-Position 2. Hier unterscheidet sich ausschließlich die Wachstumsrate der Spore in den ersten zwei Jahren des Berechnungszeitraumes. Diese liegt im ersten Jahr mit 25 [mm/Jahr] etwas unter jener in Punkt 1 und im zweiten Jahr mit rund 3 [mm/Jahr] etwas darüber.



**Abbildung 4.187: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 2**

Auch in Punkt 3 ist eine ähnliche Charakteristik zu erkennen. Im ersten Jahr kommt es zu einem Wachstum von rund 20 [mm/Jahr] und im zweiten zu fast 5 [mm/Jahr]. Tendenziell nimmt also das Wachstum der Modellspre im ersten Jahr von außen nach innen ab, während das Wachstum im zweiten Jahr von außen nach innen hin zunimmt. Wie schon in den vorangegangenen instationären Simulationen gefunden wurde, kommt es bei Betrachtung der gesamten Berechnungsdauer an der Innenseite von Bauteilen aus Brettsperholz zu einer durchschnittlich höheren Holzfeuchte als außen. Die Feuchtigkeit kann im konkreten Fall innen länger gehalten werden (siehe Abbildung 4.155) was das Wachstum im Folgejahr fördert.



**Abbildung 4.188: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 3**

Die folgenden Abbildungen zeigen das Sporenwachstum in den Punkten 4 – 6, welche in der Stirnseite der BSP-Decke liegen. Das Wachstum beträgt in Punkt 4 in den ersten zwei Jahren bereits 60 [mm/Jahr] und erreicht damit ein Wachstum von insgesamt 120 [mm]. Im dritten Jahr halbiert sich das Wachstum allerdings auf 30 [mm/Jahr] und im vierten Jahr ist nur Zunahme von 10 [mm/Jahr] möglich. Die Ursache für diese langanhaltenden Wachstumsbedingungen liegt an der auf der Stirnseite angebrachten

Winddichtungsbahn. Zwar wurde bei der Simulation eine diffusionsoffene Folie mit einem  $S_d$  – Wert von 0,2 [m] gewählt, jedoch schränkt auch eine solche Winddichtung die Diffusionsoffenheit lokal ein und vermindert dadurch das Austrocknungspotential.

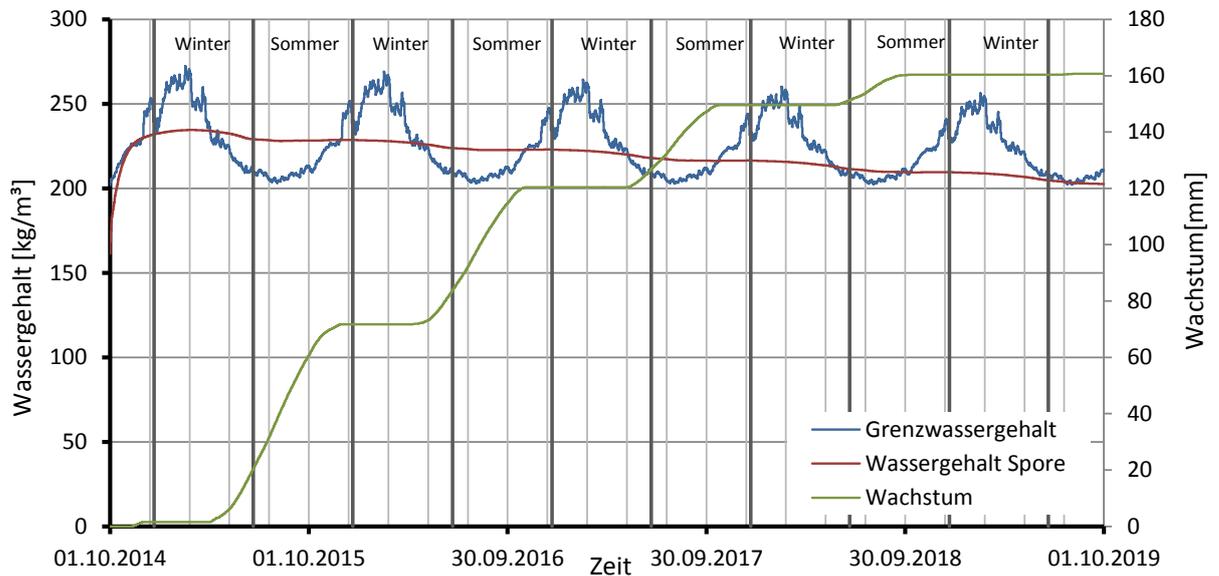


Abbildung 4.189: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 4

Fast ident verlaufen der Wassergehalt der Spore und das Wachstum in Punkt 5 und 6 (siehe Abbildung 4.190 und Abbildung 4.191), weswegen an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird.

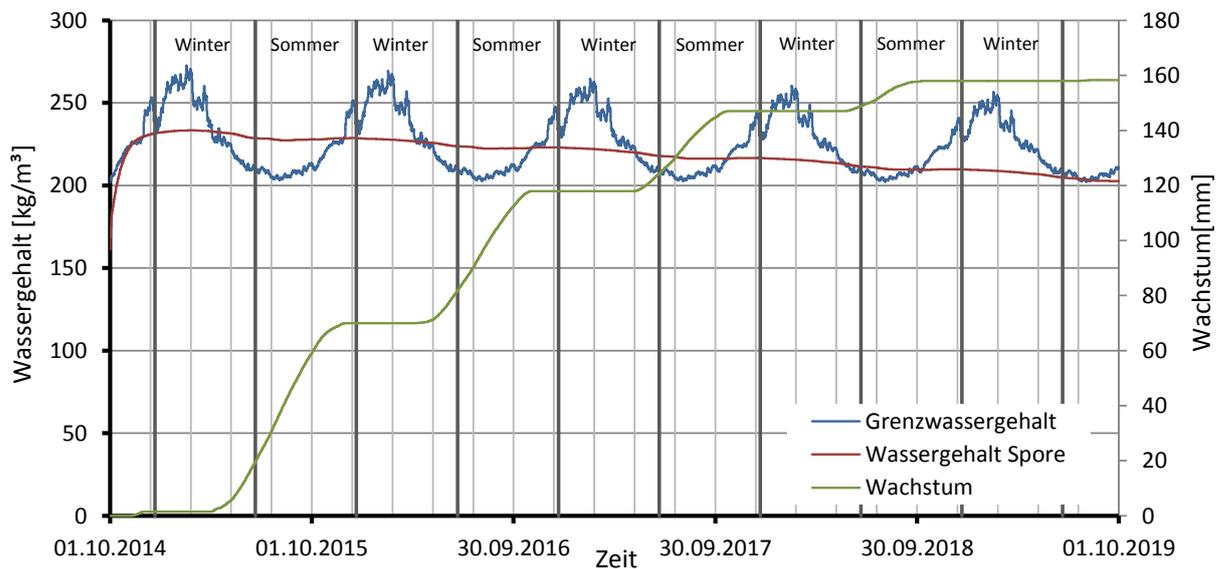
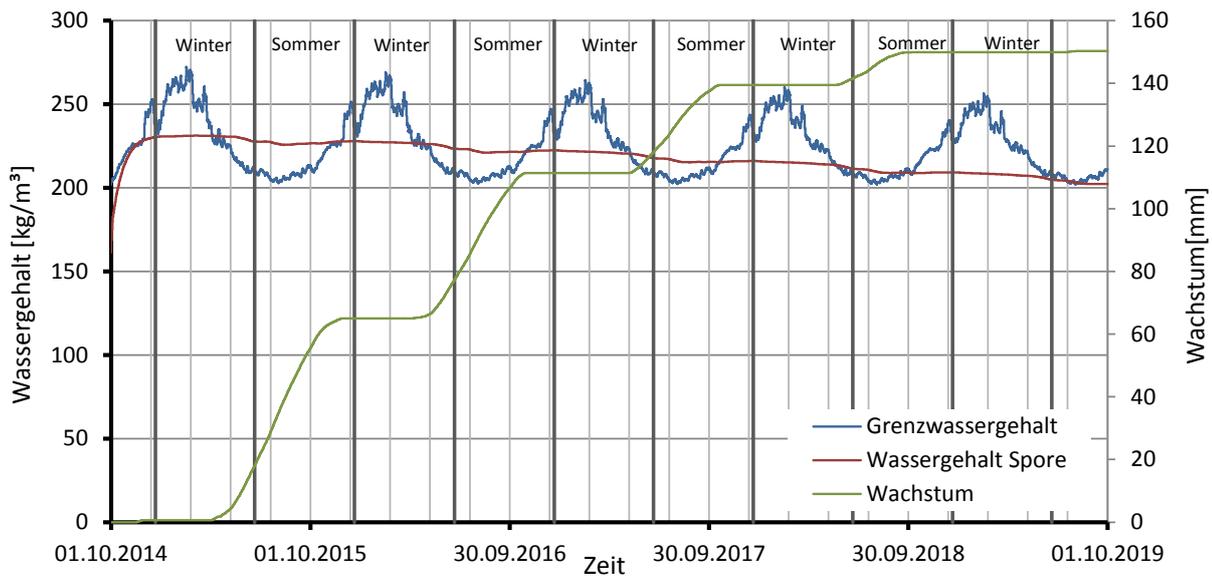


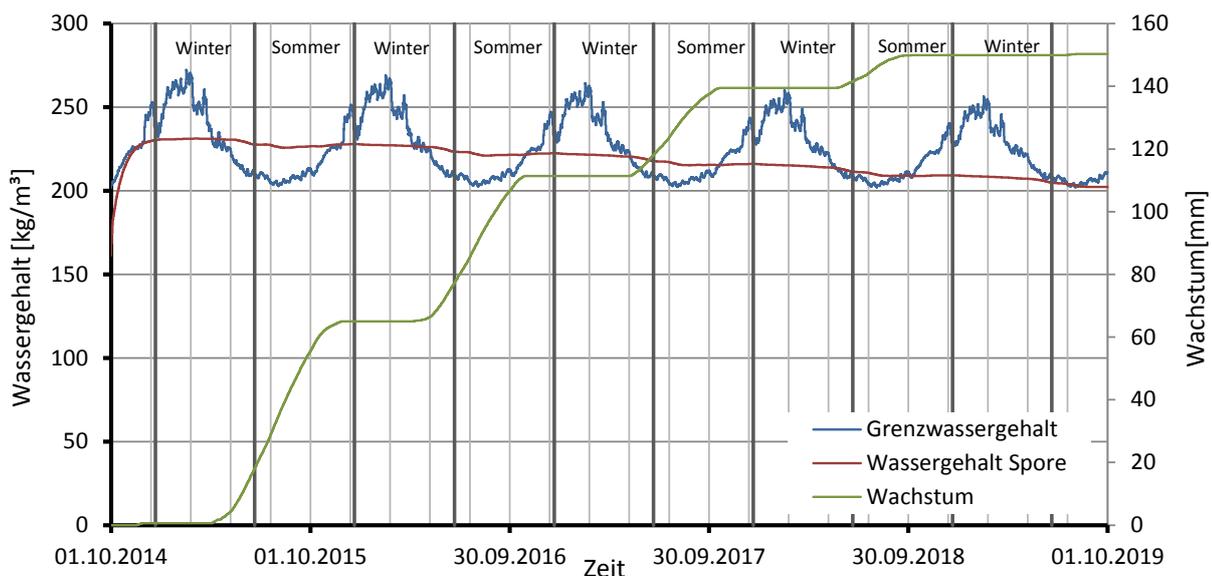
Abbildung 4.190: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 5



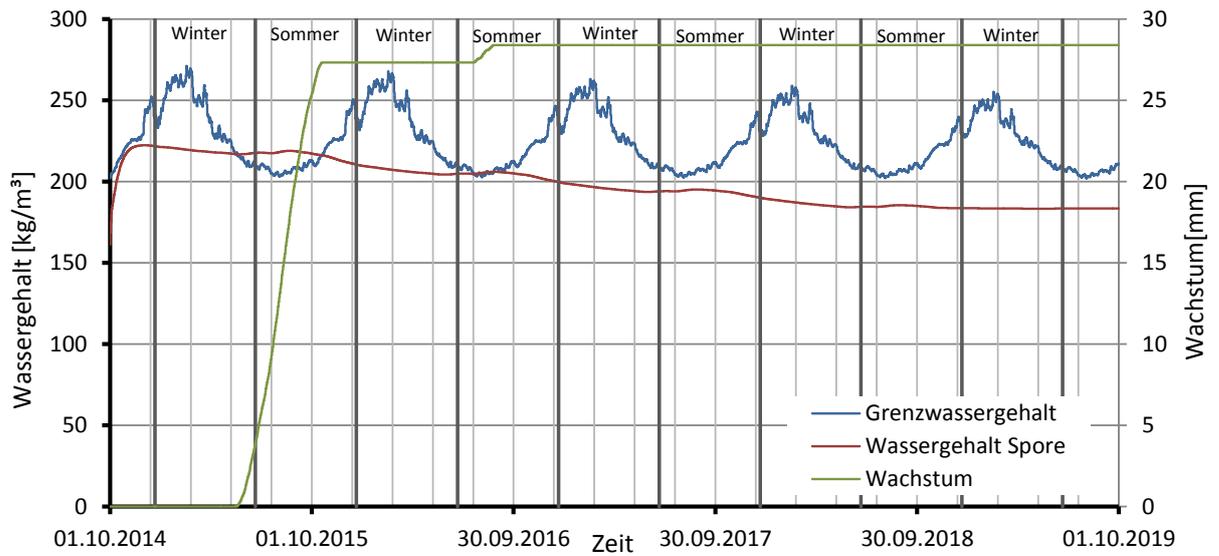
**Abbildung 4.191: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 6**

In Abbildung 4.192 ist die biohygrothermische Auswertung in Monitoring-Position 7 zu sehen. Im ersten Jahr findet hier eine Überschreitung des Sporengrenzwassergehaltes statt und damit ein Wachstum der Modellspore von rund 18 [mm/Jahr]. Im zweiten Jahr kommt es zwar noch zu einem leichten Wachstum von etwa einem Millimeter, jedoch genügt das Austrocknungspotential, um im darauffolgenden Jahr ein weiteres Wachstum zu unterbinden.

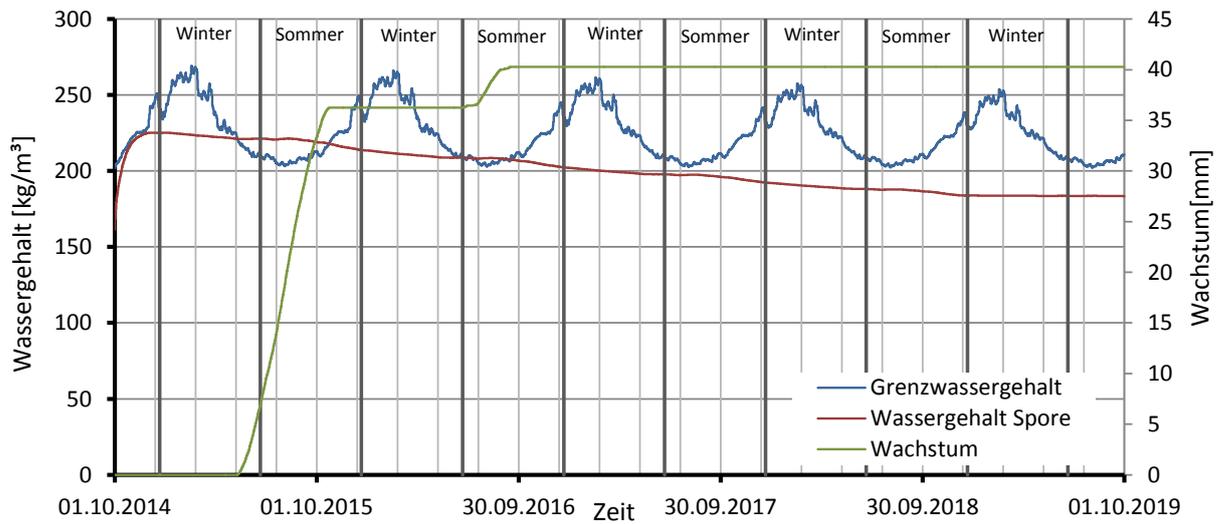
Da die maßgebenden Punkte für die Beurteilung des Schimmelpilzrisikos jene der Monitoring-Positionen 4 bis 6 sind, wird der Vollständigkeit halber die biohygrothermische Auswertung für die Monitoring-Positionen 8 und 9 in Abbildung 4.193 und Abbildung 4.194 dargestellt, die Verläufe jedoch nicht weiter interpretiert.



**Abbildung 4.192: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 7**



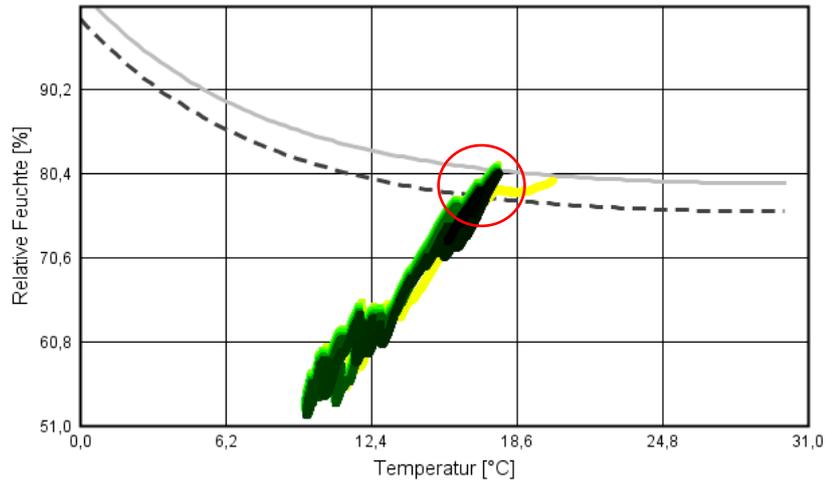
*Abbildung 4.193: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 8*



*Abbildung 4.194: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 9*

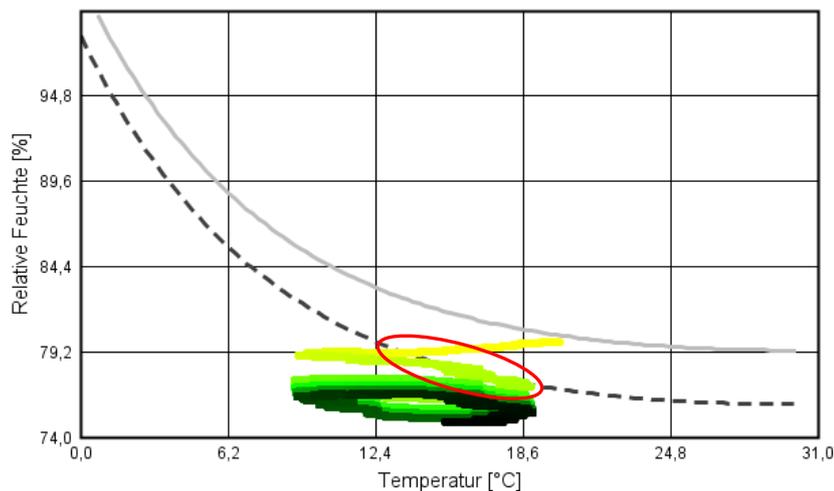
## 4-15.2 DECKENAUSKRAGUNG MIT UNGEDÄMMTER UNTERSEITE

In Abbildung 4.195 sind die Isoplethen in Punkt 1 (siehe Abbildung 4.195) zu sehen wobei diese die LIM-Kurven deutlich für einen längeren Zeitraum überschreiten (rote Markierung) und somit ein Risiko der Schimmelpilzbildung gegeben ist.



*Abbildung 4.195: Isoplethen Punkt 1*

Auch bei Monitoring-Position 9 (siehe Abbildung 4.196) ist eine geringe Überschreitung (rote Markierung) zu erkennen. Da es bei allen übrigen Monitoring-Positionen zu keiner Überschreitung der LIM-Kurven kommt, wird im Folgenden das biohygrothermische Verfahren nur für die Monitoring-Positionen 1 und 9 durchgeführt.



*Abbildung 4.196: Isoplethen Punkt 9*

In Punkt 1 beginnt das Sporenwachstum bereits kurz nach dem ersten Winter und beträgt rund 15 [mm/Jahr]. Allerdings nimmt der Wassergehalt der Spore stetig ab und das Sporenwachstum beträgt nach 5 Jahren nur noch rund 5,0 [mm/Jahr]. Diese Tendenz spricht zwar grundsätzlich für ein gutes Austrocknungspotential, jedoch kann ein erstmal auftretender Schimmelpilz nur noch schwer aus dem Bauteil wieder entfernt werden.

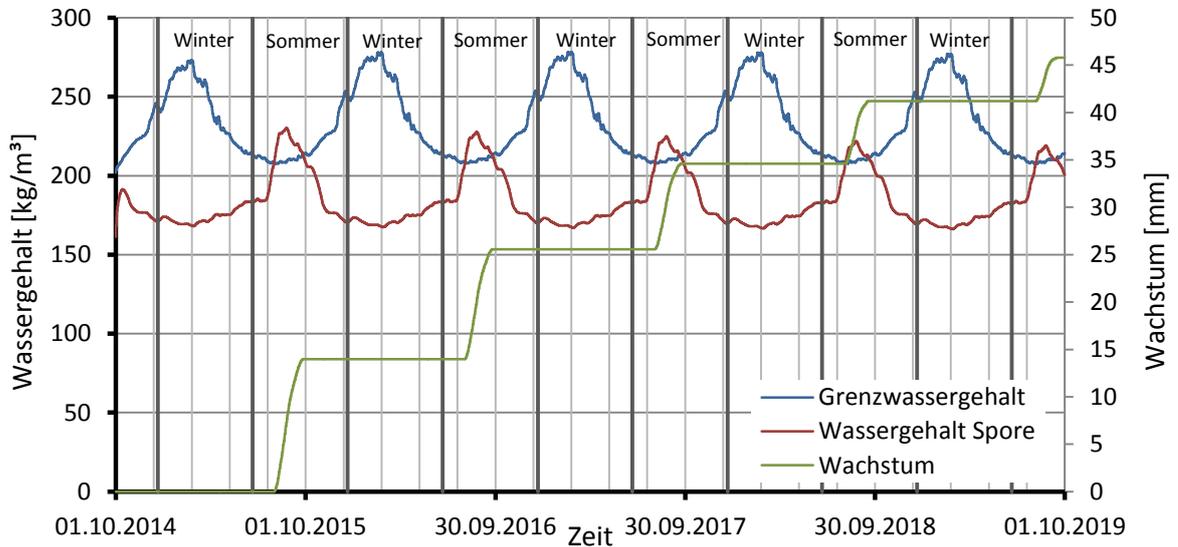


Abbildung 4.197: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 1

Weniger bedenklich zeigt sich das Verhalten der Spore in Punkt 9. Hier kommt es zwar auch im ersten Jahr zu einem Sporenwachstum von rund 8 [mm/Jahr], jedoch reduziert sich dieses bereits nach einem Jahr zu 0 [mm/Jahr].

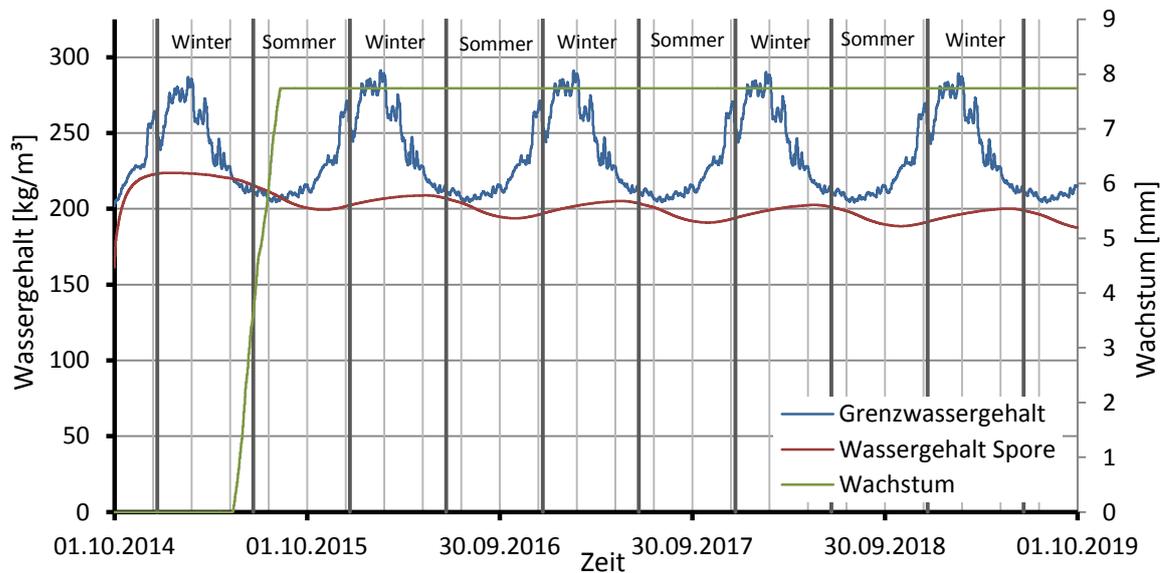


Abbildung 4.198: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 9

## 4-16 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Die folgenden Tabellen beinhalten jeweils die minimalen, maximalen und mittleren Werte von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte.

**Tab.: 48:** *Ergebnisse der Standardvariante mit gedämmter Unterseite*

Monitoring-Position	Temperatur [°C]			relative Luftfeuchte [%]			Holzfeuchte [M-%]		
	min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean
1	9,5	20,0	13,4	52,6	81,8	67,0	9,7	15,8	12,5
2	9,5	20,0	13,4	74,0	80,0	73,7	13,3	15,4	13,9
3	9,5	20,0	13,4	74,0	80,0	75,3	14,0	15,4	14,3
4	8,5	20,0	13,4	59,5	80,0	68,5	11,0	15,4	12,8
5	8,6	20,0	13,4	62,0	80,0	69,5	11,4	15,4	13,0
6	8,7	20,0	13,4	62,6	80,0	69,9	11,9	15,4	12,7
7	8,7	20,0	13,4	63,3	80,0	70,5	11,6	15,4	13,2
8	8,8	20,0	13,4	72,2	80,0	74,6	13,6	15,4	14,1
9	8,9	20,0	13,4	75,1	80,0	77,0	14,3	15,4	14,7

**Tab.: 49:** *Ergebnisse der Variante mit ungedämmter Unterseite*

Monitoring-Position	Temperatur [°C]			relative Luftfeuchte [%]			Holzfeuchte [M-%]		
	min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean
1	9,3	20,0	13,4	74,5	80,0	76,2	14,1	15,4	14,5
2	9,3	20,0	13,4	76,3	80,0	77,2	14,5	15,4	14,7
3	9,4	20,0	13,4	77,3	80,0	78,3	14,7	15,4	15,0
4	6,4	22,1	13,3	28,6	91,0	61,1	6,2	18,7	11,6
5	6,9	21,3	13,3	53,5	80,0	65,8	9,9	15,4	12,3
6	7,1	13,3	13,3	50,7	81,2	65,1	9,4	15,7	12,2
7	7,9	20,3	13,3	65,0	80,0	71,1	12,0	15,4	13,4
8	8,0	20,2	13,3	71,4	80,2	74,4	13,4	15,4	14,1
9	8,2	20,1	13,3	73,4	81,9	77,7	13,9	15,9	14,8

## 4-17 FLACHDÄCHER

### 4-17.1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Flachdächer sind Dächer, die keine bzw. nur eine geringe Neigung aufweisen und dadurch viele nutzungsbedingte Vorteile mit sich bringen. Flachdächer können begehbar und/oder begrünt auch als Terrasse ausgeführt werden und bieten deswegen weitere Nutzungsmöglichkeiten. Ein weiterer Vorteil des Flachdaches ist die Nutzung der gesamten darunterliegenden Wohnfläche da hier eine Einschränkung durch geneigte Dachkonstruktionen entfällt. Außerdem besteht die Möglichkeit, durch entsprechende Dachelemente wie z.B. Lichtkuppeln die Räume unterhalb wesentlich attraktiver zu gestalten.

Aus bauphysikalischer Sicht lassen sich Flachdächer in den folgenden drei Kategorien unterscheiden.

- Kaltdach
- Warmdach
- Umkehrdach

Das Kaltdach unterscheidet sich vom Warmdach durch eine Luftschicht die es ermöglicht eingedrungenes Wasser durch Luftzirkulation wieder abzuführen. Beim Warmdach wird die Konstruktion durch eine Abdichtungsebene und eine raumseitige Dampfsperre oder Dampfbremse vor einem Feuchtigkeitseintrag geschützt. Beim Umkehrdach liegt die Abdichtungsebene unterhalb der Dämmung, dadurch wird die Abdichtung vor den starken Belastungen wie Temperaturschwankungen, Regen und Schnee besser geschützt. Abbildung 4.199 und Abbildung 4.200 zeigen jeweils einen Flachdachaufbau als Warmdach in Holz-Massivbauweise mit unterschiedlicher Attikaausbildung.

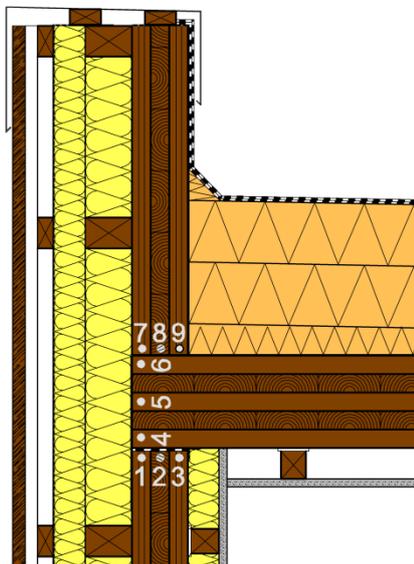


Abbildung 4.199: Flachdach Standardvariante (9)

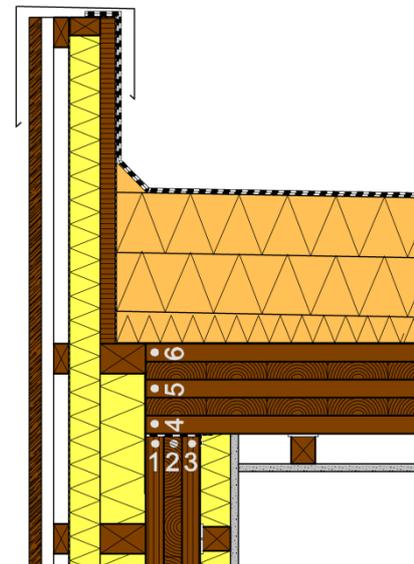


Abbildung 4.200: Flachdach (9)

## 4-17.2 UNTERSUCHTE FLACHDACHANSCHLÜSSE

### 4-17.2.1 Flachdach Standardvariante (Attikaausbildung mit BSP)

Die in Abbildung 4.201 dargestellte Flachdachausführung stellt eine oft publizierte Standardlösung dar. Der Wandaufbau entspricht jenem der Außenwand AW1 aus Kapitel 4-1.1 und wird in weiterer Folge nicht weiter untersucht. Der Flachdachaufbau FD1 ist als Warmdach ausgebildet und besteht aus einer außenliegenden, 2-lagigen Abdichtung aus Bitumenmembranen. Der Wärmeschutz wird mit zwei Lagen XPS-Dämmplatten sichergestellt wobei das Gefälle ebenfalls durch eine Gefälledämmplatte aus XPS erreicht wird. Das Gefälle des Flachdaches sollte, wie auch die Attikaverblechung, mindestens 2% betragen und über die gesamte Fläche keine Mulden bzw. Wassersäcke aufweisen. Die Attikaausbildung erfolgt mittels eines 3-schichtigen BSP-Elementes. Die Dampfbremse auf der Deckenoberseite wird dabei über die Attika hochgezogen, um während der Bauphase eine Notabdichtung zu ermöglichen bis die endgültige Abdichtung hergestellt ist.

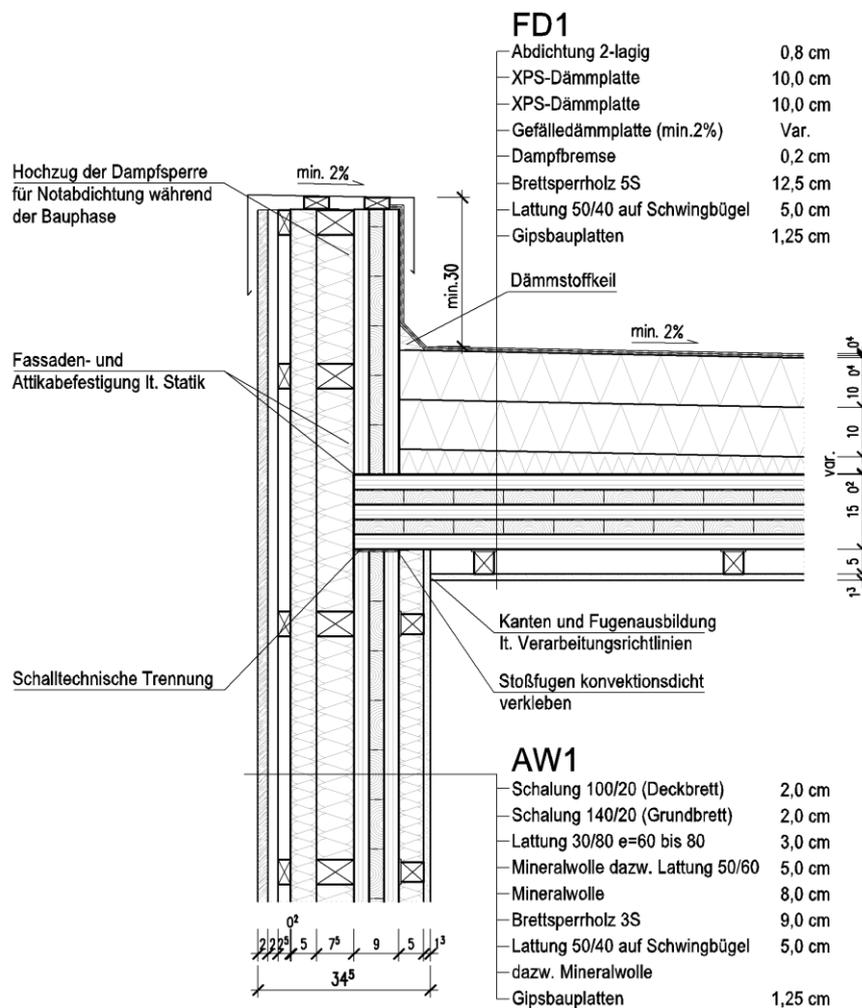


Abbildung 4.201: Flachdach Standardvariante (Attika mit BSP) (9)

### 4-17.2.2 Bauteilaufbau Flachdach FD1

Tab.: 50: Bauteilaufbau Flachdach FD1

Flachdach FD 1									
Nr.	Material	d [cm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m = d \cdot \rho$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	R [(m <sup>2</sup> K)/W]	$\mu$ [-]	Sd [m]	c [J/(kgK)]
Innen									
1	Gipsfaserplatte	1,25	850	1065,05	0,2	0,06	8,3	0,10	850
2	Polsterholz (dazw. Luft)	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Brettsperrholz 5S	12,50	410	5125,00	0,12	1,04	300/60	37,50	1300
4	Dampfbremse (PE)	0,20	950	190,00	0,35	0,01	100000	200,00	1
5	XPS-Dämmplatte	20,00	35	700,00	0,033	6,06	1	0,20	1450
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,80	1100	880,00	0,7	0,01	50000	400,00	1000
Aussen									

### 4-17.2.3 Flachdach Standardvariante (Attikaausbildung mit OSB)

Abbildung 4.202 zeigt ebenfalls das Flachdach als Warmdach jedoch erfolgt die Attikaausbildung mittels einer OSB-Platte. Der Wandaufbau AW1 und der Flachdachaufbau FD1 bleiben unverändert.

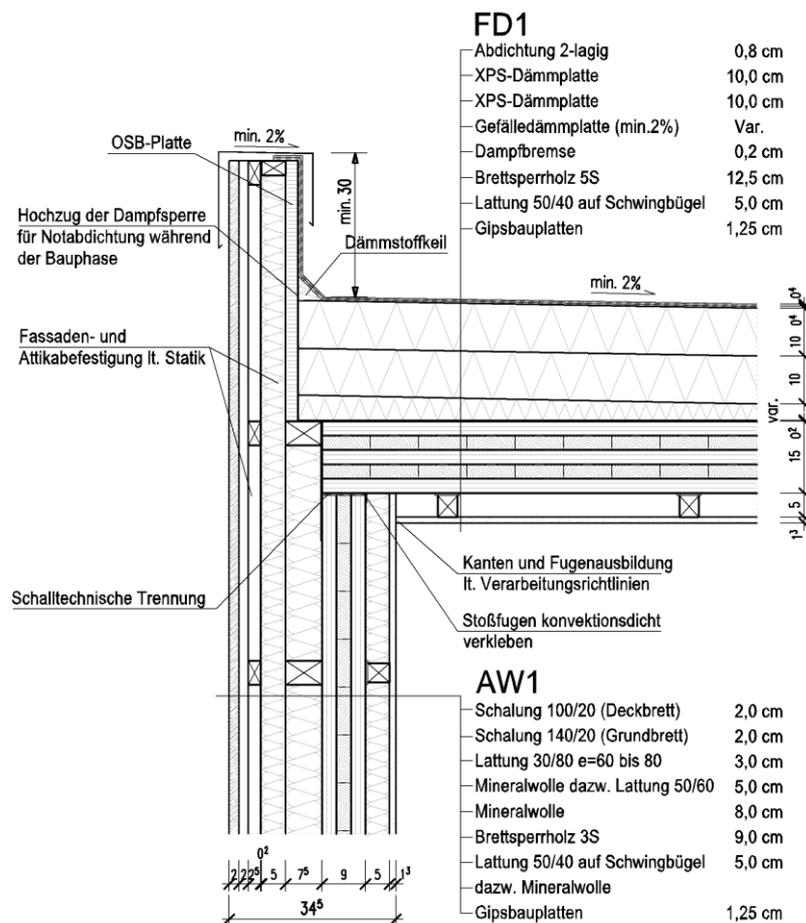


Abbildung 4.202: Flachdach Standardvariante (Attika mit OSB) (9)

### 4-17.3 STATIONÄRE BERECHNUNGEN

Für die stationären Berechnungen werden dieselben Randbedingungen wie in Kapitel 4-4.1 Teil A angesetzt.

#### 4-17.3.1 Berechnung des U-Wertes

Tab.: 51: Bauteilaufbau Flachdach FD1

Nr.	Material/Schicht	d	$\mu$	$sd = \mu \cdot d$	$\lambda$	R,Rsi,Rse	U = 1/R	$\Theta$	Ps
		m		m	W/(m <sup>2</sup> *K)	m <sup>2</sup> *(K/W)	1/m <sup>2</sup> *(K/W)	°C	Pa
								20,0	2337
	Wärmeübergang innen					0,13		19,4	2253
1	Gipsfaserplatte	0,013	10,0	0,125	0,200	0,063	16,000	19,1	2213
2	Polsterholz (dazw. Luft)	0,050	1,0	0,05	0,250	0,200	5,000	18,2	2090
3	Brettspertholz 5S	0,125	70,0	8,75	0,120	1,042	0,960	13,5	1543
4	Dampfbremse	0,002	15,0	0,03	0,510	0,004	255,000	13,4	1541
5	XPS-Dämmplatte	0,200	10,0	2	0,040	5,000	0,200	-9,4	274
6	Feuchtigkeitsabdichtung	0,080	8,0	0,64	0,800	0,100	10,000	-9,8	264
	Wärmeübergang außen					0,04		-12,8	202
				$\Sigma Sd =$	11,595	RT =	6,578		
						1/RT =	0,152		

Der U-Wert des Flachdachaufbaues FD1 errechnet sich zu  $U = 0,15 \text{ [W/m}^2\text{K]}$  und liegt damit  $0,05 \text{ [W/m}^2\text{K]}$  unter dem geforderten U-Wert für Decken gegen Außenluft von  $0,20 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ .

#### 4-17.3.2 Berechnung nach Glaser 1D

Wie in Abbildung 4.203 ersichtlich, schneidet der Verlauf des theoretischen Wasserdampfdruckes nie jenen des Sättigungsdampfdruckes. Der tatsächliche Wasserdampfdruck entspricht also dem theoretischen Wasserdampfdrucke und es kommt in keiner Bauteilschicht zu Bildung von Kondensat.

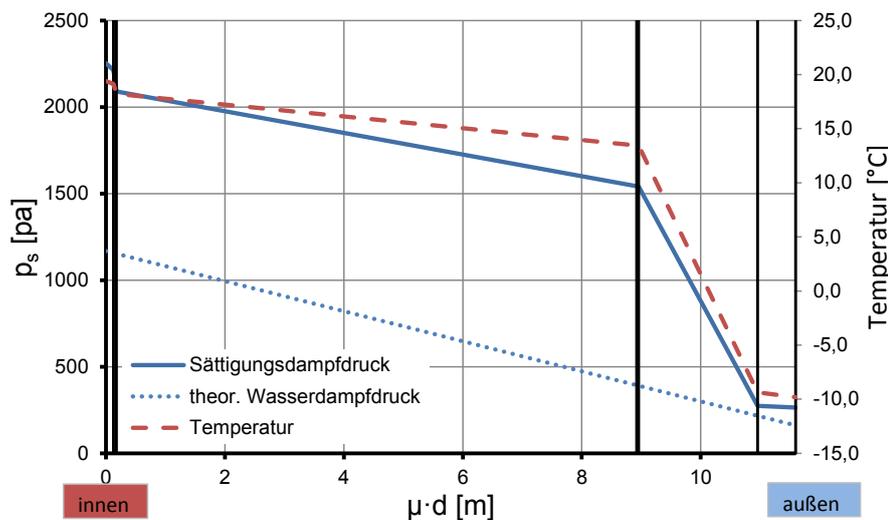


Abbildung 4.203: Verfahren nach Glaser: Flachdach FD1

### 4-17.3.3 Geometrische Randbedingungen

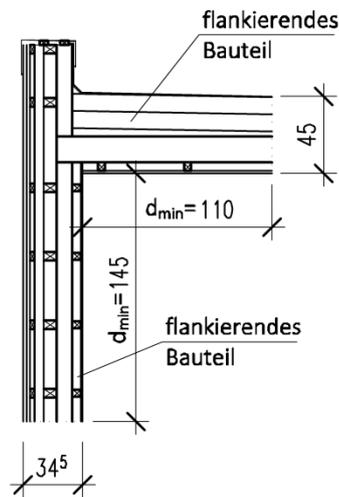


Abbildung 4.205: Standardvariante (Attika mit BSP)

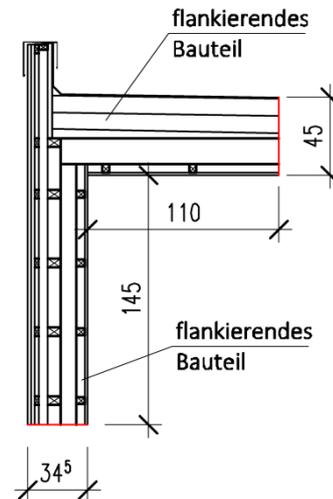


Abbildung 4.204: Standardvariante (Attika mit OSB)

## 4-17.4 BERECHNUNG NACH GLASER 2D

### 4-17.4.1 Standardvariante (Attika mit BSP)

Die nebenstehende Abbildung 4.206 zeigt die Isothermen im Bereich des Attikaanschlusses. Die minimale Oberflächentemperatur beträgt 19,6 [°C] und tritt an der Innenecke des Bauteilanschlusses auf (geometrische Wärmebrücke). Die Taupunkttemperatur liegt bei 9,3 [°C] und ist somit fast um die Hälfte geringer als die geringste erreichbare Oberflächentemperatur. Der  $f_{Rsi}$ -Faktor beträgt 0,986 [-] und liegt deutlich über den geforderten von 0,78 bzw. 0,67. Insgesamt bietet diese Detaillösung einen guten und mehr als ausreichenden Wärmeschutz. Am Verlauf der Isothermen lässt sich auch ein sehr geringer Wärmebrückeneinfluss erkennen. Diese folgen bereits in einem geringen Abstand von ungefähr 30 cm wieder den Bauteiloberflächen und weisen auch keine großen Sprünge auf.

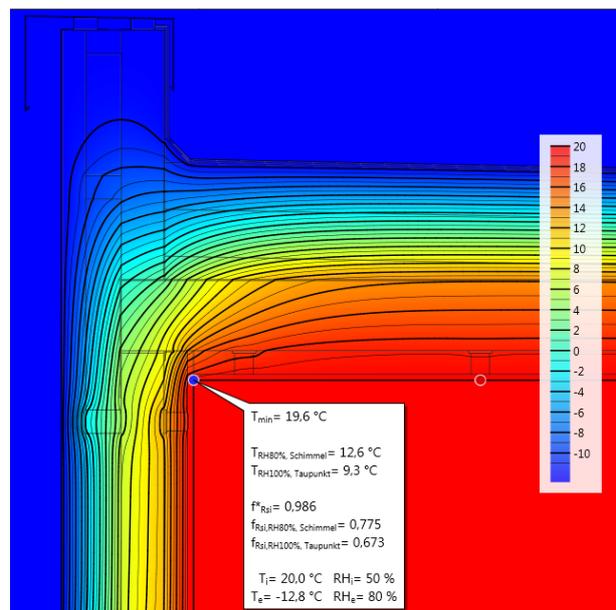


Abbildung 4.206: Oberflächentemperatur

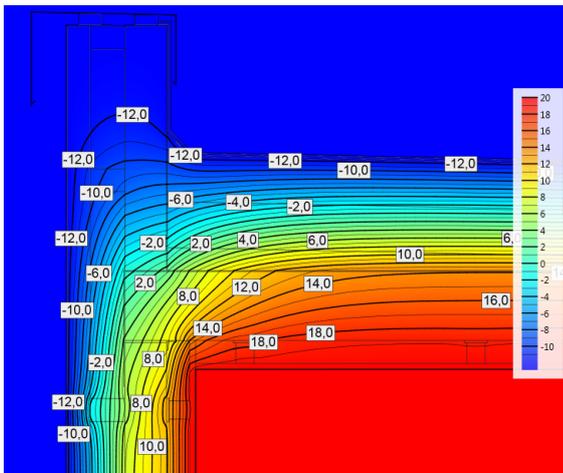


Abbildung 4.207: Isotherme

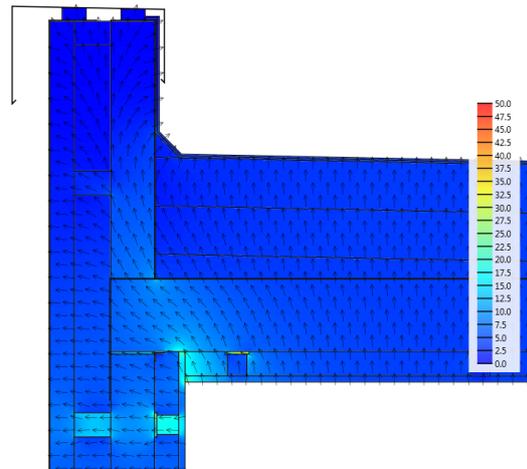


Abbildung 4.208: Wärmestrom

Bei Betrachtung des Wärmestromes (siehe Abbildung 4.208) sind lokale Wärmebrücken des Polsterholzes zu erkennen. Des Weiteren ist ein erhöhter Wärmefluss im Bereich des Deckenauflegers zu beobachten (siehe Vektoren). Dabei geht der größte Anteil der Wärmeenergie über den Attikabereich verloren und stellt durch seine exponierte Lage eine weitere geometrische Wärmebrücke dar.

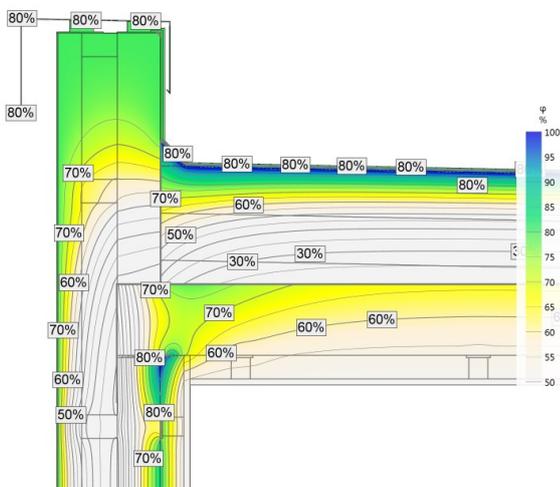


Abbildung 4.209: relative Feuchte  $\varphi$  [%]

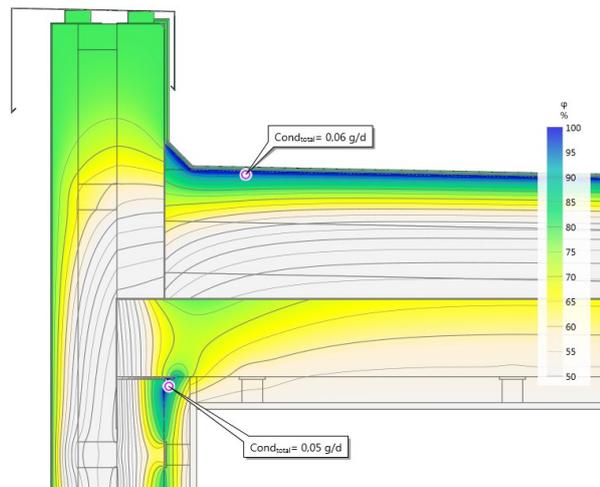


Abbildung 4.210: Kondensatmenge

Abbildung 4.209 zeigt die relative Feuchte im Bauteil wobei es hier an zwei Stellen zur Kondensatbildung kommt. Einerseits an der Innenecke, da es hier zu einem erhöhten Feuchtigkeitseintrag (siehe Abbildung 4.212) kommt, da das Klebeband zur Gewährleistung der Luftdichtheit den Diffusionsstrom unterbricht und somit ein Austrocknen in diesem Bereich verhindert. Andererseits unterhalb der Abdichtungsebene, da dieser Bereich ungedämmt ist, stark abkühlt und die Feuchtigkeit aufgrund der Feuchtigkeitsabdichtung nicht entweichen kann. Allerdings ist die anfallende Kondensatmenge für beide Bereiche mit 0,05 [g/d] bzw. 0,06 [g/d] sehr gering (siehe Abbildung 4.210). Bedenkt man außerdem dass solch extreme Außentemperaturen in unseren Breiten nur selten auftreten, kann diese geringe Kondensatmenge getrost vernachlässigt werden.

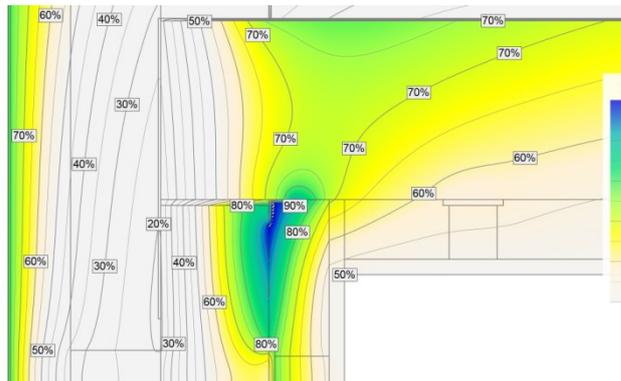


Abbildung 4.211: relative Feuchte  $\phi$  [%] im Detail

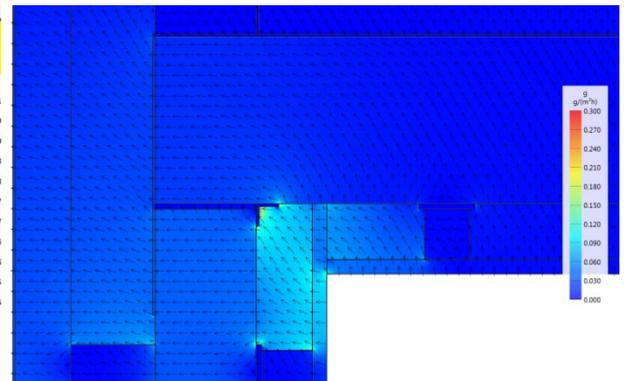


Abbildung 4.212: Diffusionsstrom im Detail

#### 4-17.4.2 Standardvariante (Attika mit OSB)

Abbildung 4.213 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der Oberflächentemperatur. Der Differenz beträgt dabei zur vorangegangenen Variante (Attika mit BSP) lediglich 0,1 [°C] und errechnet sich damit zu 19,5[°C]. Der  $f_{RSI}$ -Wert beträgt 0,984 [-] und somit nur marginal niedriger als bei der Variante mit BSP. Betrachtet man allerdings die Isotherme in Abbildung 4.214, so erkennt man einen nicht unerheblichen Unterschied von 2 [°C] in der Konstruktion. Während die 12°C–Isotherme in Abbildung 4.207 weit in die Attika hineinwandert, liegt diese nun bereits im Flachdachaufbau. Im Bereich des Deckenauflegers ergibt sich sogar ein Unterschied von 4 [°C], weshalb hier die Gefahr der Kondenswasserbildung höher ist.

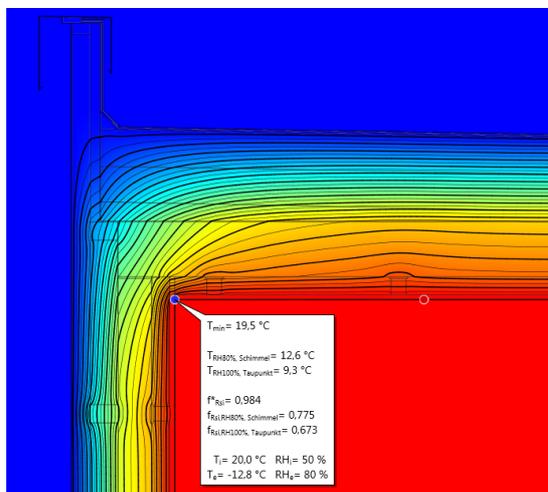


Abbildung 4.213: Oberflächentemperatur

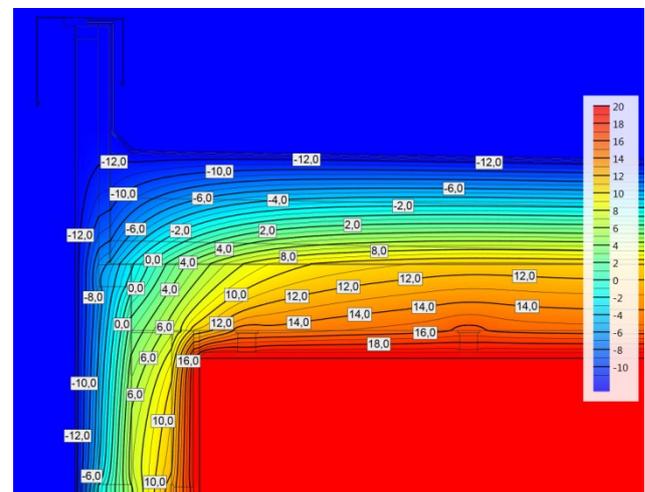


Abbildung 4.214: Isotherme

Durch das stärkere Temperaturgefälle kommt es zu einem leicht erhöhtem Diffusionsstrom im Bereich der Innenecke (siehe Abbildung 4.216). Vergleicht man die relative Feuchte  $\phi$  [%] beider Varianten, lässt sich zunächst kein großer Unterschied erkennen (siehe Abbildung 4.209 und Abbildung 4.217). Bei der Berechnung der Kondensatmenge wird der Unterschied deutlicher. Dieser beträgt rund 1,0 [g/d] und ist damit um das 20-fache höher als jener mit einer massiven Attika aus BSP (siehe Abbildung 4.218). Der Grund dafür liegt einerseits an einem erhöhten Diffusionsstrom in diesem Bereich und andererseits an einer stärkeren Abkühlung.

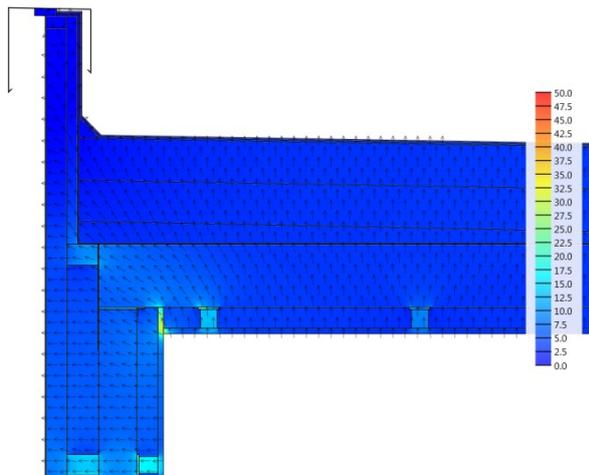


Abbildung 4.215: Wärmestrom

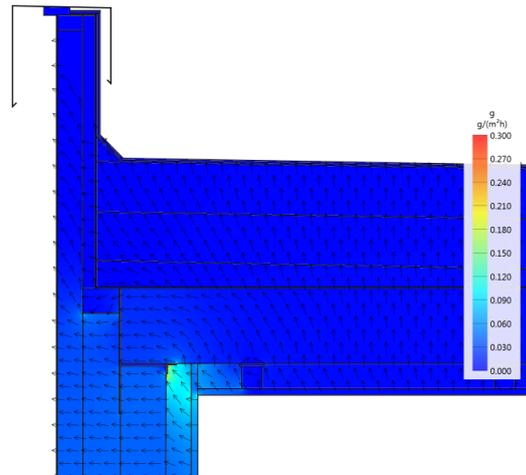


Abbildung 4.216: Dampfstrom

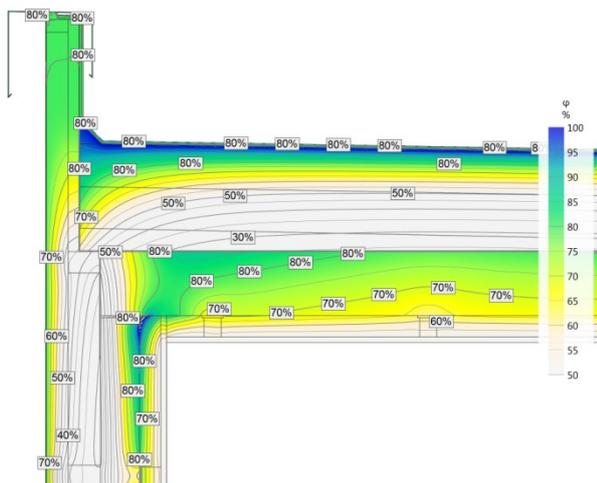


Abbildung 4.217: relative Feuchte  $\varphi$  [%]

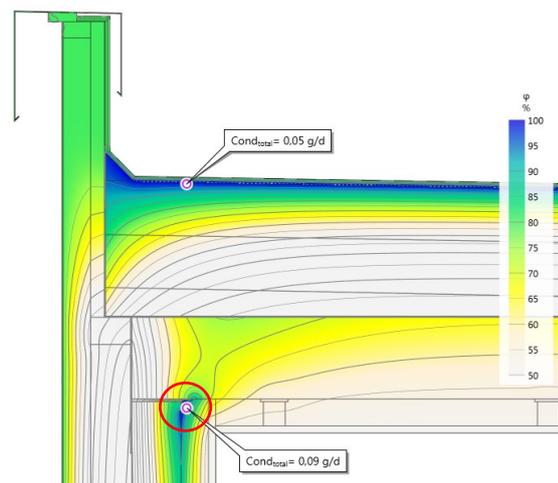


Abbildung 4.218: Kondensatmenge

Abschließend sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass im Bereich der Innenecke (rote Markierung in) in beiden Varianten ein Klebeband zur konvektiven Abdichtung vorgesehen wurde. Aufgrund fehlender Materialparameter für Klebebänder wurden diese in den Simulationen als relativ diffusionsdicht angenommen und mittels einer dichten Folie ( $\mu = 32000$ ) modelliert. Folge dessen kann in diesem Bereich keine Dampfdiffusion stattfinden und es kommt zu einer Konzentration des Kondensates da anfallendes Kondenswasser nicht abtransportiert werden kann. Die Berechnung der Kondensatmenge ergibt für diesen Punkt 0,09 [g/d] und ist damit doppelt so groß wie jene der ersten Variante.

## 4-17.5 INSTATIONÄRE BERECHNUNGEN

### 4-17.5.1 Standardvariante (Attika mit BSP)

#### Punkte 1-3

Die Ergebnisse der instationären Berechnung ergeben in den Punkten 1-3 einen stark schwankenden Temperaturverlauf, welcher sich in einem Bereich zwischen 10 [°C] und 19 [°C]. Weiters ist eine leicht ansteigende Tendenz der Minima und Maxima zu erkennen. Wie schon bei den Analysen in den Kapiteln 4-5 und 4-14 der Teile „A“ bzw. „B“ verlaufen die Ganglinien identisch.

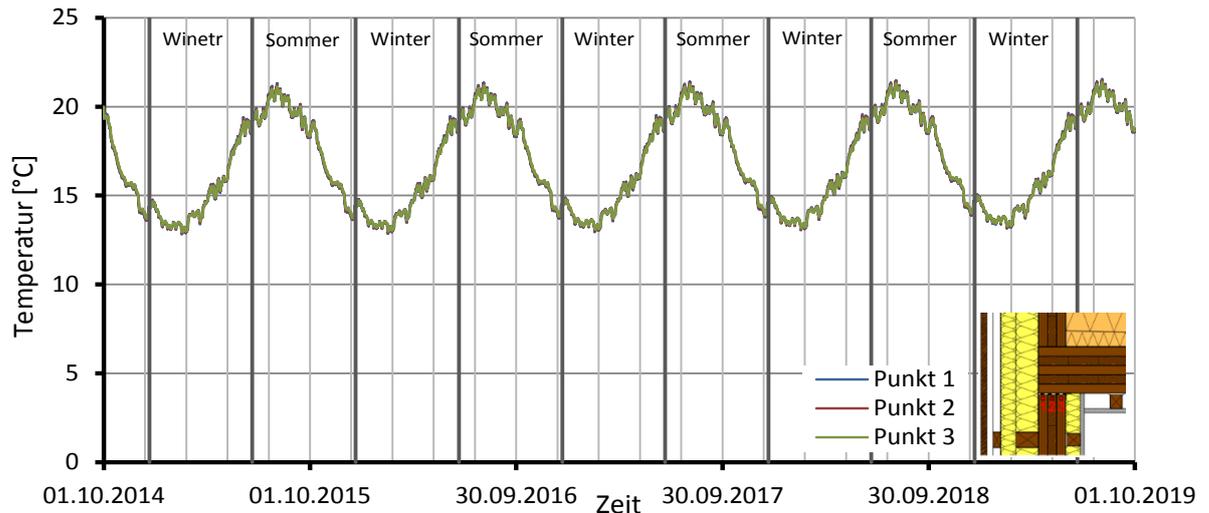


Abbildung 4.219: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3

Die Ganglinien der relativen Feuchte verlaufen in allen drei Punkten sehr ähnlich und schwanken nur in einem geringen Bereich von etwa 1% - 2%. Der Grund für diesen annähernd konstanten Verlauf ist auf den sehr geringen Diffusionsstrom zurückzuführen, wodurch sich die relative Feuchte über den Berechnungszeitraum kaum ändert. Mit anderen Worten bietet dieser Bauteilanschluss ein sehr geringes Austrocknungspotential, weshalb hier besonders auf eine entsprechende Holzfeuchte während der Bauphase geachtet werden sollte.

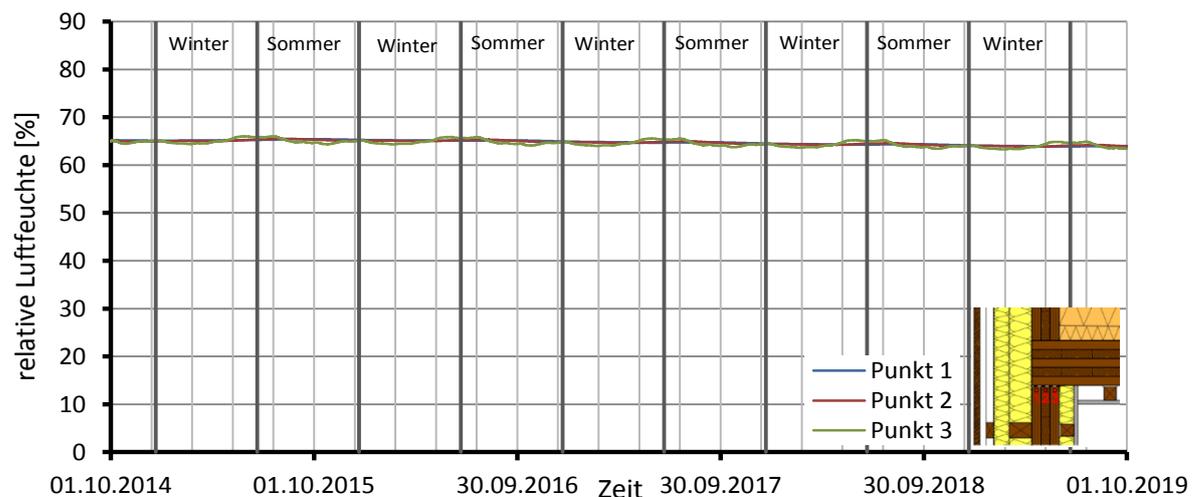


Abbildung 4.220: Verlauf der relativen Feuchte  $\varphi$  [%] in den Punkten 1-3

Abbildung 4.221 zeigt die Verläufe der Holzfeuchte. Die anfänglich hohe Holzfeuchtigkeit von rund 12% ist auch hier auf die Anfangsbedingung zurückzuführen und zeigt die selbe Tendenz wie in Abbildung 4.220. Nach Ende des Berechnungszeitraumes beträgt die Holzfeuchte in allen Monitoring-Positionen immer noch knapp 12%. Der beinahe konstante Verlauf zeigt, dass die Feuchtigkeit unabhängig der Temperaturschwankungen ist und im Wesentlichen von der Einbaufeuchte abhängt.

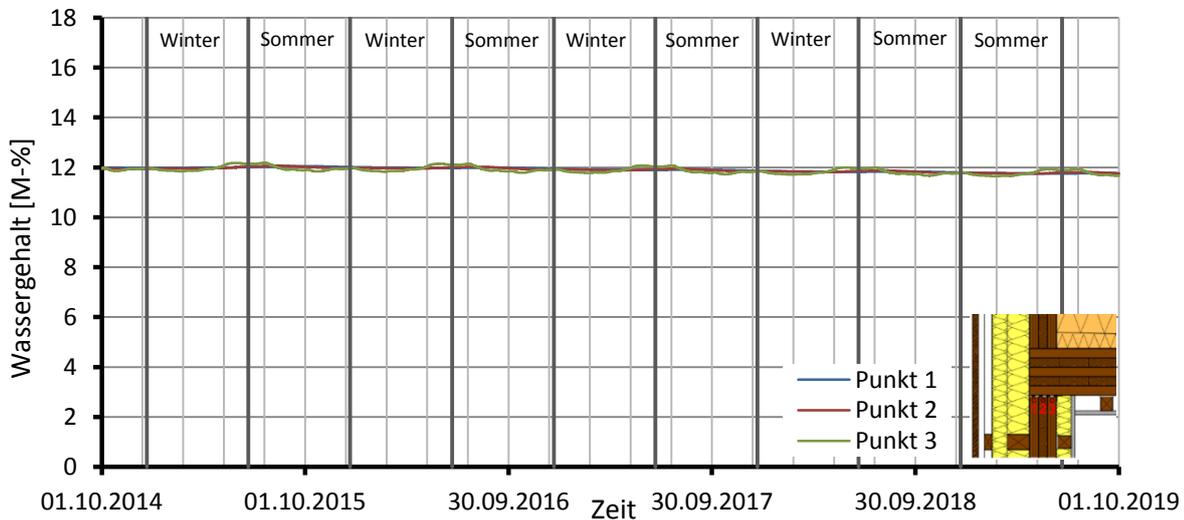


Abbildung 4.221: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 1-3

#### Punkte 4-6

Wenig überraschend zeigen die Ganglinien der Temperatur dieselben Verläufe wie in den Monitoring-Positionen 1-3 (siehe Abbildung 4.219) weshalb in Folge nicht weiter darauf eingegangen wird.

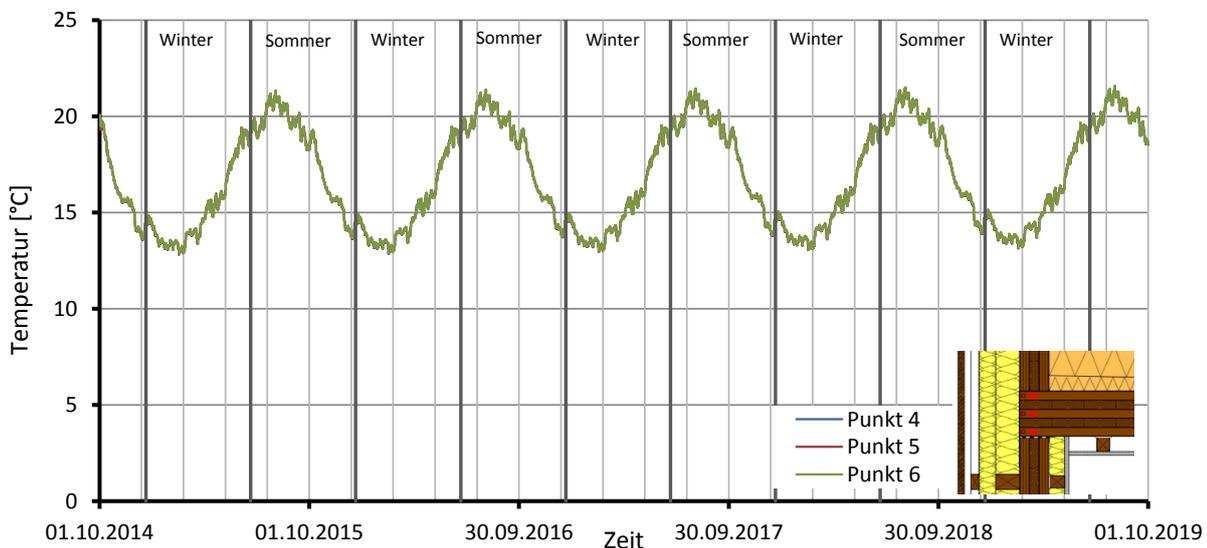


Abbildung 4.222: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6

Ein anderes Bild zeigt sich allerdings bei Betrachtung der relativen Feuchte. Die relative Feuchte bleibt über den gesamten Zeitraum unverändert und zeigt keinerlei Sprünge. Die Ursache dafür liegt, ähnlich wie bei den Punkten 1-3, im geringen Austrocknungspotential dieses Bauteilanschlusses. Das Ausdiffundieren der Baustoffe ist hier nur orthogonal zu den Wandoberflächen möglich, da direkt über der BSP-Decke eine Dampfsperre angeordnet wurde. Auf dieser relativ dichten Schicht liegt ebenfalls eine diffusionshemmende Wärmedämmschicht aus XPS. Die gesamte Dampfdiffusion muss im betrachteten Bereich also in der Deckenebene stattfinden. Da für diesen Vorgang in Bauteilen aus Brettsperholz etwas Zeit benötigt wird, kommt es anfänglich zu einer anhaltenden Feuchtigkeit in den ersten fünf Jahren.

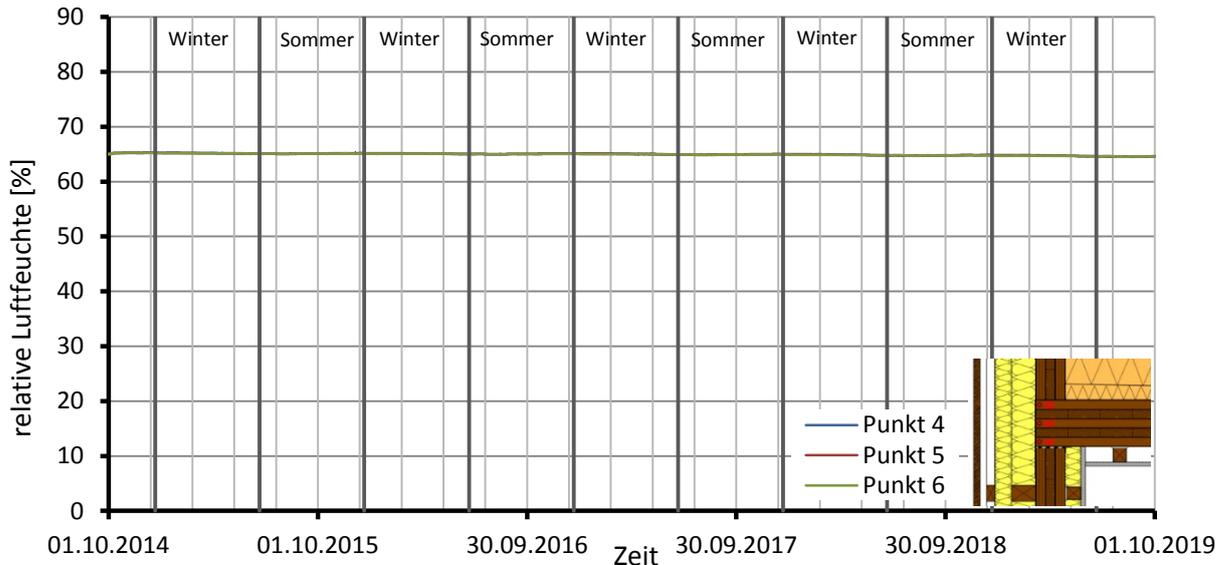


Abbildung 4.223: Verlauf der relativen Feuchte  $\varphi$  [%] in den Punkten 4-6

Im Vergleich zur relativen Feuchte  $\varphi$  fällt die Holzfeuchte im letzten Jahr etwas ab, obwohl ebenfalls praktisch keine Austrocknung der BSP-Decke stattfindet. Wie oben schon erwähnt, hängt dies mit dem diffusionsdichten Flachdachaufbau zusammen und nimmt einige Jahre in Anspruch.

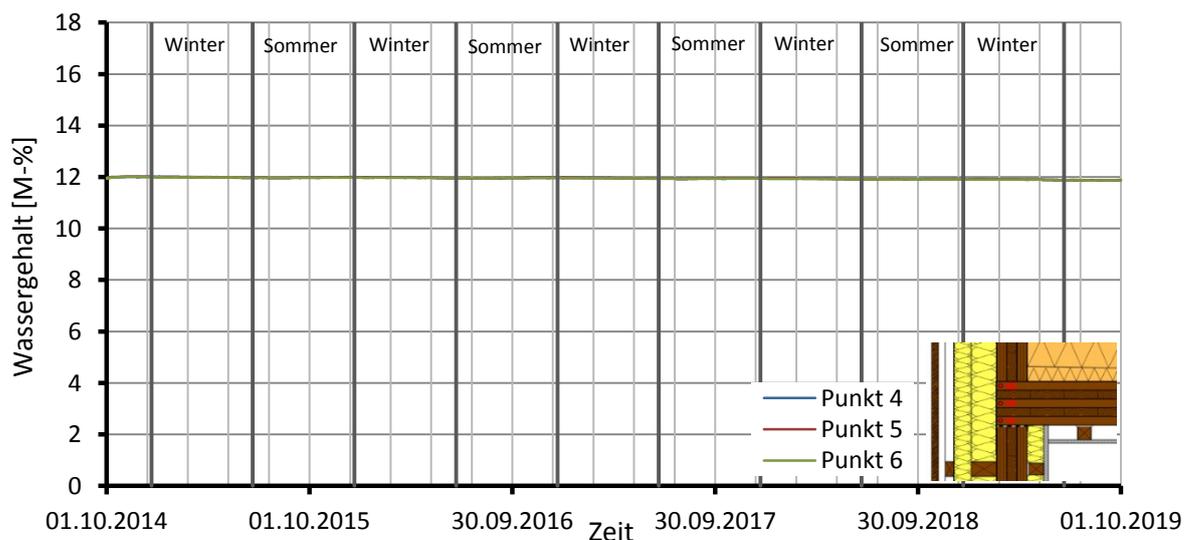


Abbildung 4.224: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 4-6

**Punkte 7-9**

Abbildung 4.225 zeigt die Verläufe der Temperatur, welche im Wesentlichen jenen der Punkt 1-6 folgen (siehe Abbildung 4.219 und Abbildung 4.222).

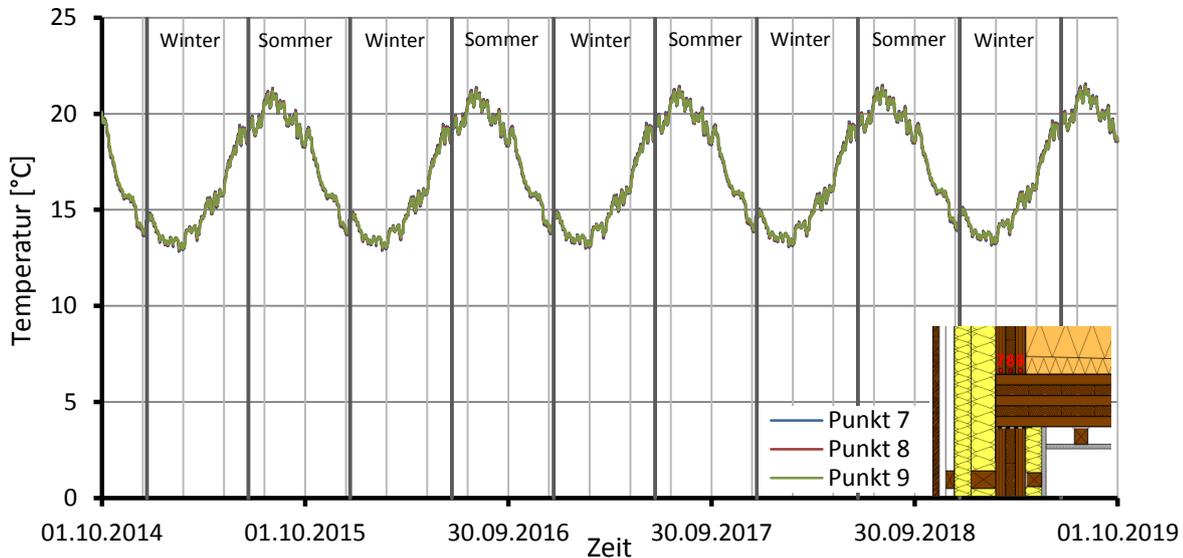


Abbildung 4.225: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9

Auch die Ganglinien der relativen Feuchte (siehe Abbildung 4.226) unterscheiden sich nicht von jenen der Monitoring-Positionen 1-6. Allerdings ist in Punkt 7 ein stärkerer Einfluss des Außenklimas durch die leichten Schwankungen in den Sommer- und Wintermonaten erkennbar. Da die Punkte 1-6 hinter einer diffusionsoffenen Folie liegen und der Dampfstrom somit etwas gebremst wird, kommt es dabei zu keinen Sprüngen, sondern es entsteht ein sehr glatter Verlauf der Ganglinien.

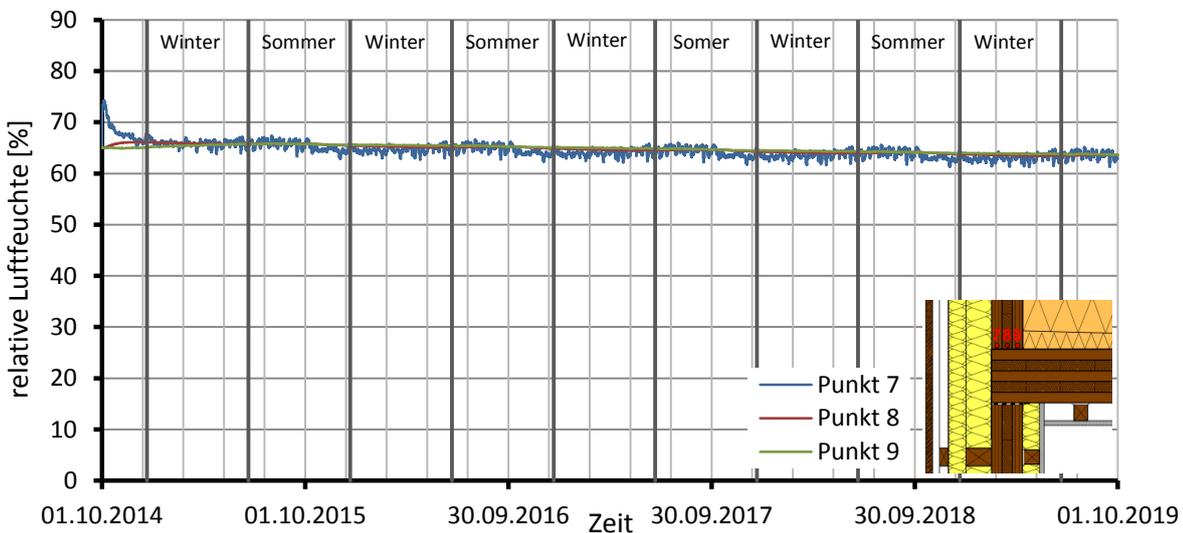


Abbildung 4.226: Verlauf der relativen Feuchte  $\phi$  [%] in den Punkten 7-9

Die Ganglinien der Holzfeuchte folgen, wie bereits bei vorangegangenen Simulationen beschrieben, im Wesentlichen der relativen Feuchte und ist in Abbildung 4.227 dargestellt.

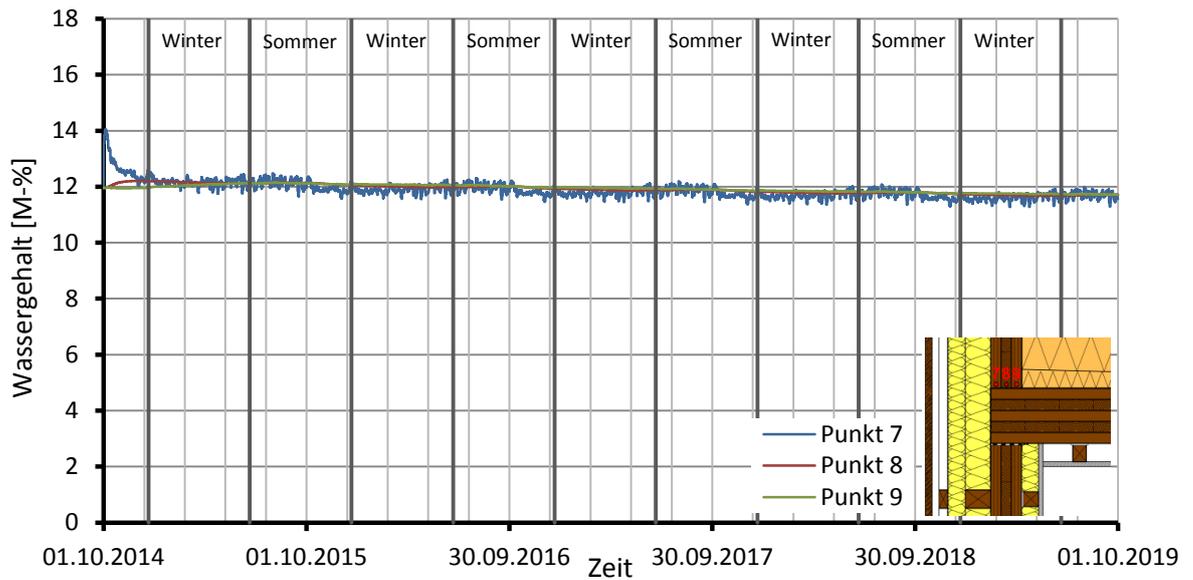


Abbildung 4.227: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 7-9

## 4-17.6 STANDARDVARIANTE (ATTIKA MIT OSB)

### Punkte 1-3

Die nachstehenden Abbildungen zeigen die Ganglinien der Monitoring-Positionen 1-6. Aufgrund der starken Ähnlichkeit der Detaillösung aus Kapitel 4-17.2.1 „Teil C“ wird im Folgenden nicht näher auf die Charakteristik der Ganglinien eingegangen.

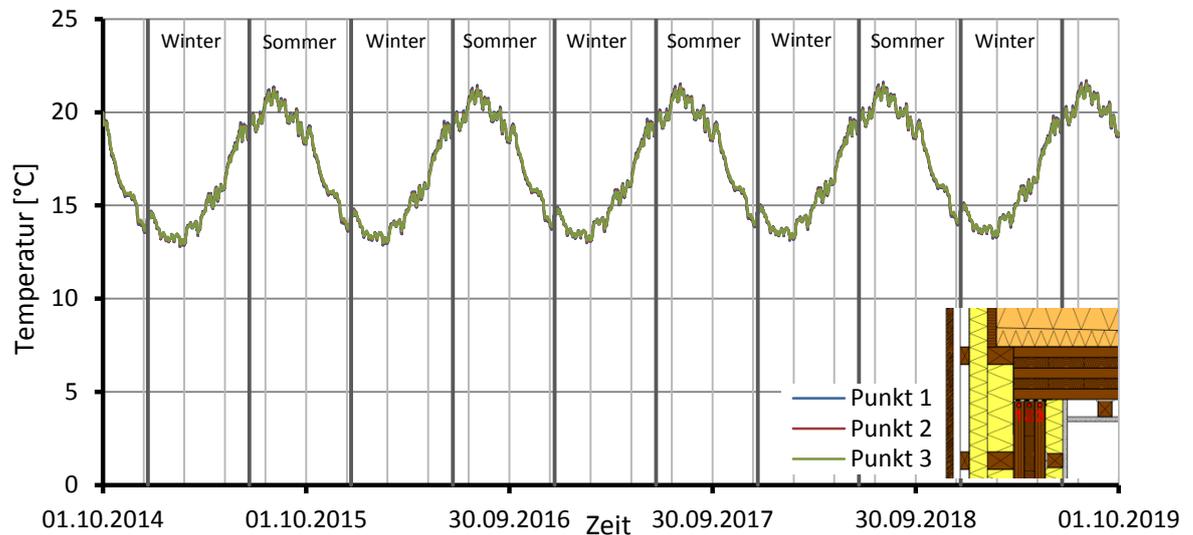


Abbildung 4.228: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3

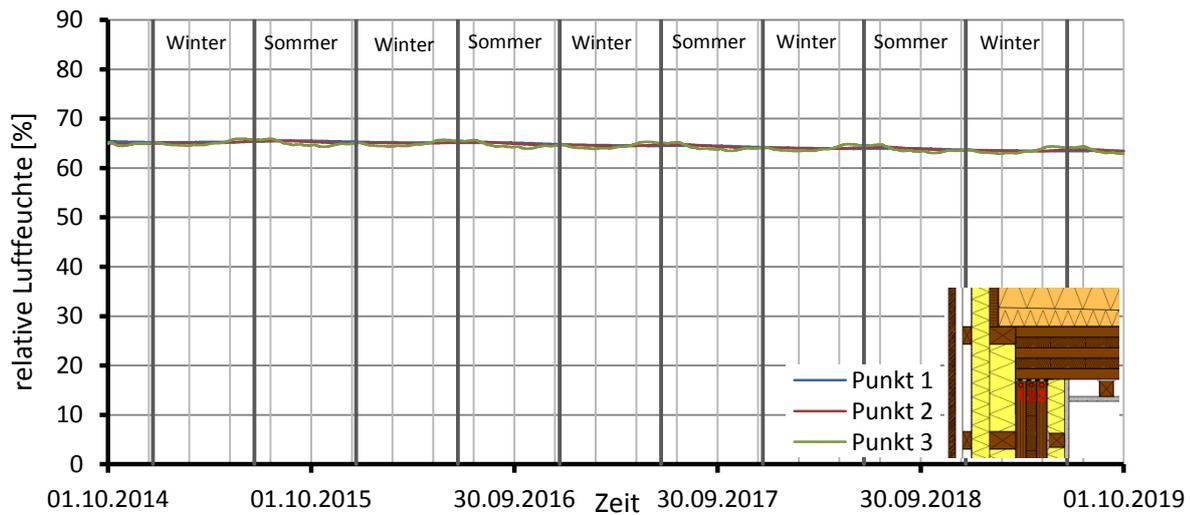


Abbildung 4.229: Verlauf der relativen Feuchte  $\varphi$  [%] in den Punkten 1-3

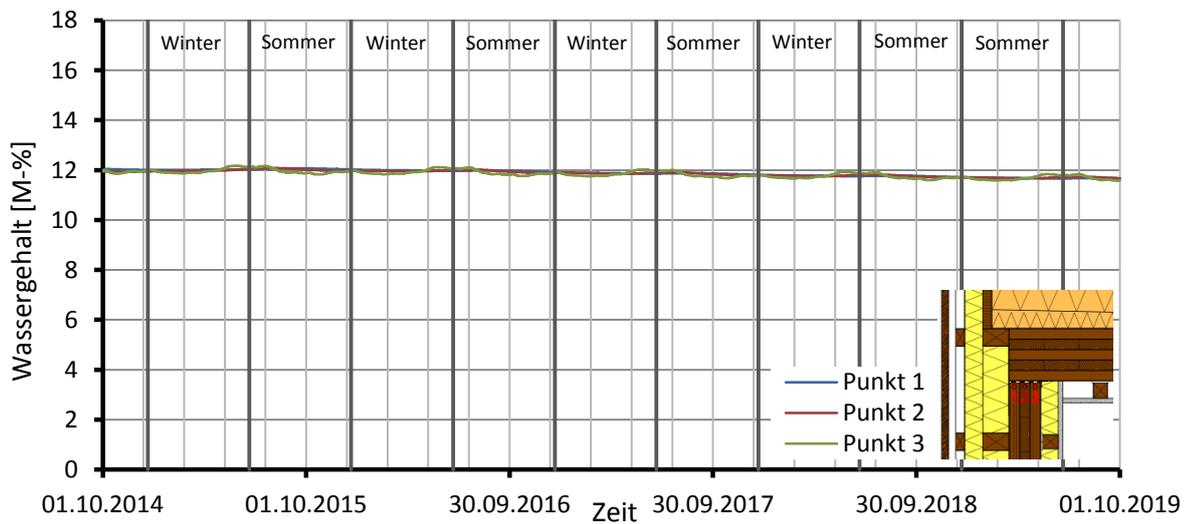


Abbildung 4.230: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 1-3

**Punkte 4-6**

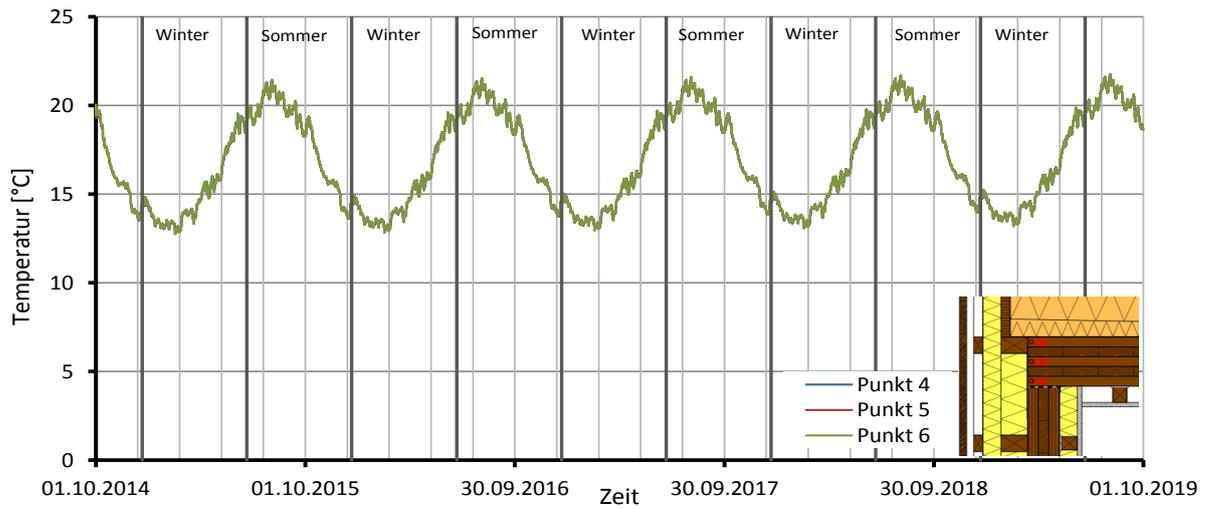


Abbildung 4.231: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6

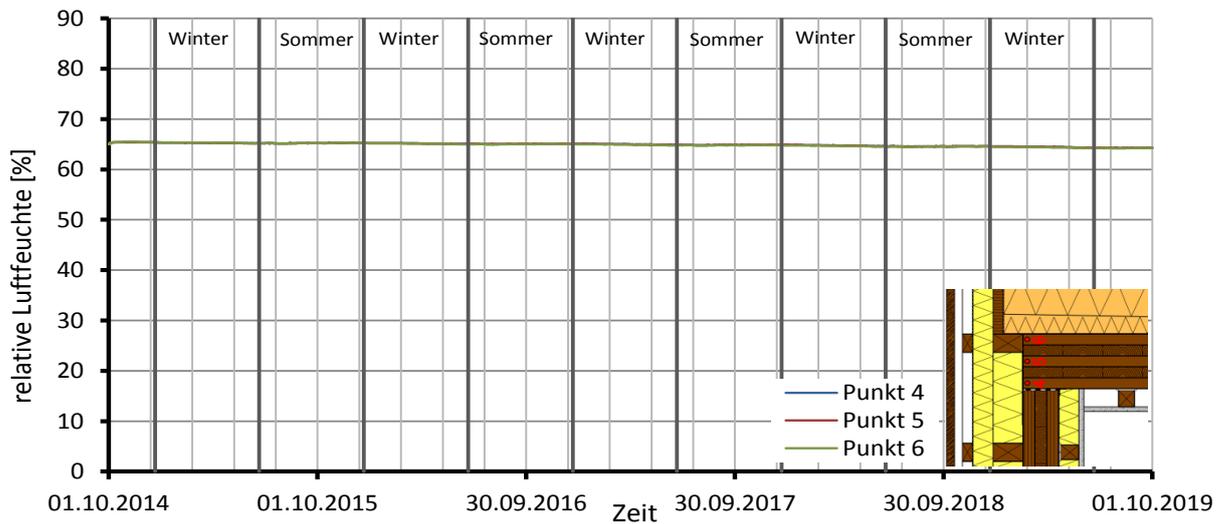


Abbildung 4.232: Verlauf der relativen Feuchte  $\varphi$  [%] in den Punkten 1-3

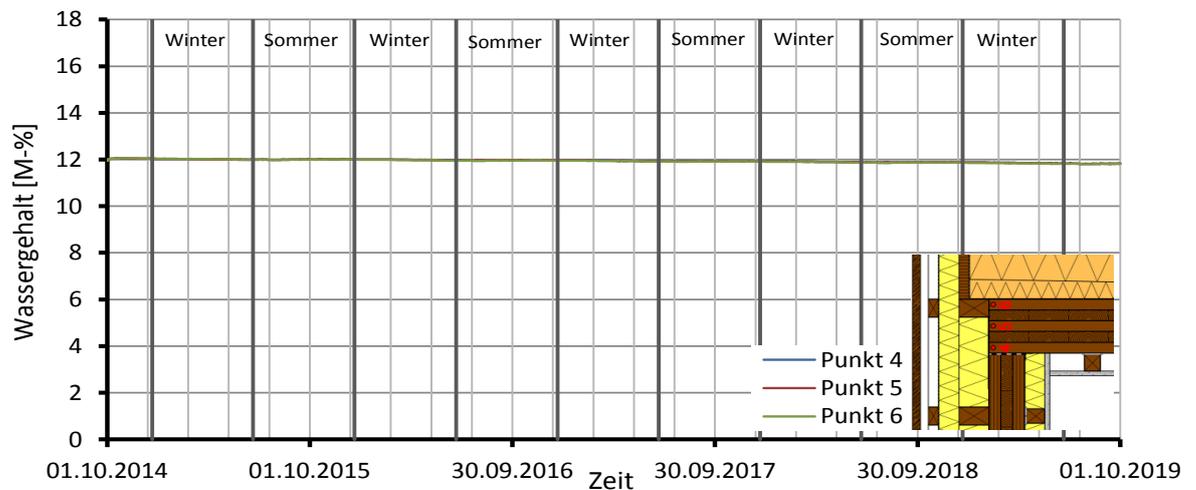


Abbildung 4.233: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 4-6

## 4-17.7 BERECHNUNG DES SCHIMMELPILZRISIKOS

Die maßgebenden Stellen für die Berechnung des Risikos der Schimmelpilzbildung ergeben sich wie in Kapitel 4-15 „Teil B“ für die Monitoring-Positionen 4 - 6 in der Stirnseite der BSP-Decke. Auch bei dieser Detailausbildung wird über Stirnseite der BSP-Platte eine diffusionsoffene Folie ( $S_d = 0,2$  [m]) angebracht. Die Ergebnisse der Isoplethen zeigen eine sehr ähnliche Charakteristik zwischen Deckenauskrägung und Flachdach. In den folgenden Abbildungen sind ausschließlich die Isoplethen der Punkt 4 – 6 dargestellt.

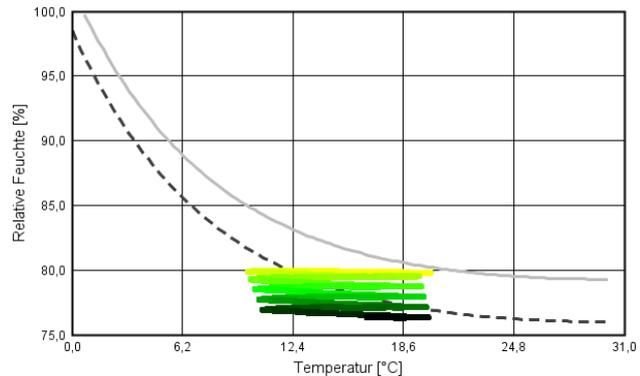


Abbildung 4.234: Isoplethen Punkt 4

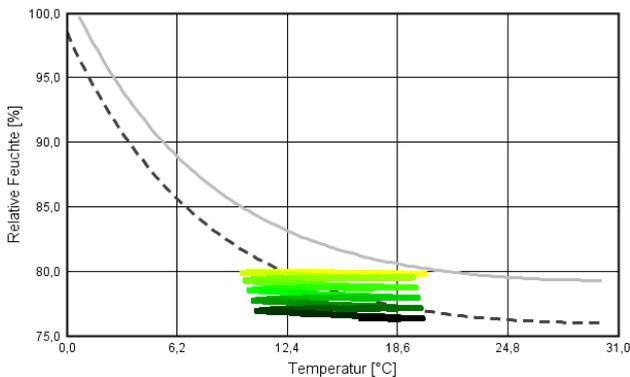


Abbildung 4.236: Isoplethen Punkt 5

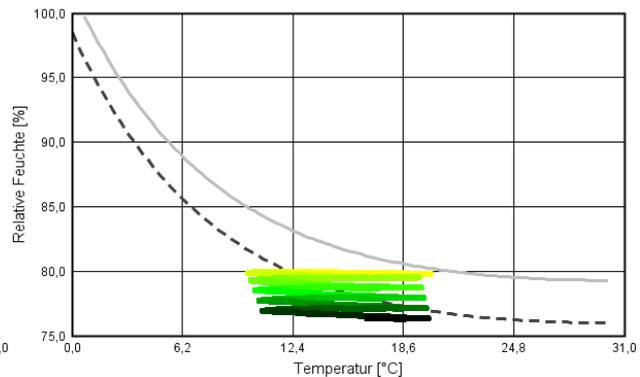


Abbildung 4.235: Isoplethen Punkt 6

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Auswertung des biohygrothermischen Verfahrens für die Monitoring-Positionen 4-6. Das Sporenwachstum in Punkt 4 errechnet sich insgesamt zu 120 [mm].

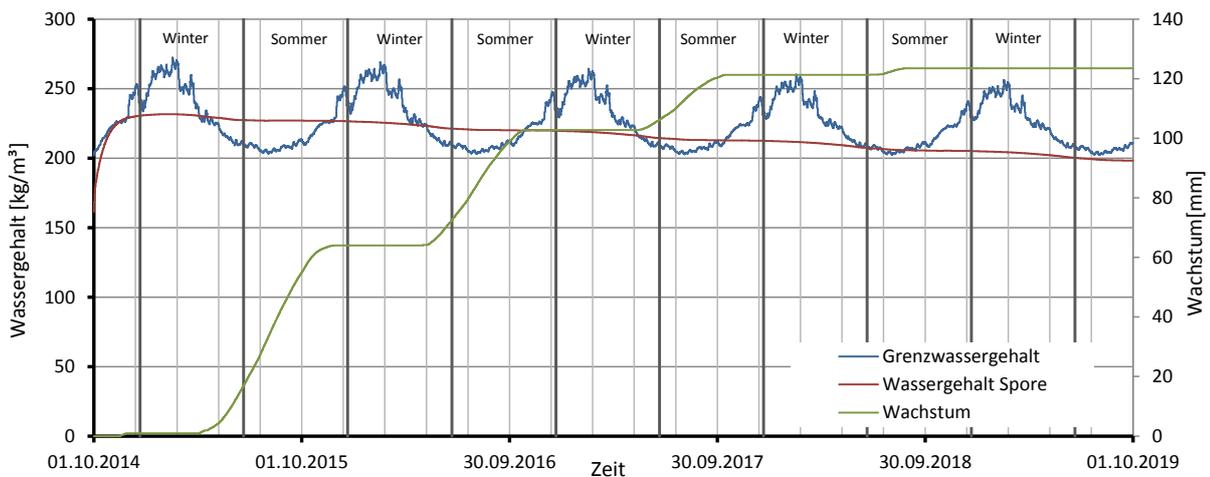


Abbildung 4.237: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 4

In Punkt 5 ist ein ähnlicher Verlauf wie in Punkt 4 und 6 zu erkennen. Das Wachstum beträgt hier ebenfalls rund 120 [mm] und endet im letzten Jahr des Berechnungszeitraumes.

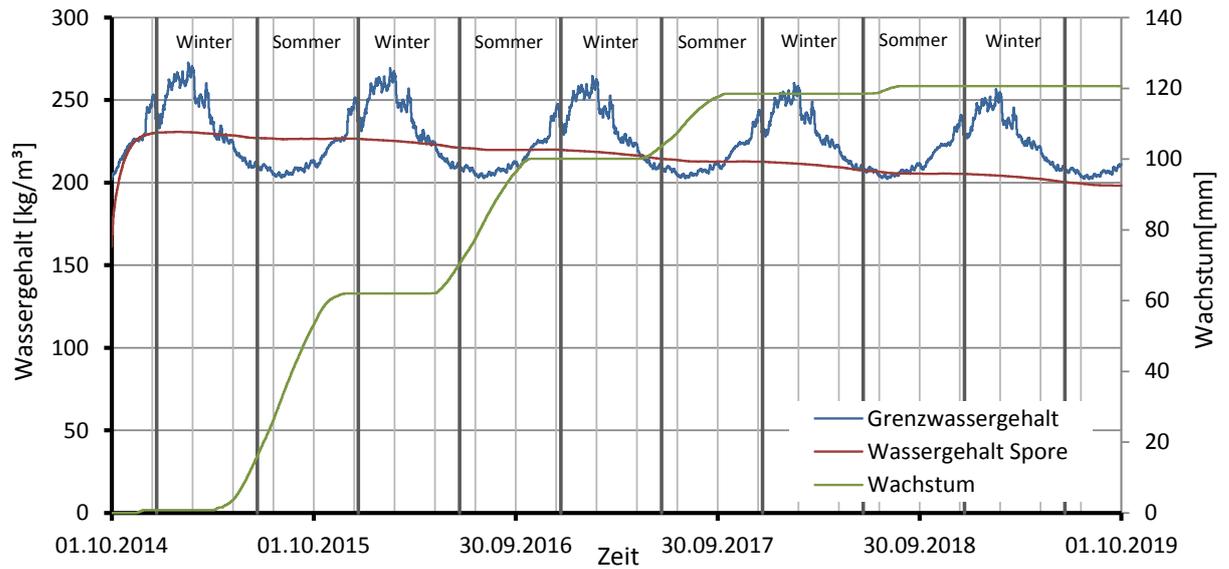


Abbildung 4.238: Biohydrothermisches Verfahren in Punkt 5

In Punkt 6 fällt das Wachstum mit rund 115 [mm] etwas geringer aus, zeigt aber ebenfalls qualitativ ähnliche Verläufe wie jene der Punkte 4 und 5.

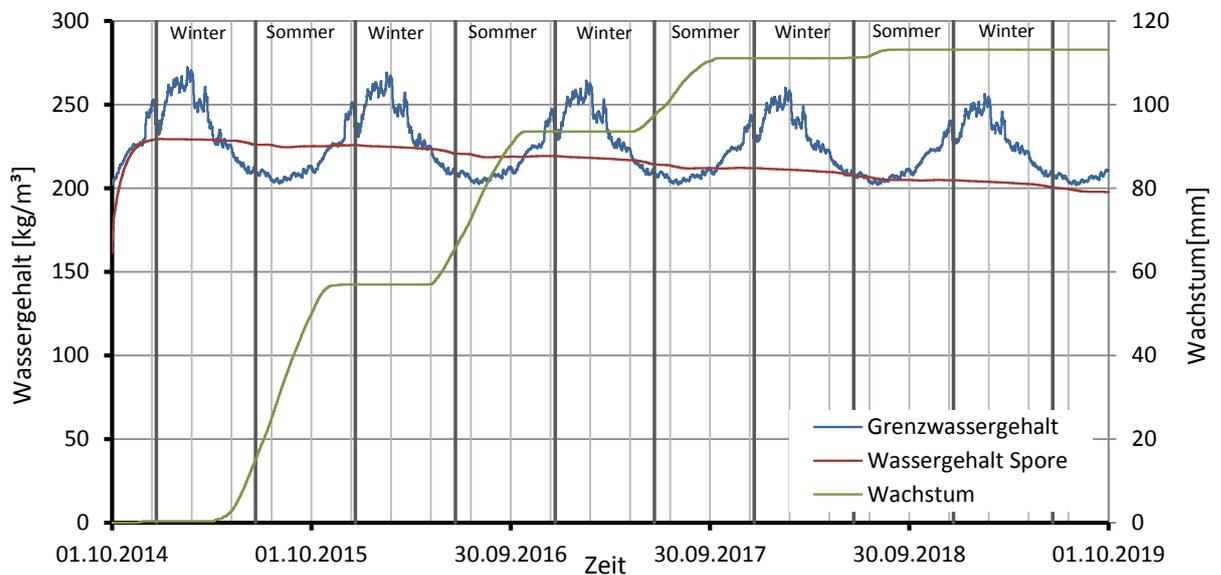


Abbildung 4.239: Biohydrothermisches Verfahren in Punkt 5

## 4-17.8 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Da die Berechnungsergebnisse der Holzfeuchte in den betrachteten Monitoring-Positionen keine kritischen Werte ergaben, wurde auf eine biohygrothermische Analyse zur Abschätzung des Schimmelpilzrisikos verzichtet.

**Tab.: 52: Ergebnisse der Standardvariante (Attika mit BSP)**

Monitoring-Position	Temperatur [°C]			relative Luftfeuchte [%]			Holzfeuchte [M-%]		
	min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean
1	12,8	20,0	21,6	63,9	65,4	64,7	11,7	12,1	11,9
2	12,9	20,0	21,5	63,9	65,5	64,7	11,7	12,1	11,9
3	13,0	20,0	21,4	63,3	66,0	64,6	11,6	12,2	11,9
4	12,8	21,5	16,8	64,5	65,3	65,0	11,9	12,0	12,0
5	12,8	21,6	16,8	64,5	65,3	65,0	11,9	12,0	12,0
6	12,8	21,6	16,8	64,5	65,3	65,0	11,9	12,0	12,0
7	12,8	21,6	16,8	61,2	74,2	64,4	11,3	14,1	11,9
8	12,9	21,5	16,8	63,5	66,1	64,8	11,7	12,2	11,9
9	13,0	21,4	16,8	63,6	65,9	64,8	11,9	12,1	11,9

**Tab.: 53: Ergebnisse der Standardvariante (Attika mit OSB)**

Monitoring-Position	Temperatur [°C]			relative Luftfeuchte [%]			Holzfeuchte [M-%]		
	min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean
1	12,8	21,8	16,9	63,4	65,6	64,6	11,7	12,1	11,9
2	12,8	21,6	16,9	63,4	65,6	64,5	11,7	12,1	11,9
3	12,9	21,5	16,9	62,9	66,0	64,4	11,6	12,2	11,8
4	12,8	21,7	16,9	64,2	65,4	64,9	11,8	12,0	11,9
5	12,8	21,7	16,9	64,2	65,4	64,9	11,8	12,1	11,9
6	12,7	21,8	16,9	64,2	65,5	64,9	11,8	12,0	11,9

## KAPITEL 5: SCHLUSSBETRACHTUNG

Die hygrothermische Analyse mittels instationärer Simulationen innerhalb der Brettsperrholzbauteile erfolgte ausschließlich an Außenbauteilen, wobei jeweils 9 Monitoring-Positionen in gestörten und ungestörten Zonen gewählt wurden. Die Auswertung der Ganglinien wurde dabei für Temperatur, relative Luftfeuchte und Holzfeuchte vorgenommen. Das Verhalten von BSP gegenüber Temperaturbelastungen zeigte bei allen Simulationen dasselbe Verhalten. Zwar schwankt die Temperatur je nach Bauteilanschluss verschieden stark und liegt im Allgemeinen zwischen 15°C und 20°C, allerdings weisen die Ganglinien in den untersuchten Einzelschichten idente Verläufe auf. Dieses Verhalten zeigt, dass es innerhalb von Bauteilen aus Brettsperrholz zu keinem Abfall der Temperatur kommt und spricht somit für wärmedämmende Wirkung. Die Berechnung der Oberflächentemperatur ergab bei sämtlichen Details zwischen 18°C und 19°C, wodurch weder die Taupunkttemperatur ( $T_{RH100\%} = 9,3$ ), noch die kritische Temperatur der Schimmelpilzbildung ( $T_{RH80\%} = 12,6$ ) unterschritten wurde. Da die Temperatur bei den untersuchten Bauteilen in den Sommermonaten immer unterhalb der 20°C-Marke bleibt und diese nur in Ausnahmefällen (z. B. Deckenauskrragung mit ungedämmter Unterseite) überschritten wird, kann auch ein ausreichender sommerlicher Wärmeschutz garantiert werden. Nach ÖNORM B 8110-3:2012 darf liegt die kritische Tagestemperatur für Räume bei 27°C und jene der Nacht 25°C. Die  $\psi$ -Werte zur Beurteilung des Wärmebrückeneinflusses errechneten sich für die Standardvarianten des Sockels, der Deckenauskrragung und des Flachdaches zu 0,04 [W/mK] bis 0,06 [W/mK] und stellen somit befriedigende Werte dar. Lediglich bei Variante „Betonsockel“ ergab die Berechnung einen unbefriedigenden Wert von 0,17 [W/mK].

Die Ganglinien der relativen Luftfeuchte lassen einen deutlichen Einfluss des Bauteilanschlusses erkennen. Vor allem im Bereich des Sockels kommt es im äußersten, auswertbaren Punkt zu großen Schwankungen im Bereich zwischen 35% und 80%. Hier reagiert die BSP-Wand stark auf das Außenklima. Es sei an dieser Stelle jedoch erwähnt, dass sich diese sprunghaften Verläufe mit zunehmender Tiefe rasch beruhigen. Allerdings war es dem Autor wichtig, diese schwankende Beanspruchung der BSP-Wand in der äußeren Grenzschicht zu zeigen. Die Verläufe der relativen Luftfeuchte in der mittleren und inneren Einzelschicht zeigen dagegen ein gänzlich anderes Bild. Hier beträgt der Schwankungsbereich lediglich 10% und die mittlere relative Luftfeuchte liegt, je nach Bauteilanschluss und Monitoring-Position, zwischen 55% und 75%. Des Weiteren zeigen die inneren Ganglinien einen zeitlichen Versatz wobei ein Anstieg der relativen Luftfeuchte in der inneren Einzelschicht während der Heizphasen in den Wintermonaten zu beobachten ist. Die mittlere Schicht reagiert dabei um in etwa 2 bis 3 Monate versetzt. In den Frühlings- und Sommermonaten kommt es jedoch zu einer Annäherung der Ganglinien in allen drei Schichten, da die Außen- und Innentemperatur in etwa gleich hoch sind und somit die, dem Temperaturgefälle folgendem, Wasserdampfdiffusion abnimmt.

Die Verläufe der Holzfeuchte zeigen einen durchwegs affinen Verlauf der relativen Feuchte. Dieses Phänomen lässt sich durch das Verhalten von BSP gegenüber der Temperatur erklären. Da die Temperaturen in allen Einzelschichten denselben Verlauf aufweisen, hat die Temperatur keinen nennenswerten Einfluss auf die Holzfeuchte, weswegen diese allein von der relativen Luftfeuchte abhängig ist. Laut ÖNORM B 1995-1-1 wird für die Nutzungsklasse 1 eine Gleichgewichtsfeuchte für Nadelhölzer von  $\leq 12\%$  bei einer relativen Luftfeuchte von 65% welche für einige Wochen überschritten werden darf. Betrachtet man die Monitoring-Positionen aller untersuchten Details, ergibt sich ein Holzfeuchtebereich von rund 7% bis 15%. Die mittlere Holzfeuchte beträgt bei den Sockel- und Flachdachdetails rund 12%. Lediglich bei den Deckenauskrragungen ist in den meisten Monitoring-Positionen ein mittlerer Holzfeuchtegehalt von rund 9% zu beobachten. Der Grund hierfür liegt an der geometrischen Wärmebrücke die eine Deckenauskrragung naturgemäß mit sich bringt. Das Bauteil wird

dadurch stärker abgekühlt wodurch die relative Luftfeuchte ansteigt. Nachdem die Holzfeuchte von der relativen Luftfeuchte abhängt, steigt somit auch der Holzfeuchtegehalt.

Aufgrund der Berechnung des Schimmelpilzrisikos werden vom Autor besonders die Deckenauskragungen und die Flachdachdetails als kritisch betrachtet in beiden Fällen, im Bereich der gewählten Monitoring-Positionen, eine geringe beheizte Fläche Innenfläche einer großen, dem Außenklima ausgesetzten, Außenfläche gegenübersteht. Dies führt zu einem geringeren Austrocknungspotential des Bauteiles was wiederum das Schimmelpilzwachstum begünstigt.

Die Verifizierung der Simulationen und Berechnungen (siehe Kapitel 6) erfolgt durch eine Langzeitmessung von Temperatur und relativer Luftfeuchte in einem Einfamilienhaus. Es zeigt sich dabei eine gute Übereinstimmung mit den instationären Simulationen in den ungestörten Zonen innerhalb der BSP-Wand. Im sockelnahen Bereich sind jedoch teils gravierende Unterschiede festzustellen. Während die gewonnenen Daten in der inneren Einzelschicht noch eine gute Übereinstimmung mit der Simulation zeigen, liegt die gemessene Holzfeuchte von 14% in der mittleren Einzelschicht bereits um 2% über der errechneten von 12%. In der äußeren Einzelschicht liegt der Fehler mit 16% Holzfeuchte sogar schon bei 33%. Einerseits kann dieser Unterschied durch das in den Simulationen nicht berücksichtigte Spritzwasser im Sockelbereich erklärt werden. Andererseits verlangen instationäre Berechnungen eine Vielzahl von Eingabeparametern (Nutzungsverhalten, Baufeuchte, Materialfunktionen und Klimadaten), weswegen eine realistische Abbildung des zu untersuchenden Bauteils oft nicht möglich ist. Des weiteren stellen die teilweise tagelangen Berechnungszeiten und den Damit verbundenen enormen Datenmengen keine Erleichterung in der Handhabung dar, speziell im Hinblick auf Parameterstudien.

Der Autor kommt nun zu dem Schluss, dass bauphysikalische Berechnungen und Simulationen zwar wegen der Erfüllung normativer Anforderungen unerlässlich sind und für eine erste Abschätzung des bauphysikalischen Verhaltens eines Bauteiles ein gutes Werkzeug darstellen. Jedoch ist für eine realistische Analyse dem „Long-time monitoring“ stets der Vorzug zu geben.

# **KAPITEL 6: LONG-TIME MONITORING (AUSBLICK)**

## 6-1 MESSKONFIGURATION

### 6-1.1 MESSUMGEBUNG

Die in den folgenden Kapiteln gezeigten Untersuchungen wurden (und werden) an einem zweigeschossigem Einfamilienhaus in St. Ulrich bei Steyr (nähe Kleinraming) durchgeführt. Das in Holz-Massivbauweise ausgeführte Haus wurde auf einem ebenen Grundstück errichtet und grenzt west- und südseitig an andere Gebäude an (siehe Abb. 1).



Abb. 1: Lageplan

Die Messungen sollten entweder an der Westseite oder der Nordseite stattfinden, wobei hier der ungünstigste Ort in Bezug auf Abschattungen und Hanglage ausgewählt wurde. Im konkreten Fall bietet sich hier eine Stelle im nordwestlichen Teil (Gang) des Erdgeschosses an. Abbildung 2 zeigt den Grundriss und die betreffende Stelle (rote Markierung).

Der Bauherr (Herbert Hanger) ermöglicht hiermit der holz.bau forschungs gmbh ein hygrothermisches Langzeitmonitoring, um das Verhalten von BSP im Sockelbereich bezüglich Feuchte und Temperatur über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr zu untersuchen. Des Weiteren wird dadurch auch dem Bauherrn die Möglichkeit gegeben, sich über den Zustand des Objektes zu informieren. Abbildung 3 zeigt die „Ansicht West“ und den betreffenden Bereich, ebenfalls rot markiert.

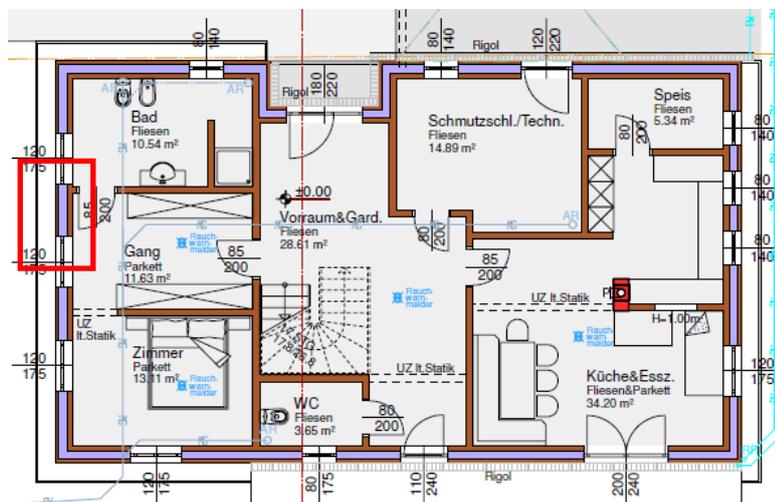


Abb. 2: Grundriss EG

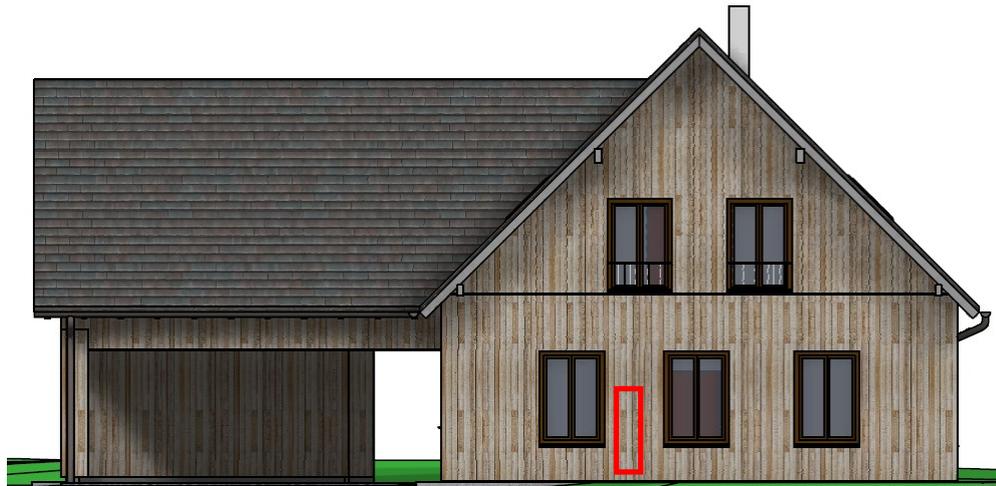


Abb. 3: Ansicht West

## 6-1.2 MESSENSOREN

Das Außenklima (Temperatur und relative Luftfeuchte) wird mittels eines Tinytag Datenloggers aufgezeichnet, welcher an einer wind- und regengeschützten Stelle in der Nähe der betreffenden Messstelle befestigt wurde. Die Erfassung des Innenklimas erfolgt durch einen Feuchte- und Temperatursensor der Firma Honeywell. Bei diesen Sensoren wird die Ermittlung der Temperatur durch einen Widerstandsthermometers erreicht. Den Thermistor bildet dabei ein gesinteter Edelstahlfilter, welcher einen temperaturabhängigen elektrischen Widerstand liefert. Dieser gemessene Widerstand wird dann in die Temperatur der Umgebungsluft umgerechnet. Zur Bestimmung der relativen Feuchte wird ein Planarkondensator verwendet, welcher bei Anlegung einer elektrischen Spannung das Fließen von Strom ermöglicht. Die gemessene Stärke der resultierenden Spannung ist von der Feuchtigkeit der umliegenden Luft abhängig und kann somit auf die relative Feuchte rückgerechnet werden. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die erwähnten Messgeräte.



Abb. 4: Tinytag (1)

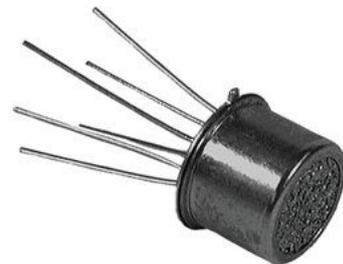


Abb. 5: Honeywell HIH-4602-A/C (2)

Die Aufzeichnung und Sicherung der Daten erfolgt über sogenannte Datenlogger, die zu einer Einheit zusammengefügt und so an der Wand in der Nähe der Kabelausgänge montiert wurden. Die Stromversorgung wird dabei über einen herkömmlichen „Schuko-Anschluss“ (230 V) sichergestellt (siehe Abb. 6).

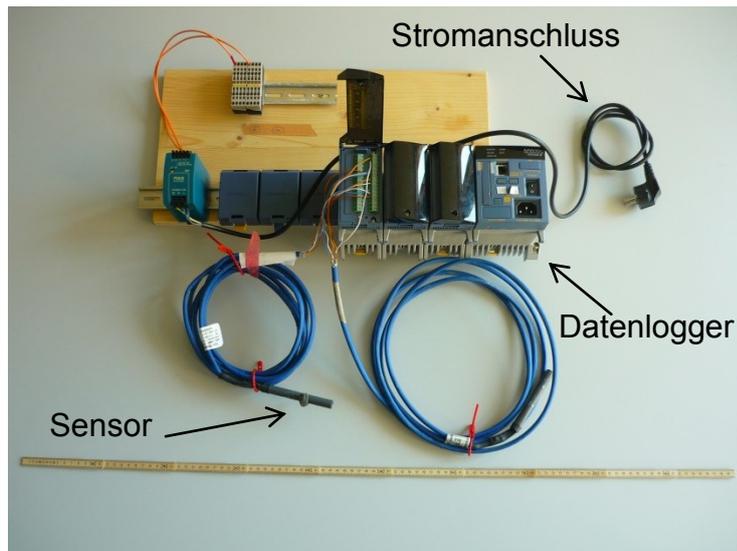


Abb. 6: Datenlogger mit Sensoren

### 6-1.3 MESSKONFIGURATION IN DER BSP-WAND

Um die instationäre relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur in der BSP-Wand zu bestimmen, wurden drei Messreihen definiert. Jeder dieser drei Messreihen sind drei Sensoren zugeordnet, die in jeweils einer der drei Einzelschichten der BSP-Wand eingebracht wurden. Somit ergeben sich insgesamt 9 Sensoren. Zusätzlich wurde zu diesen 9 Sensoren ein weiterer Sensor im Innenraum installiert, um so das Rauminnenklima bestimmen zu können.

Die Sensoren wurden von unten ausgehend durchnummeriert um die Daten den entsprechenden Messstellen zuordnen zu können. Die Sensoren mit der Bezeichnung 1, 2 und 4 wurden dabei in einer Höhe von ca. 3 cm über der Schwellenoberkante eingebracht. Jene mit der Nummerierung 3, 4 und 5 in 28 cm Höhe über Schwellenoberkante und die Sensoren 6 – 9 in 56 cm Höhe. Die nachfolgenden Abbildungen 7 und 8 zeigen eine schematische Darstellung und geben einen Überblick über die gesamte Messkonfiguration.

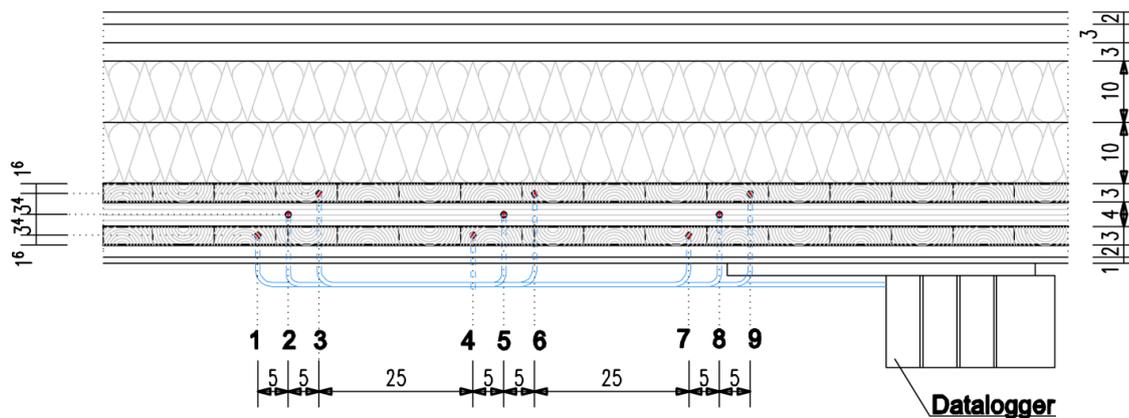


Abb. 7: Grundriss

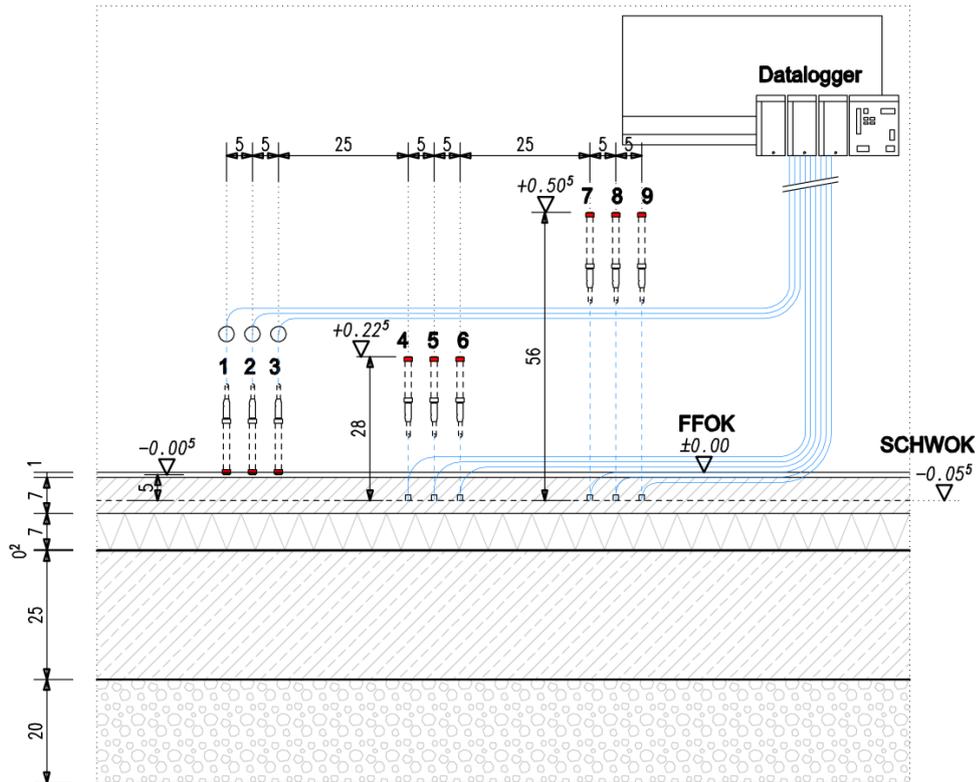


Abb. 8: Längsschnitt

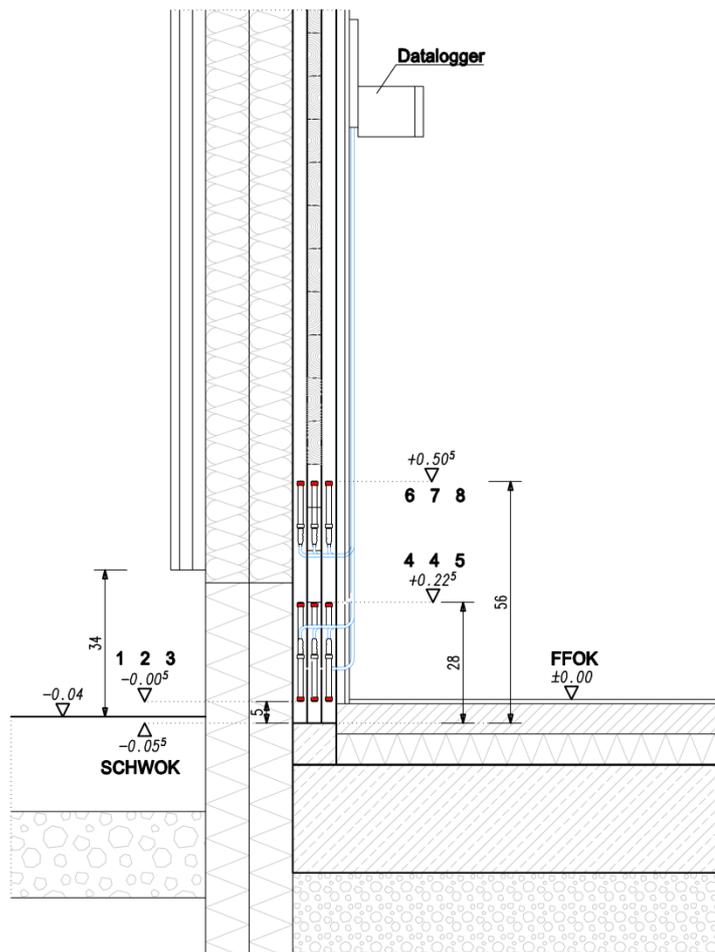


Abb. 9: Querschnitt

## 6-2 AUSFÜHRUNG

Die Temperatur- und Feuchtesensoren für die Wand selbst wurden während des Baubetriebes in drei verschiedenen Höhen (Schwellennahe, mittlere gestörte Zone, ungestört Zone) und in jeweils einer Einzelschicht (innen, mittig, außen) angebracht. Um die Sensoren stirnseitig einbringen zu können, war es zuerst notwendig die BSP-Wand an einer geeigneten Stelle in eine waagerechte Position zu bringen. Die Bohrkanäle für die Sensoren wurden von der unteren Stirnseite aus gebohrt, während die Bohrkanäle für die Kabelausgänge horizontal geführt wurden. Um ein identisches Lochbild für jede der drei Messstellen zu erreichen, wurde eigens eine Bohrschablone aus Buchenholz angefertigt (siehe Abbildungen 9 und 10).



Abb. 11: Bohrung mittels Bohrschablone

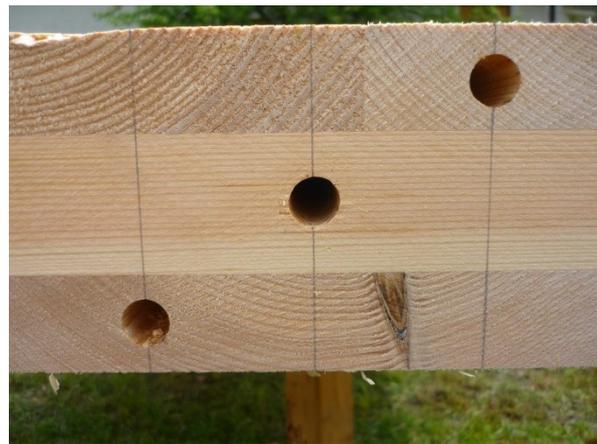


Abb. 10: Lochbild

Da Holz ein gewachsener Baustoff ist und somit Unregelmäßigkeiten in der Struktur aufweist, mussten die Sensoren in einem engen Bereich angeordnet werden, um so möglichst ähnliche Materialeigenschaften an den jeweiligen Messstellen vorzufinden. Die Bohrungen wurden deshalb in einem relativ geringen Abstand von 25 cm angeordnet. Abbildung 11 zeigt das Lochbild aller Bohrungen zur Einbringung der Sensoren.

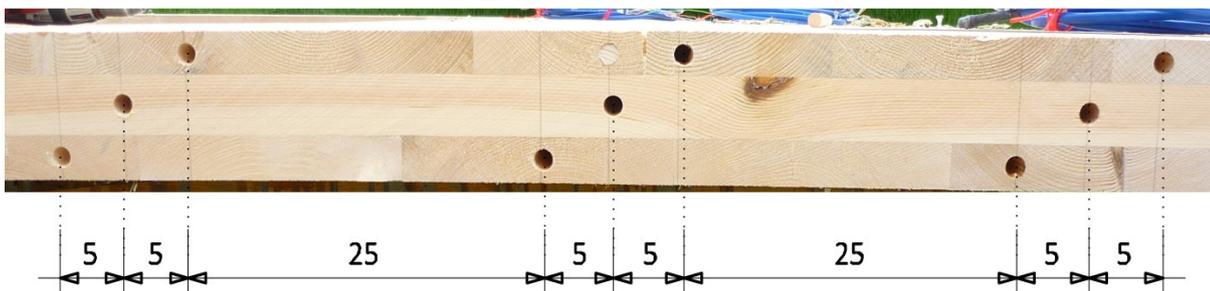


Abb. 12: gesamtes Lochbild

Die Kabelausgänge verlaufen dabei in der untersten Messreihe (X1,X2,X4) nach oben und die der oberen zwei Messreihen (2, 4, 5 und 6 – 8) nach unten. Da die Kabel an der unteren Stirnseite wieder an der Wandinnenseite nach oben zum Datenlogger geführt wurden, war es notwendig diese an der Unterseite in die BSP-Wand einzuschlitzen (siehe Abb. 13). Um die Luftdichtheit zu garantieren, wurden außerdem die Bohrlöcher mit Silikon ausreichen abgedichtet (siehe Abb. 14).



*Abb. 13: Schlitz für Kabelführung*

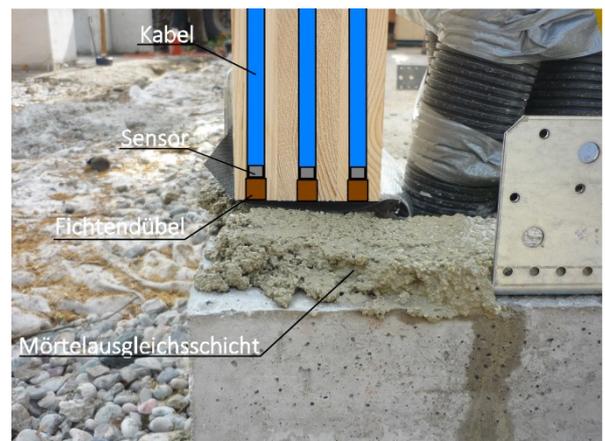


*Abb. 14: abgedichtete Kabel*

Die Bohrlöcher an der schwelennahen Messstelle wurden unter Berücksichtigung der Faserrichtung (außer in der Mittellage) wieder mit speziell aus Fichte angefertigten Holzdübeln verschlossen, um so einen Einfluss des Wandaufagers (Mörtelausgleichsschicht) zu vermeiden (siehe Abb. 16). Abbildung 15 zeigt eine schematische Darstellung dieser Messstelle.



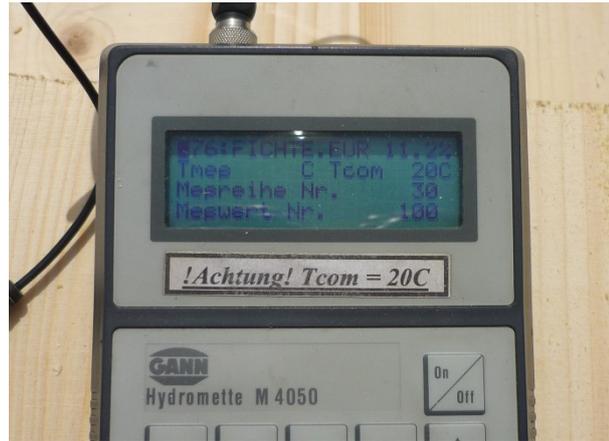
*Abb. 16: verschlossene Bohrlöcher*



*Abb. 15: schematische Darstellung*



*Abb. 17: Feuchtemessung*



*Abb. 18: Messergebnis*

Um die Rohdichte und den Feuchtegehalt der betreffenden Wand zu ermitteln, wurde ein Teil des Fensterstauschnittes verwendet. Diese Probe, mit den Maßen 30,5 cm / 15 cm / 10 cm (L/B/H), wies ein Gewicht von 2909,0 [g] auf, womit sich eine Rohdichte von 530 [kg/m<sup>3</sup>] ergibt. Die an zwei Stellen mittels Elektronik-Feuchtemessgerät gemessene Holzfeuchte betrug jeweils 11,2 % (siehe Abb. 18 und Abb. 17).



*Abb. 20: Kabelführung*



*Abb. 19: versetzte BSP-Wand*

## 6-3 MESSDAUER

Da sich in der Natur die Umgebungsbedingungen nicht nur mit der Tageszeit (Innenklima) sondern auch mit der Jahreszeit ändern (Außenklima), ist es nun notwendig die Messdaten über die Dauer von mindestens einem Jahr zu erheben, um möglichst repräsentative Messergebnisse zu bekommen. Solche Umgebungsbedingungen sind:

- veränderliche Solarstrahlung und Außenlufttemperatur im Tagesgang
- variable interne Wärmequellen im Tagesgang
- unterschiedliches Lüftungsverhalten
- unterbrochener Heizbetrieb (Nachtabstaltung oder -absenkung)
- Schlagregenbelastung
- veränderliche relative Luftfeuchte

Sollte es seitens des Bauherrn erwünscht sein, die Messungen über einen längeren Zeitraum durchzuführen, wäre dies ohne weiteres möglich. Ein sogenanntes Langzeitmonitoring wäre nicht nur für die Wissenschaft ein großer Gewinn, sondern auch für den Bauherrn selbst. Dieser könnte dann regelmäßig über den bauphysikalischen Zustand des Gebäudes informiert werden. Im Sinne der Dauerhaftigkeit, Schadensprävention und einer eventuellen Schadensanalyse ein klarer Vorteil.

## 6-4 BAUPHYSIKALISCHE SIMULATIONEN

### 6-4.1 STATIONÄRE BERECHNUNGEN

Aus Abb. 22 lässt sich erkennen, dass der Wärmebrückeneinfluss sehr gering ist, da sich die Isotherme (Linien gleicher Temperatur) relativ schnell wieder beruhigen und parallel zu den Bauteiloberflächen verlaufen. Auch die Gefahr der Kondensatbildung (Abb. 21) ist sehr gering, wobei bei dieser Berechnung eine Außentemperatur von  $-12,8^{\circ}\text{C}$  und eine relative Feuchte von 50% zugrunde gelegt wurde. Im Allgemeinen stellt diese Detaillösung also eine sehr gute Variante der Sockelausführung dar.

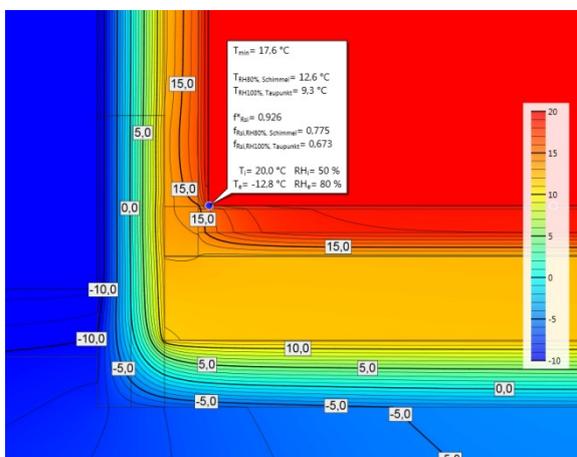


Abb. 22: Temperaturverlauf (Isotherme)

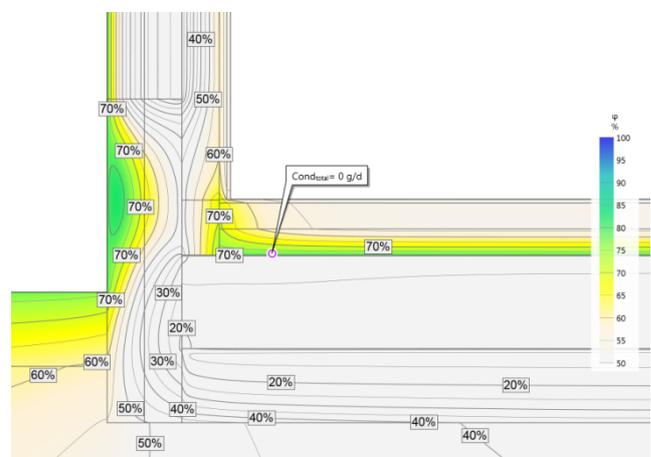


Abb. 21: relative Feuchte

## 6-5 ERSTE ERGEBNISSE

Die Installation des Datenloggers erfolgte am 22.08.2015 und somit etwa 15 Wochen nach Einbringung der Sensoren am 05.05.2015. Der lange Zeitraum zwischen der Einbringung der Sensoren und dem Beginn der Messung ist durch die Fertigstellung des Forschungsobjektes zu begründen, da der Datenlogger erst nach dem Innenausbau installiert werden konnte. Einerseits konnte dadurch die Bauphase nicht mitgemessen werden, andererseits verging ausreichend Zeit damit sich ein Mikroklima in den Monitoring-Positionen bilden konnte. Die Auswertung der gewonnenen Daten (Temperatur und relative Luftfeuchte) erfolgte mit dem analytischen Ansatz der Holzgleichsfeuchte nach Hailwood-Horrobin und ist in dargestellt.

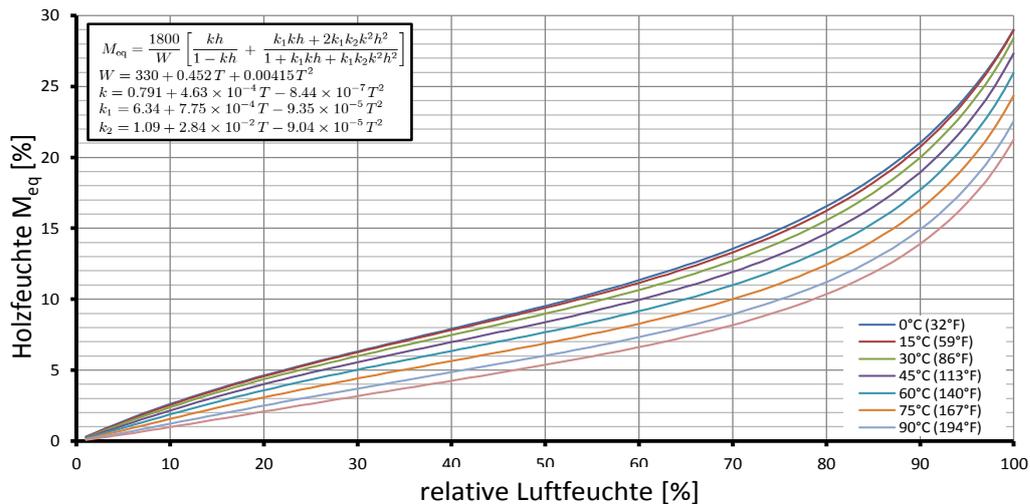


Abbildung 6.1: Ausgleichsfeuchte für Fichtenholz nach Hailwood-Horrobin

### Punkte 1-3

In Abbildung 6.2 ist der Temperaturverlauf der Monitoring-Positionen 1-3, des Innenklimas und des Außenklimas dargestellt. Gut zu erkennen sind dabei die qualitativ ähnlichen Verläufe aller Messstellen. Da in dieser Messperiode das Forschungshaus noch nicht bewohnt bzw. beheizt wurde, folgt das Innenklima dem Außenklima welches aufgrund der heißen Tage und kühlen Herbstnächte stark schwankt. Weiters sind die eng beieinander liegenden Ganglinien (siehe Kapitel 4:) innerhalb der BSP-Wand ersichtlich.

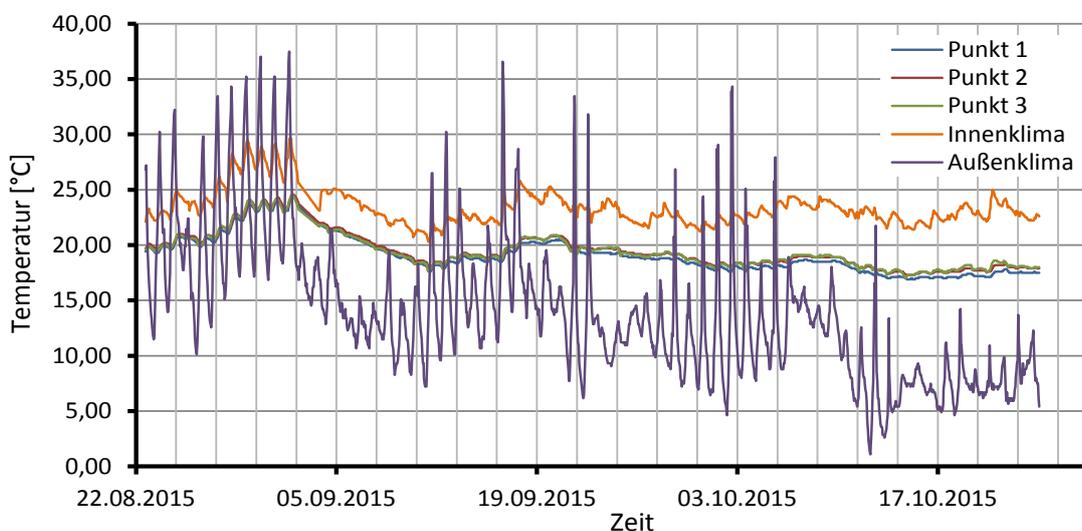
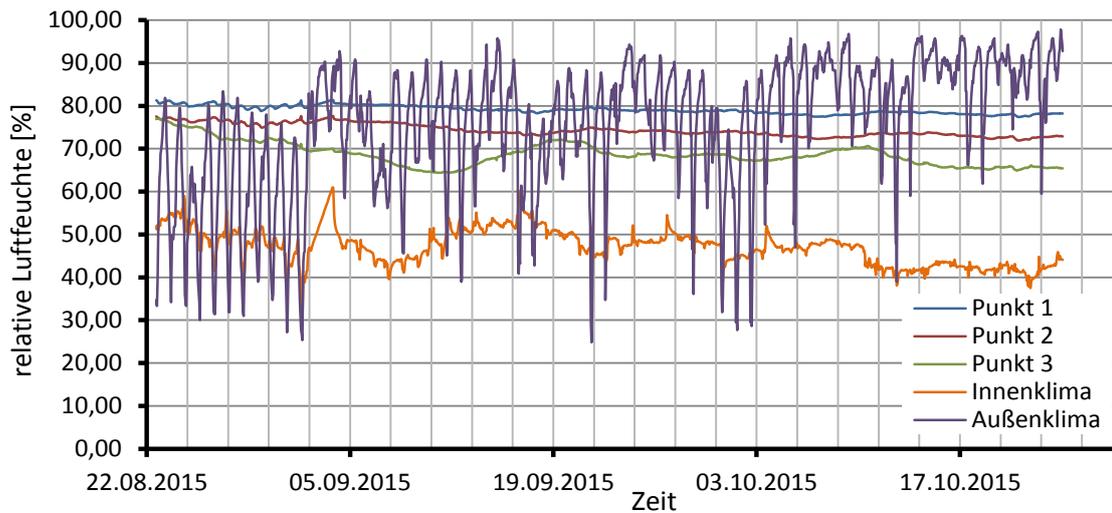
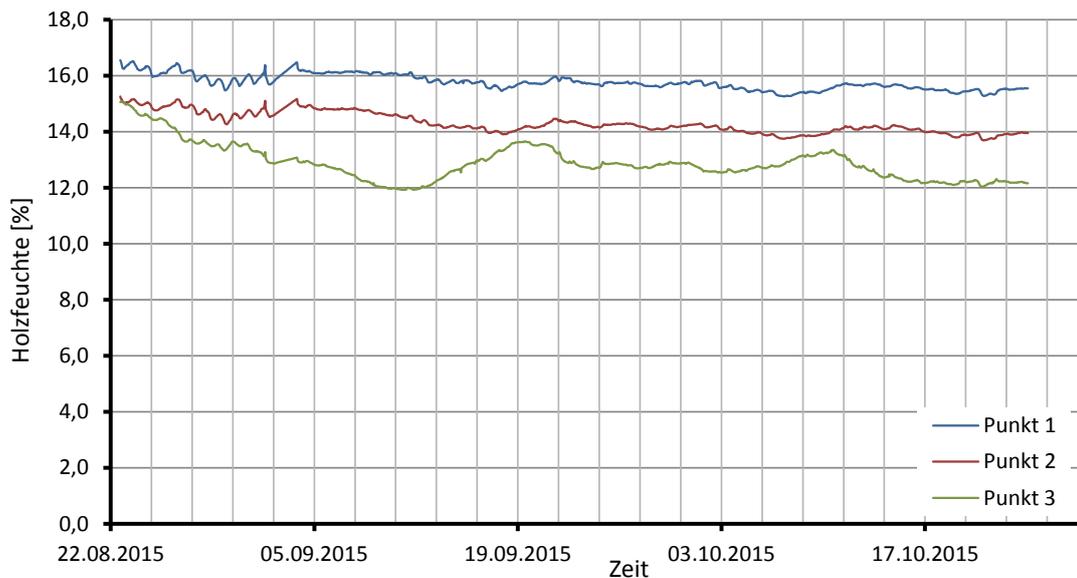


Abbildung 6.2: Temperaturverlauf



**Abbildung 6.3: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 1-3**

Die Ganglinien der relativen Luftfeuchte in Abbildung 6.3 zeigt vor allem in der äußeren und mittleren Einzelschicht (Punkt 1 und 2) einen annähernd konstanten Verlauf. Der Verlauf der inneren Schicht (Punkt 3) folgt dagegen dem Innenklima und reagiert rasch auf Änderungen des Innenklimas.

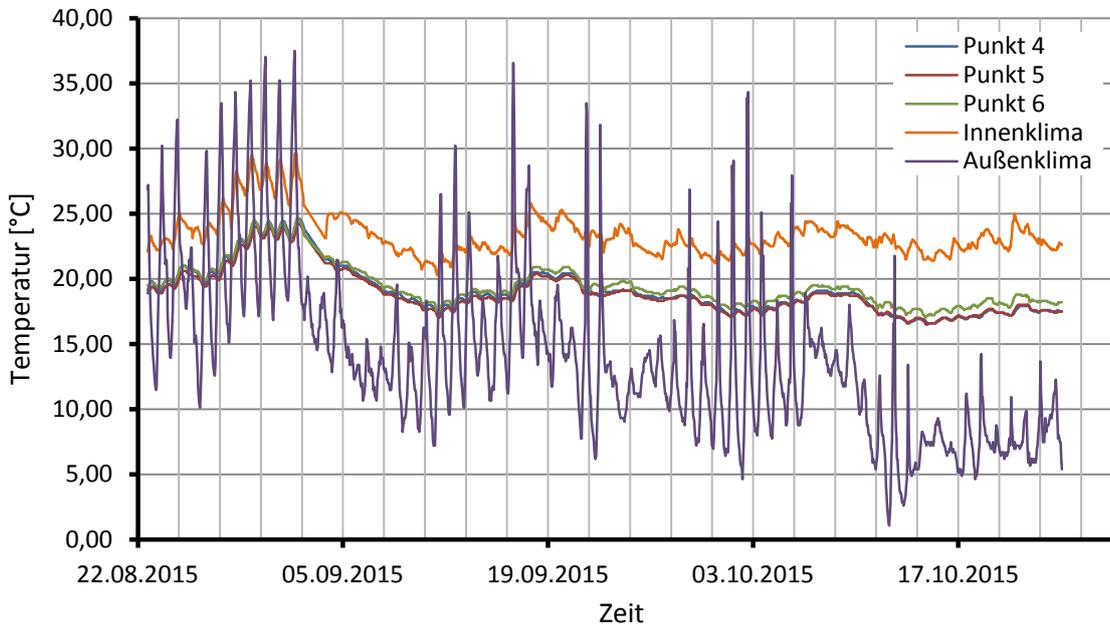


**Abbildung 6.4: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3**

In Abbildung 6.4 ist der Verlauf der Holzfeuchte dargestellt. Gut zu erkennen ist das Austrocknungspotential in den ersten 20 Tagen, besonders in der inneren Schicht. Hier sinkt der Holzfeuchtegehalt von 15% auf 12%. Weniger stark ausgeprägt ist dieses Verhalten in der mittleren und äußeren Schicht (Punkte 1 und 2) wobei sich nach ungefähr einem Monat ein Holzfeuchtegehalt von rund 14% bzw. 16% einstellt.

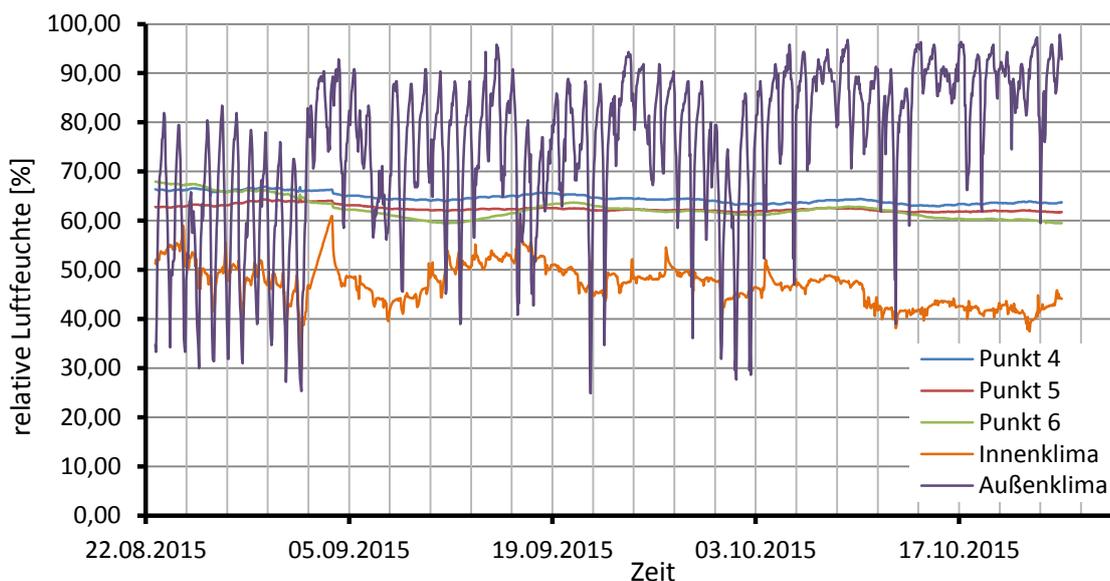
### Punkte 4-6

Die Temperaturverläufe in den Punkten 4-6 (siehe Abbildung 6.5) entsprechen, bis auf ein paar nicht nennenswerten Unterschieden, jenen der Punkte 1-3 weswegen in weiter Folge nicht näher darauf eingegangen wird.

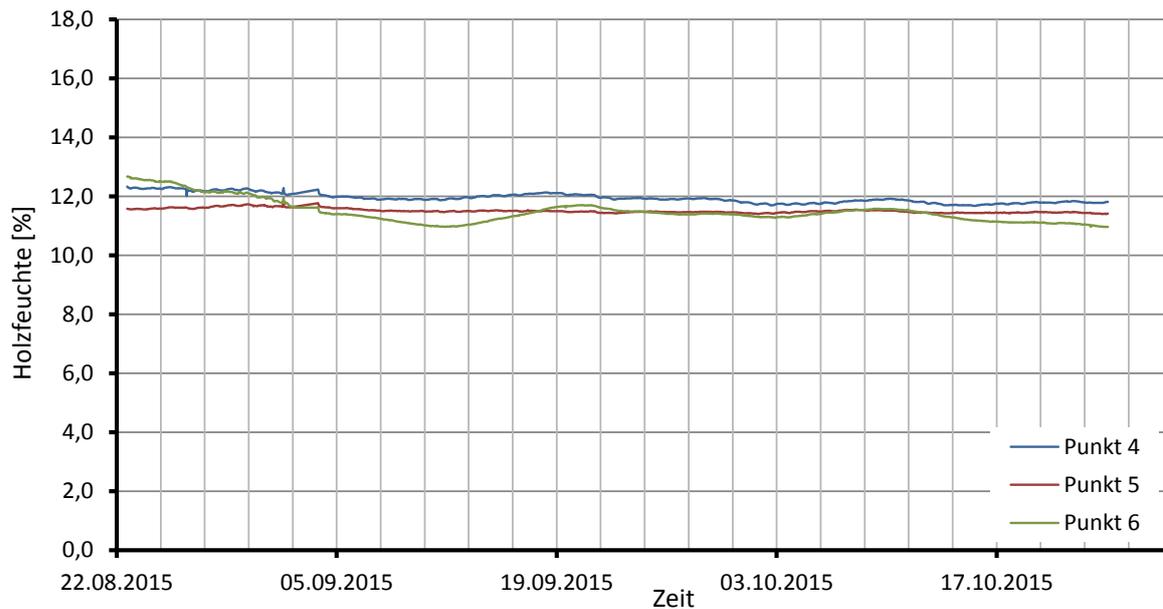


*Abbildung 6.5: Temperaturverlauf in den Punkten 4-6*

Größere Unterschiede zur untersten Messreihe (Punkte 1-3) zeigen sich jedoch in den Messergebnissen der relativen Feuchte. Während die relative Luftfeuchte im Sockelnahen Bereich Werte zwischen 70% und 80% annahm, liegt diese in den Punkten 4-6 (30 cm oberhalb des Sockels) bereits zwischen 60% und 65%. Auch gut erkennbar ist das Zusammenrücken der Ganglinien wobei auch hier die höchste relative Feuchte in der äußersten Einzelschicht erreicht wird.



*Abbildung 6.6: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6*

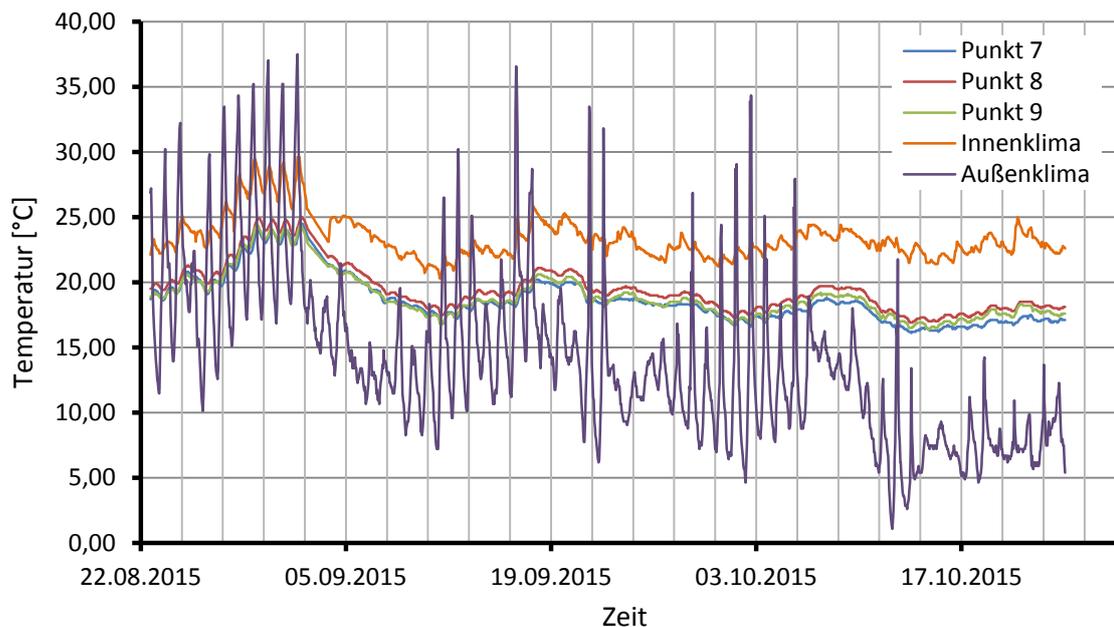


**Abbildung 6.7: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6**

Die Auswertung des Holzgleichsfeuchte (siehe Abbildung 6.7) ergab für alle drei Monitoring-Positionen Werte von rund 12% und erfüllt somit die Anforderung der Nutzungsklasse 1 nach ÖNORM B1995-1-1:2014. Ein Grund für die Differenz zur sockelnahen Messreihe (Punkte 1-3) liegt am Wärmebrückeneinfluss des Sockels und der darunter liegenden Fundamentplatte. Ein weiterer Grund für die erhöhte Holzfeuchte ist an der durch Spritzwasser belasteten Zone zu finden. Es kann also geschlussfolgert werden, dass die Monitoring-Positionen 4-6 bereits außerhalb der gestörten, inhomogenen Zone liegen und auch nicht durch rückprallendes Spritzwasser zusätzlich belastet werden.

**Punkte 7-9**

Die folgenden Abbildungen zeigen die Auswertung der Monitoring-Positionen 7-9. Aufgrund der starken Ähnlichkeit zu den Punkten 4-6 wird im Folgenden nicht näher auf die Charakteristik eingegangen.



**Abbildung 6.8: Temperaturverlauf in den Punkten 7-9**

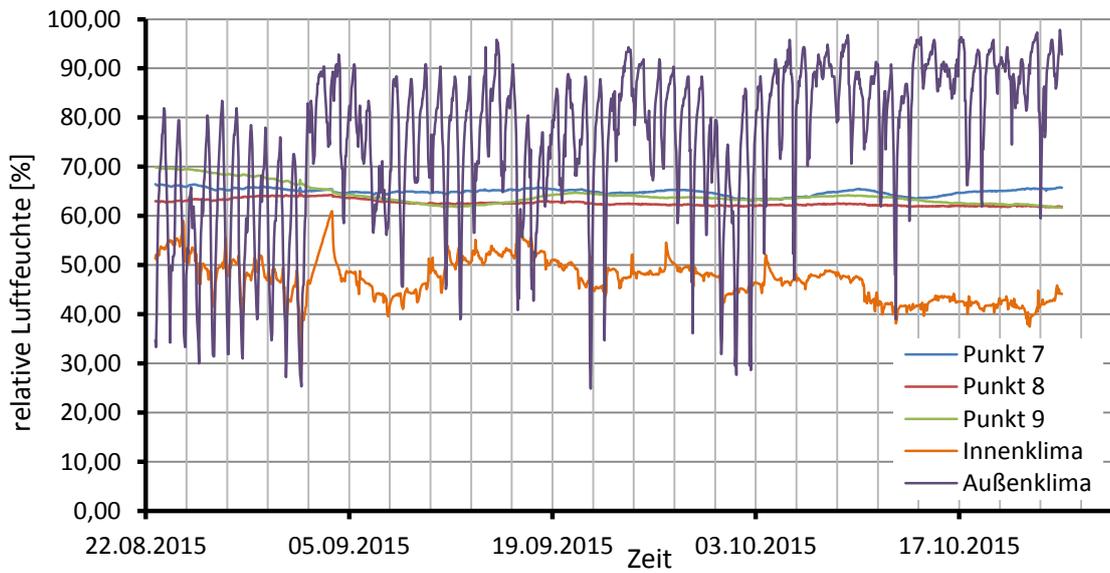


Abbildung 6.9: Verlauf der relativen Luftfeuchte den Punkten 7-9

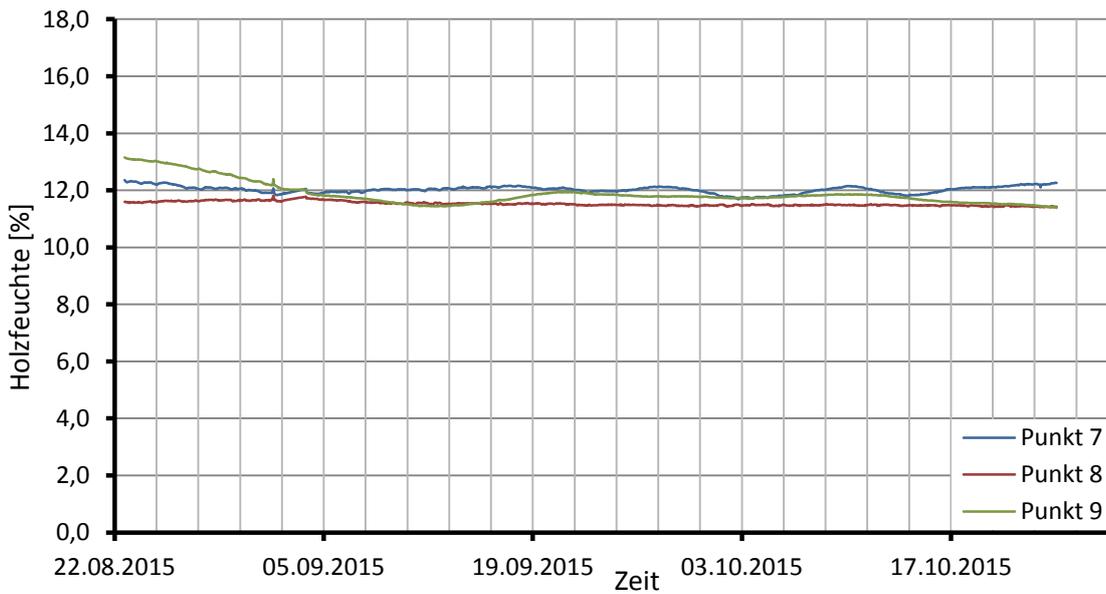
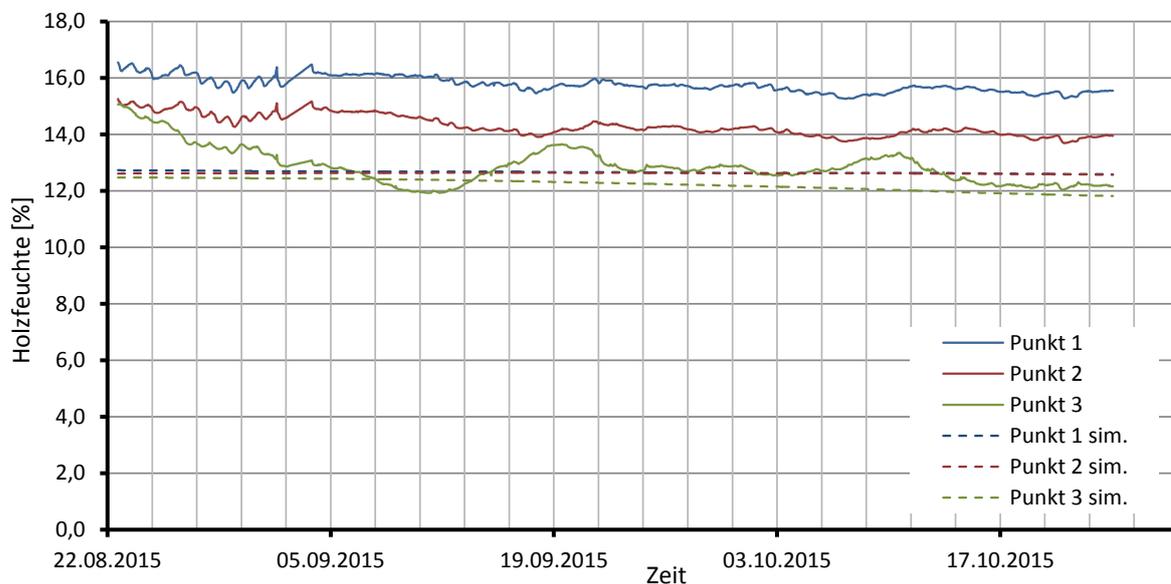


Abbildung 6.10: Verlauf der relativen Luftfeuchte den Punkten 7-9

## 6-6 SIMULATION VERSUS MESSUNG

Die Gegenüberstellung der aus der Simulation gewonnenen Daten und der Messdaten soll zeigen, wie realistisch das hygrothermische Verhalten eines Bauteils mit instationären Berechnungen abgebildet werden kann. Dafür wurde die Klimadatei durch das vor Ort gemessene Außenklima entsprechend abgeändert.

Abbildung 6.11 zeigt die unterste (sockelnahe) Messreihe mit den Punkten 1-3. Dabei stellen (wie auch in weiterer Folge) die durchgezogenen Linien die Messdaten dar und die gestrichelten jene der Simulationsdaten. Zwar zeigen die Verläufe in beiden Fällen eine Zunahme der Holzfeuchte von innen nach außen, allerdings liegen die Ganglinien der Messdaten weiter auseinander und sind vor allem in Punkt 1 und 2 um rund 2% bzw. 4% höher. Diese Differenz kann einerseits durch die, in den Simulationen unberücksichtigte, Spritzwasserbelastung erklärt werden und andererseits durch die Berücksichtigung des Erdreiches, welches ohne Bodenuntersuchung in der Regel nur schwer in der Simulation abgebildet werden kann.



*Abbildung 6.11: Verlauf der Holzfeuchte den Punkten 1-3*

Eine wesentlich bessere Übereinstimmung zeigt sich bei den Monitoring-Positionen 4-6 welche 30 cm über dem Betonsockel installiert wurden. Hier verlaufen alle Ganglinien annähernd konstant und liegen eng beieinander. Es zeigt sich also, dass instationäre Berechnungen in homogenen und ungestörten Bereichen durchaus gute Ergebnisse liefern können. Allerdings handelt es sich bei dieser Gegenüberstellung um einen sehr geringen Berechnungs- bzw. Messzeitraum mit einer dementsprechend geringen Aussagekraft. Um eine Verifizierung des Simulationsmodells durchführen zu können, sollten unbedingt die Messdaten eines ganzen Jahres herangezogen werden.

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Ganglinien des Holzfeuchtegehaltes der obersten Messreihe mit den Monitoring-Positionen 7-9. Die Verläufe zeigen eine starke Ähnlichkeit zu den Punkten 4-6. Der Autor kommt daher zu dem Schluss, dass bereits in der mittleren Messreihe (Punkte 4-6) der Einfluss des Bauteilanschlusses nicht mehr gegeben ist. Das bedeutet dass es sich in Monitoring-Position 4-9 um einen homogenen ungestörten Bereich in der BSP-Wand handelt.

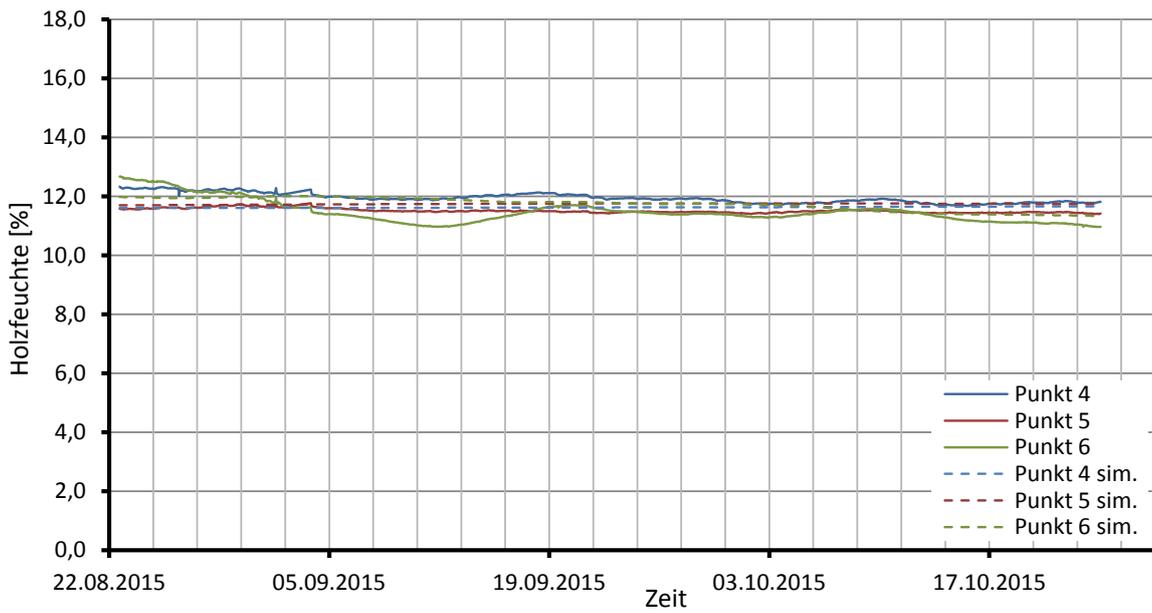


Abbildung 6.12: Verlauf der Holzfeuchte den Punkten 4-6

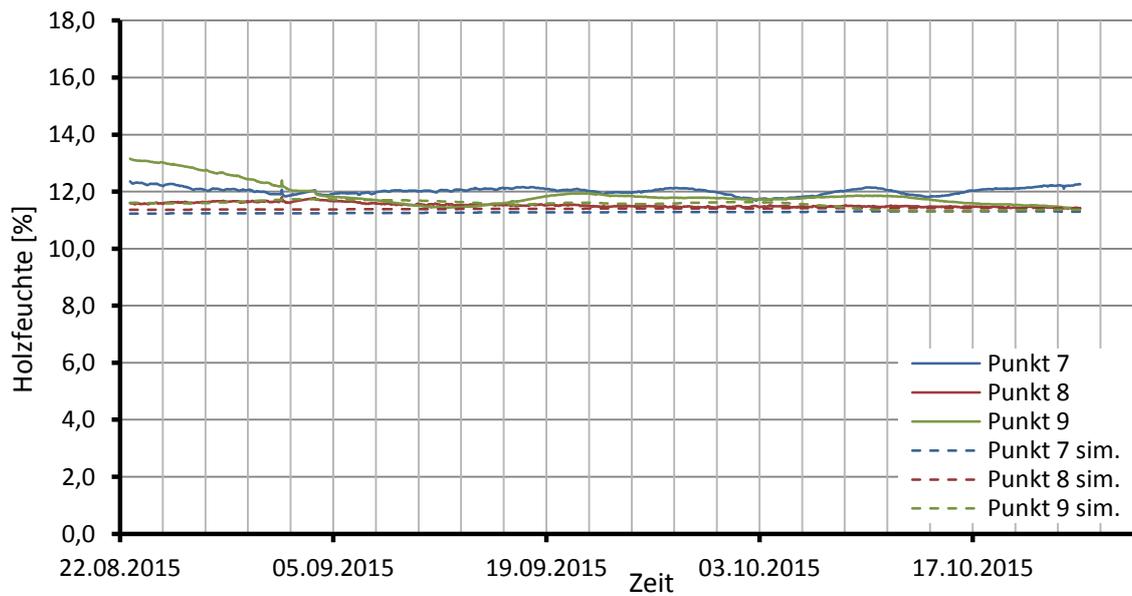


Abbildung 6.13: Verlauf der Holzfeuchte den Punkten 7-9

# ANHANG A VERZEICHNISSE

## A-1 Literaturverzeichnis

1. **Schickhofer, G.** *Der Baustoff Holz*. Graz : Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2006.
2. —. *Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz - Ausgewählte Forschungsaktivitäten und Einsatzbereiche*. IBK-Kolloquium, ETH Zürich : Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2011.
3. —. *Holzbau, Der Roh- und Werkstoff Holz*. Graz : Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2006.
4. **Cammerer, J.S.** *Die Wärmeschutztechnischen Eigenschaften von Holz und holzhaltigen Baustoffen*. holz.bau forschung gmbh. Leutstätten : s.n., 1983. Report.
5. **Gammerith, H.** *Leitdetails für den Holzwohnbau*. Graz : Institut für Hochbau und INdustriebau, 2003.
6. *DIN 68800-2: 2012, Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. Berlin : Deutsches Institut für Normung, 2012.
7. **Gamerith, H.** *Thermische Bauphysik*. Graz : Institut für Hoch- und Industriebau, 2000.
8. **Hilbig, G.** *Grundlagen der Bauphysik*. München : Fachbuchverlag Leipzig im Hanser- Verlag, 1999.
9. **Kautsch, Peter.** *Wärmeschutz und Feuchtigkeitsschutz*. Graz : Institut für Hochbau, 2013. 3-7643-6941-8.
10. **Schickhofer, G., Bogensperger, T., Moosbrugger, T.** *BSPHandbuch*. Graz : Verlag der technischen Universität Graz, 2010. 978-3-85125-109-8.
11. **FOGLIA, A., SONDEREGGER, W., NIEMZ P., BADER, H., WEBER, A.** *Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit neuartiger Holzwerkstoffe und Werkstoffverbunde*. Zürich : ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Holzphysik, 2006.
12. **Moor, H.** *Physikalische Grundlagen, Bau und Energie*. Zürich : Verl. der Fachvereine, 1993.
13. **Wellen, Wikipedia.** Wikipedia. [Online] [Zitat vom: 23. März 2015.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Wellen%C3%A4nge>.
14. **Willems, W. M.** *Lehrbuch der Bauphysik*. s.l. : Springer Vieweg, Juli 2012.
15. **6946:2007, ÖNORM EN ISO.** *Bauteile-Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient-Berechnungsverfahren*. Wien : ON Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
16. **Normungsinstitut, Österreichisches.** *ÖNORM B 8110-2:2003*. Wien : Österreichisches Normungsinstitut , 2003.
17. *Baumarkt.de.* [Online] [Zitat vom: 02. April 2015.] <http://www.baumarkt.de/nxs/9954///baumarkt/schablone1/Mit-Bitumenbahnen-Flachdach-oder-Keller-abdichten>.
18. Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg. [Online] [Zitat vom: 02. April 2015.] <http://www.bubw.de/?lvl=2979>.
19. **Zürcher, C. und Frank, T.** *Bauphysik Bau & Energie*. Zürich : vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2014.
20. **Prezi.** www.Prezi.com. [Online] [Zitat vom: 18. März 2015.] <https://prezi.com/2v5q2c1bn3bh/die-anomalie-des-wassers/>.

21. Wikipedia Ausdehnungskoeffizient. [Online] [Zitat vom: 18. März 2015.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Ausdehnungskoeffizient>.
22. **Niemz, P und Sonderegger, W.** *Untersuchungen zum Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen*. Zürich : Institut für Baustoffe, IfB, 2009.
23. **Wikipedia.** Wikipedia Kapillarwirkung. [Online] [Zitat vom: 22. Jänner 2015.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Kapillarit%C3%A4t>.
24. **FOGLIA, A., SONDEREGGER, W., NIEMZ P., BADER, H., WEBER, A.** *Untersuchungen zu ausgewählten Einflussfaktoren auf den Diffusionswiderstand von Holz- und Verbundwerkstoffen*. Zürich : ETH Zürich, Juli, 2006.
25. **Neubrand, H.** *Schimmelpilzschäden im Hochbau*. s.l. : Sachverständigengemeinschaft für Immobilien, Bauen und Umwelt, April, 2003.
26. **Sedlbauer, K.** *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Stuttgart : Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 2001.
27. **Normungsinstitut, Österreichisches.** *ÖNORM EN ISO 10211 Wärmebrücken im Hochbau-Wärmeströme und Oberflächentemperaturen-Detaillierte Berechnungen*. Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2008.
28. —. *ÖNORM B 2320:2010 Wohnhäuser aus Holz*. Wien : Normungsinstitut, Österreichisches, 2010.
29. **Künzel, H.M.** *Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassadenflächen*. Stuttgart : Fraunhofer Institut für Bauphysik, 1994.
30. **Wakonigg, H.** Kombinierte Werte, Kapitel 8. [Hrsg.] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. *Klimaatlas Steiermark*. Version 2.0, S. 46.
31. **Künzel, H.M.** *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Stuttgart : Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 1994.
32. **Schickhofer, G.** *Holzbau, Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz*. Graz : Fachbereich Ingenieurbaukunst (IBK) an der TU Graz, 2009.
33. **Normungsinstitut, Österreichisches.** *ÖNORM EN 335-3 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten*. Wien : Normungsinstitut, Österreichisches, 2013.
34. —. *ÖNORM B 3802-1 Holzschutz im Bauwesen*. Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2015.
35. **Normungsinstitut, Österreich.** *ÖNORM EN 335 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten-Gebrauchsklassen: Definitionen, Anwendung bei Vollholz und Holzprodukten*. Wien : Normungsinstitut, Österreich, 2013.
36. **Normungsinstitut, Österreichisches.** *ÖNORM B 3692 Planung und Ausführung von Bauwerksabdichtungen*. Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
37. **Dataloggers, Gemeni.** *geminidataloggers*. <http://www.geminidataloggers.com/>. [Online] [Zitat vom: 11. 05 2015.] <http://www.geminidataloggers.com/>.
38. **Octopart.** *www.octopart.com*. [Online] [Zitat vom: 11. 05 2015.] <https://octopart.com/hih-4602-a-honeywell-55390532>.
39. **CEN.** Eurocode 5 EN 1995-1-1: Design of timber structures. Part -1-: General - Common rules and rules for buildings. [NORM]. Brussels, Belgium : European Committee for Standardization, 2004.
40. **Foglia, A., et al., et al.** *Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit neuartiger Holzwerkstoffe und Werkstoffverbunde*. Zürich : Institut für Baustoffe, IfB, 2006.
41. **Lignum Graz.** BSP Wiki. [Online] [Zitat vom: 19. März 2015.] [http://lampx.tugraz.at/~hbht/dokuwiki/doku.php?id=clt:special:building\\_physics:thermal](http://lampx.tugraz.at/~hbht/dokuwiki/doku.php?id=clt:special:building_physics:thermal).

42. **Niemz, P., Sonderegger, W.** *Untersuchungen zum Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen.* Zürich : Institut für Baustoffe IfB, Arbeitsgruppe Holzphysik, ETH Zürich, 2009.
43. **Wikipedia.** Wikipedia Kesselformel. [Online] [Zitat vom: 18. März 2015.] [http://de.wikipedia.org/wiki/Kesselformel#/media/File:Skizze\\_Kesselformel.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Kesselformel#/media/File:Skizze_Kesselformel.png).
44. **Weber, A.** *Untersuchungen zur Optimierung von Massivholz- und Verbundplatten.* Zürich : Diplomarbeit am Institut für Baustoffe, Holzphysik der ETH Zürich, 2006.
45. **Rüdisser, Daniel.** <http://www.htflux.com/de/>. [Online] [Zitat vom: 20. Mai 2015.] <http://www.htflux.com/de/>.
46. **Normungsinstitut, Österreichisches.** *ÖNORM B 8110-3:2012.* Wien : Normungsinstitut, Österreichisches, 2012.
47. —. *ÖNORM B 8110-2:2012 Wärmeschutz im Hochbau.* Wien : Normungsinstitut, Österreichisches, 2003.
48. —. *EN 1995-1-1 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.* Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
49. **Normungsinstitut, Österreich.** *ÖNORM B 8110-2:2012 Wärmeschutz im Hochbau.* Wien : Normungsinstitut, Österreich, 2003.
50. —. *ÖNORM B 2320:2010 Wohnhäuser aus Holz.* Wien : Normungsinstitut, Österreich, 2010.

## A-2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Entwicklung der BSP-Produktion in Mitteleuropa, Vgl. (2).....	2
Abbildung 1.2: Einzelschichten .....	3
Abbildung 1.3: Verklebung der Einzelschichten.....	3
Abbildung 1.4: BSP-Platte .....	3
Abbildung 1.5: Holz-Massivbauweise (5).....	5
Abbildung 1.6: Holz-Leichtbauweise (5).....	5
Abbildung 1.7: Sockel 30cm (6) .....	6
Abbildung 1.8: Sockel 15cm (6) .....	6
Abbildung 1.9: Sockel 5cm (6) .....	6
Abbildung 1.10: Decke (5).....	6
Abbildung 1.11: Decke Nassraum (5) .....	6
Abbildung 1.12: Deckenauskrantung (5).....	6
Abbildung 1.13: Warmdach (5).....	7
Abbildung 1.14: Schrägdach (5) .....	7
Abbildung 1.15: Fensteranschluss (5).....	7
Abbildung 1.16: Fensteranschluss mit Rollo (5).....	7
Abbildung 2.1: Bauteilbeanspruchung .....	10
Abbildung 2.2: Verhältnis Temperatur und Volumen.....	10
Abbildung 2.3: Längenänderung.....	11
Abbildung 2.4: spez. Wärmekapazität in Abh. der Temp. (2).....	14
Abbildung 2.5: Temperatur verschiedener Stoffe (2).....	14

Abbildung 2.6: Flüssigkeitsreservoir 1 und 2.....	15
Abbildung 2.7: Wärmeleitfähigkeit.....	17
Abbildung 2.8: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte (10).....	17
Abbildung 2.9: schematische Darstellung der Fernwärmeversorgung.....	19
Abbildung 2.10: Konvektion (3) .....	20
Abbildung 2.11: Strahlung (3).....	20
Abbildung 2.12: Wellenlänge.....	21
Abbildung 2.13: Übersicht (13).....	22
Abbildung 2.14: Energieverteilung der schwarzen Strahlung (Planck) .....	24
Abbildung 2.15: Wien'sches Verschiebungsgesetz (Wien) .....	24
Abbildung 2.16: schematische Darstellung der Strahlungsstärke verschieden dunkler Körper.....	25
Abbildung 2.17: Abstandsregel .....	25
Abbildung 2.18: homogene Bauteilschicht (Wandaufbau im Grundriss) .....	28
Abbildung 2.19: inhomogene Bauteilschicht (Wandaufbau im Grundriss) .....	28
Abbildung 2.20: materialbedingte Wärmebrücke .....	29
Abbildung 2.21 geometriebedingte Wärmebrücke.....	29
Abbildung 2.22: negative $\psi$ -Werte (Außenecke) .....	31
Abbildung 2.23 negative $\psi$ -Werte (Fensteranschluss) .....	32
Abbildung 2.24: Feuchtigkeitseinwirkungen auf Bauwerke (14) .....	34
Abbildung 2.25 aufgeflämmte Bitumenbahn (16).....	35
Abbildung 2.26 aufgeflämmte Bitumenbahn an einem Gebäude in Holz-Massivbauweise .....	35
Abbildung 2.27 Überlappung Fassade (im Grundriss) (5) .....	35
Abbildung 2.28 Überlappung bei Dachdeckung (5).....	35
Abbildung 2.29 Eindringtiefe in Abhängigkeit des Verfahrens vgl. (17) .....	36
Abbildung 2.30: Feuchtigkeitseinwirkungen auf Bauteile .....	37
Abbildung 2.31: Austrocknungsgeschwindigkeit (Krischer).....	37
Abbildung 2.32: schematische Darstellung des Partialdruckes.....	39
Abbildung 2.33: Jahresverlauf: relative Luftfeuchte (Hannover) (9).....	41
Abbildung 2.34: Aggregatzustände in Abhängigkeit der Temperatur und der benötigten Energie .....	42
Abbildung 2.35: Anomalie des Wassers (10).....	43
Abbildung 2.36: Diffusion (9).....	44
Abbildung 2.37: Verdunstung (9).....	45
Abbildung 2.38: Sorption und Desorption (9).....	45
Abbildung 2.39: Sorptionsisotherme (Fichte) nach HA. Spalt (1985) .....	46
Abbildung 2.40: Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen (Mittelwerte) (19).....	46
Abbildung 2.41: Sorptionstherme hygroskopischer poröser Stoffe in Abhängigkeit der Porenradien (schematisch) (9).....	47
Abbildung 2.42: mögliche Wassergehaltsbereiche (14).....	49

Abbildung 2.43: Adsorptionsisotherme verschiedener Holzarten (14).....	49
Abbildung 2.44: $f_{RSi}$ zur Vermeidung von Kondensat.....	52
Abbildung 2.45: $f_{RSi}$ zur Vermeidung von Schimmel .....	52
Abbildung 2.46: $f_{RSi,min}$ .....	52
Abbildung 2.47: Einfluss der Anzahl der Klebefugen auf den Wasserdiffusionswiderstand (24).....	54
Abbildung 2.48: $\mu$ -Werte bei Buche und Fichte mit stehenden Jahrringen (tangente Diffusion) (24) .....	55
Abbildung 2.49: $\mu$ -Werte bei Buche und Fichte mit liegenden Jahrringen (radiale Diffusion) (24) ....	55
Abbildung 2.50: $\mu$ -Werte bei Buche und Fichte in Faserrichtung (axiale Diffusion) (24) .....	56
Abbildung 3.1: Temperaturregionen Österreichs .....	61
Abbildung 3.2: Glaserdiagramm .....	65
Abbildung 3.3: Modell Flachdach.....	66
Abbildung 3.4: Modell Außenecke .....	66
Abbildung 3.5: Modell Auskragung.....	66
Abbildung 3.6: Modell Sockel .....	66
Abbildung 3.7: Variante „Standardausführung“ .....	68
Abbildung 3.8: Variante „reduzierte Höhe“ .....	68
Abbildung 3.9: Variante „Mindesthöhe“ .....	68
Abbildung 3.10: Variante „Betonsockel“ .....	68
Abbildung 3.11: Variante „Gitter“ .....	69
Abbildung 3.12: Variante „abgesetzte Decke“ .....	69
Abbildung 3.13: Schlagregenbelastung in Abh. der Windgeschwindigkeit (29).....	70
Abbildung 3.14: Schlagregenbelastung an einer Hausfassade (29).....	70
Abbildung 3.15: Durchschnittliche Zahl der Stunden mit Schlagregen, Graz 1996 – 2000 (ZAMG)..	71
Abbildung 3.16: Durchschnittliche Zahl der Stunden mit Schlagregen, Schöckl 1996 – 2000 (ZAMG) .....	71
Abbildung 3.17: Einflussgrößen auf das Wärmeverhalten (14).....	73
Abbildung 3.18: Diffusionsarten (14) .....	75
Abbildung 3.19: Modellspore (29).....	78
Abbildung 3.20: Linien gleicher Keimungszeit (29).....	79
Abbildung 3.21: Pilzwachstum in Abhängigkeit der Zeit und der Substratgruppe (30) .....	79
Abbildung 3.22: Pilzwachstum (28).....	80
Abbildung 3.23: Flussdiagram Rechenverfahren (28) .....	81
Abbildung 3.24: Isoplethen (28) .....	81
Abbildung 4.1: Sockelanschluss „Standardausführung“ .....	92
Abbildung 4.2: Sockelanschluss „Betonsockel“ .....	94
Abbildung 4.3: Sockelanschluss „Standardvariante“ (mit WDVS) .....	96
Abbildung 4.4: Verfahren nach Glaser: Außenwand AW1.....	100
Abbildung 4.5: Verfahren nach Glaser: Außenwand AW2.....	101

Abbildung 4.6: Verfahren nach Glaser: Außenwand AW3.....	101
Abbildung 4.7: Temperaturverlauf EG.....	102
Abbildung 4.8: Temperaturverlauf KG.....	103
Abbildung 4.9: Wärmestrom [W/m <sup>2</sup> ].....	103
Abbildung 4.10: Wärmestrom [W/m <sup>2</sup> ] im Detail.....	103
Abbildung 4.11: relative Feuchte $\varphi$ [%].....	104
Abbildung 4.12: relative Feuchte $\varphi$ [%] im Detail.....	104
Abbildung 4.13: Dampfstrom.....	104
Abbildung 4.14: Außenmaße.....	105
Abbildung 4.15: $\Psi$ -Wert.....	105
Abbildung 4.16: Temperaturverlauf EG.....	105
Abbildung 4.17: Temperaturverlauf KG.....	106
Abbildung 4.18: Wärmestrom [W/m <sup>2</sup> ] im Detail.....	106
Abbildung 4.19: Wärmestrom [W/m <sup>2</sup> ].....	106
Abbildung 4.20: relative Feuchte $\varphi$ [%].....	107
Abbildung 4.21: Dampfstrom.....	107
Abbildung 4.22: relative Feuchte $\varphi$ [%] im Detail.....	107
Abbildung 4.23: Außenmaße.....	108
Abbildung 4.24: $\Psi$ -Wert.....	108
Abbildung 4.25: Temperaturverlauf EG.....	108
Abbildung 4.26: Temperaturverlauf KG.....	109
Abbildung 4.27: Wärmestrom [W/m <sup>2</sup> ] im Detail.....	109
Abbildung 4.28: Wärmestrom [W/m <sup>2</sup> ].....	109
Abbildung 4.29: relative Feuchte $\varphi$ [%].....	110
Abbildung 4.30: Dampfstrom.....	110
Abbildung 4.31: relative Feuchte $\varphi$ [%] im Detail.....	110
Abbildung 4.32: Außenmaße.....	111
Abbildung 4.33: $\Psi$ -Wert.....	111
Abbildung 4.34: Dampfdiffusionsarten.....	111
Abbildung 4.35:.....	112
Abbildung 4.36:.....	112
Abbildung 4.37:.....	112
Abbildung 4.38: Sonneneinstrahlung und Regeneinfall für den Standort Graz.....	113
Abbildung 4.39: Außenklima.....	113
Abbildung 4.40: Innenklima.....	113
Abbildung 4.41: Betonsockel.....	114
Abbildung 4.42: Standardvar. (WDVS).....	114
Abbildung 4.43: Standardvariante.....	114

Abbildung 4.45: feuchteabh. Wärmeleitfähigkeit .....	114
Abbildung 4.44: temperaturabh. Wärmeleitfähigkeit.....	114
Abbildung 4.46: Wasserdampfdiffusionswiderstand .....	115
Abbildung 4.47: Feuchtespeicherfunktion .....	115
Abbildung 4.48: Temperaturverlauf in den Punkten 1-3.....	116
Abbildung 4.49: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 1-3.....	117
Abbildung 4.50: Jahresverlauf: relative Luftfeuchte (Hannover) (5).....	117
Abbildung 4.51: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3.....	118
Abbildung 4.52: Umhüllende der Punkte 1-3.....	118
Abbildung 4.53: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6.....	119
Abbildung 4.54: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6.....	119
Abbildung 4.55: Umhüllende der Punkte 4-6.....	120
Abbildung 4.56: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9.....	120
Abbildung 4.57: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 7-9.....	121
Abbildung 4.58: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9.....	121
Abbildung 4.59: Umhüllende der Punkte 7-9.....	122
Abbildung 4.60: Modell .....	122
Abbildung 4.61: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3.....	122
Abbildung 4.62: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 1-3.....	123
Abbildung 4.63: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3.....	124
Abbildung 4.64: Umhüllende der Punkte 1-3.....	124
Abbildung 4.65: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6.....	125
Abbildung 4.66: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6.....	125
Abbildung 4.67: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6.....	126
Abbildung 4.68: Umhüllende der Punkte 4-6.....	126
Abbildung 4.69: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9.....	127
Abbildung 4.70: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 7-9.....	127
Abbildung 4.71: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9.....	128
Abbildung 4.72: Umhüllende der Punkte 7-9.....	128
Abbildung 4.73: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3.....	129
Abbildung 4.74: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 1-3.....	130
Abbildung 4.75: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3.....	130
Abbildung 4.76: Umhüllende der Punkte 1-3.....	131
Abbildung 4.77: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6.....	131
Abbildung 4.78: Umhüllende der Punkte 4-6.....	132
Abbildung 4.79: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6.....	132
Abbildung 4.80: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6.....	133
Abbildung 4.81: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9.....	133

Abbildung 4.82: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 7-9.....	134
Abbildung 4.83: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9.....	134
Abbildung 4.84: Umhüllende der Punkte 7-9.....	135
Abbildung 4.85: Isoplethen Punkt 1.....	136
Abbildung 4.86: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9.....	137
Abbildung 4.87: Isoplethen Punkt 2.....	137
Abbildung 4.88: Isoplethen Punkt 3.....	137
Abbildung 4.90: Isoplethen Punkt 2.....	138
Abbildung 4.91: Isoplethen Punkt 3.....	138
Abbildung 4.89: Isoplethen Punkt 1.....	138
Abbildung 4.92: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 1.....	138
Abbildung 4.93: Isoplethen Punkt 1.....	139
Abbildung 4.94: Isoplethen Punkt 2.....	139
Abbildung 4.95: Isoplethen Punkt 3.....	139
Abbildung 4.96: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 1.....	139
Abbildung 4.97: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 1 bis 3.....	140
Abbildung 4.98: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkt 4 bis 6.....	140
Abbildung 4.99: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkt 7 bis 9.....	141
Abbildung 4.100: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 1 bis 3.....	141
Abbildung 4.101: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 4 bis 6.....	142
Abbildung 4.102: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 7 bis 9.....	142
Abbildung 4.103: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 1 bis 3.....	143
Abbildung 4.104: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 4 bis 6.....	143
Abbildung 4.105: Entwicklung des Feuchtegehaltes in den Punkten 7 bis 9.....	144
Abbildung 4.106: Deckenauskrragung gedämmt.....	148
Abbildung 4.107: Deckenauskrragung ungedämmt.....	148
Abbildung 4.108: Deckenauskrragung Standardvariante.....	149
Abbildung 4.109: Deckenauskrragung mit ungedämmter Unterseite.....	152
Abbildung 4.110: Deckenauskrragung mit Ausführung als Nassraum.....	154
Abbildung 4.111: Bad mit Badewanne als Dusche.....	156
Abbildung 4.112: Bad mit Wanne und Dusche (Duschtasse).....	156
Abbildung 4.113: Bad mit Wanne und Dusche (Bodenablauf).....	156
Abbildung 4.114: Beispiel für eine hohe Beanspr.....	156
Abbildung 4.115: Nassraum.....	160
Abbildung 4.116: Standardvariante.....	160
Abbildung 4.117: Nassraum.....	160
Abbildung 4.118: außen ungedämmt.....	160
Abbildung 4.119: Standardvariante.....	160

Abbildung 4.120: Verfahren nach Glaser: Außenwand AW1.....	164
Abbildung 4.121: Verfahren nach Glaser: Geschossdecke GD2.....	165
Abbildung 4.122: Verfahren nach Glaser: Geschossdecke GD3 (ungedämmt).....	166
Abbildung 4.123: Verfahren nach Glaser: Geschossdecke GD3 (mit Innendämmung).....	166
Abbildung 4.124: Verfahren nach Glaser: Geschossdecke GD4.....	167
Abbildung 4.125: Temperaturverlauf OG.....	168
Abbildung 4.126: Temperaturverlauf EG.....	169
Abbildung 4.127: Wärmestrom Deckenauskrugung.....	169
Abbildung 4.128: $\Psi$ -Wert.....	170
Abbildung 4.129: Brettsperrholzwand im Detail.....	170
Abbildung 4.130: relative Feuchte.....	171
Abbildung 4.131: Partialdruck.....	171
Abbildung 4.132: Dampfstrom.....	171
Abbildung 4.133: Kondensatmenge.....	172
Abbildung 4.134: Temperaturverlauf OG.....	172
Abbildung 4.135: Wärmestrom Deckenauskrugung (ungedämmte Unterseite).....	173
Abbildung 4.136: Temperaturverlauf EG.....	173
Abbildung 4.137: $\Psi$ -Wert.....	174
Abbildung 4.138: Brettsperrholzwand im Detail.....	174
Abbildung 4.139: relative Feuchte.....	175
Abbildung 4.140: Partialdruck.....	175
Abbildung 4.141: Dampfstrom.....	175
Abbildung 4.142: Kondensatmenge.....	176
Abbildung 4.143: Temperaturverlauf OG.....	176
Abbildung 4.144: Temperaturverlauf EG.....	177
Abbildung 4.145: Wärmestrom Deckenauskrugung [ $W/m^2$ ].....	177
Abbildung 4.146: $\Psi$ - Wert.....	178
Abbildung 4.147: Brettsperrholzwand im Detail.....	178
Abbildung 4.148: relative Feuchte.....	179
Abbildung 4.149: relative Feuchte im Detail.....	179
Abbildung 4.150: Dampfstrom.....	179
Abbildung 4.151: Monitoring-Positionen (Standardvariante).....	180
Abbildung 4.152: Monitoring-Positionen (ungedämmt).....	180
Abbildung 4.153: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3.....	180
Abbildung 4.154: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 1-3.....	181
Abbildung 4.155: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3.....	181
Abbildung 4.156: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6.....	182
Abbildung 4.157: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 4-6.....	182

---

Abbildung 4.158: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6.....	183
Abbildung 4.159: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9.....	184
Abbildung 4.160: Verlauf der relativen Feuchte in den Punkten 7-9.....	184
Abbildung 4.161: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9.....	185
Abbildung 4.162: Umhüllende der Punkte 1-3.....	185
Abbildung 4.163: Umhüllende der Punkte 4-6.....	186
Abbildung 4.164: Umhüllende der Punkte 7-9.....	186
Abbildung 4.165: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3.....	187
Abbildung 4.166: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 1-3.....	187
Abbildung 4.167: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3.....	188
Abbildung 4.168: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6.....	188
Abbildung 4.169: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6.....	189
Abbildung 4.170: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6.....	189
Abbildung 4.171: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9.....	190
Abbildung 4.172: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 7-9.....	191
Abbildung 4.173: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 7-9.....	191
Abbildung 4.174: Umhüllende der Holzfeuchte in den Punkten 1-3 .....	192
Abbildung 4.175: Umhüllende der Holzfeuchte in den Punkten 4-6 .....	192
Abbildung 4.176: Umhüllende der Holzfeuchte in den Punkten 7-9 .....	193
Abbildung 4.177: Isolethen Punkt 2.....	194
Abbildung 4.178: Isolethen Punkt 1.....	194
Abbildung 4.179: Isolethen Punkt 3.....	194
Abbildung 4.180: Isolethen Punkt 4.....	194
Abbildung 4.181: Isolethen Punkt 5.....	194
Abbildung 4.182: Isolethen Punkt 6.....	194
Abbildung 4.183: Isolethen Punkt 7.....	195
Abbildung 4.184: Isolethen Punkt 9.....	195
Abbildung 4.185: Isolethen Punkt 8.....	195
Abbildung 4.186: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 1.....	195
Abbildung 4.187: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 2.....	196
Abbildung 4.188: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 3.....	196
Abbildung 4.189: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 4 .....	197
Abbildung 4.190: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 5.....	197
Abbildung 4.191: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 6.....	198
Abbildung 4.192: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 7 .....	198
Abbildung 4.193: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 8.....	199
Abbildung 4.194: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 9.....	199
Abbildung 4.195: Isolethen Punkt 1.....	200

Abbildung 4.196: Isoplethen Punkt 9 .....	200
Abbildung 4.197: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 1 .....	201
Abbildung 4.198: biohygrothermisches Verfahren in Punkt 9 .....	201
Abbildung 4.199: Flachdach Standardvariante (9) .....	203
Abbildung 4.200: Flachdach (9) .....	203
Abbildung 4.201: Flachdach Standardvariante (Attika mit BSP) (9) .....	204
Abbildung 4.202: Flachdach Standardvariante (Attika mit OSB) (9) .....	205
Abbildung 4.203: Verfahren nach Glaser: Flachdach FD1 .....	206
Abbildung 4.204: Standardvariante (Attika mit OSB) .....	207
Abbildung 4.205: Standardvariante (Attika mit BSP) .....	207
Abbildung 4.206: Oberflächentemperatur .....	207
Abbildung 4.207: Isotherme .....	208
Abbildung 4.208: Wärmestrom .....	208
Abbildung 4.209: relative Feuchte $\phi$ [%] .....	208
Abbildung 4.210: Kondensatmenge .....	208
Abbildung 4.211: relative Feuchte $\phi$ [%] im Detail .....	209
Abbildung 4.212: Diffusionsstrom im Detail .....	209
Abbildung 4.213: Oberflächentemperatur .....	209
Abbildung 4.214: Isotherme .....	209
Abbildung 4.215: Wärmestrom .....	210
Abbildung 4.216: Dampfstrom .....	210
Abbildung 4.217: relative Feuchte $\phi$ [%] .....	210
Abbildung 4.218: Kondensatmenge .....	210
Abbildung 4.219: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3 .....	211
Abbildung 4.220: Verlauf der relativen Feuchte $\phi$ [%] in den Punkten 1-3 .....	211
Abbildung 4.221: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 1-3 .....	212
Abbildung 4.222: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6 .....	212
Abbildung 4.223: Verlauf der relativen Feuchte $\phi$ [%] in den Punkten 4-6 .....	213
Abbildung 4.224: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 4-6 .....	213
Abbildung 4.225: Verlauf der Temperatur in den Punkten 7-9 .....	214
Abbildung 4.226: Verlauf der relativen Feuchte $\phi$ [%] in den Punkten 7-9 .....	214
Abbildung 4.227: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 7-9 .....	215
Abbildung 4.228: Verlauf der Temperatur in den Punkten 1-3 .....	215
Abbildung 4.229: Verlauf der relativen Feuchte $\phi$ [%] in den Punkten 1-3 .....	216
Abbildung 4.230: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 1-3 .....	216
Abbildung 4.231: Verlauf der Temperatur in den Punkten 4-6 .....	217
Abbildung 4.232: Verlauf der relativen Feuchte $\phi$ [%] in den Punkten 1-3 .....	217
Abbildung 4.233: Verlauf der Holzfeuchte [M-%] in den Punkten 4-6 .....	217

Abbildung 4.234: Isoplethen Punkt 4.....	218
Abbildung 4.235: Isoplethen Punkt 6.....	218
Abbildung 4.236: Isoplethen Punkt 5.....	218
Abbildung 4.237: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 4.....	218
Abbildung 4.238: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 5.....	219
Abbildung 4.239: Biohygrothermisches Verfahren in Punkt 5.....	219
Abbildung 6.1: Temperaturverlauf.....	232
Abbildung 6.2: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 1-3.....	233
Abbildung 6.3: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 1-3.....	233
Abbildung 6.4: Temperaturverlauf in den Punkten 4-6.....	234
Abbildung 6.5: Verlauf der relativen Luftfeuchte in den Punkten 4-6.....	234
Abbildung 6.6: Verlauf der Holzfeuchte in den Punkten 4-6.....	235
Abbildung 6.7: Temperaturverlauf in den Punkten 7-9.....	235
Abbildung 6.8: Verlauf der relativen Luftfeuchte den Punkten 7-9.....	236
Abbildung 6.9: Verlauf der relativen Luftfeuchte den Punkten 7-9.....	236
Abbildung 6.10: Verlauf der Holzfeuchte den Punkten 1-3.....	237
Abbildung 6.11: Verlauf der Holzfeuchte den Punkten 4-6.....	238
Abbildung 6.12: Verlauf der Holzfeuchte den Punkten 4-6.....	238

### A-3 Tabellenverzeichnis

Tab.: 1	Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_t$ (1).....	11
Tab.: 2	verschiedene Wellenlängen und zugehörige Anwendungen (5).....	21
Tab.: 3	Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge (5).....	22
Tab.: 4	Emissionsvermögen (5).....	23
Tab.: 5	Wärmeübergangswerte (8).....	26
Tab.: 6:	Zusammensetzung trockener, reiner Luft (9).....	38
Tab.: 7:	Aggregatzustände und mögliche Einwirkungen (16).....	42
Tab.: 8:	Ausdehnungskoeffizienten $\gamma$ (18).....	43
Tab.: 9:	Wasserdampfdiffusionswiderstandswerte (7).....	54
Tab.: 10:	Wasserdampfdiffusionsverhältnis (23).....	56
Tab.: 11:	Dreischichten-Regressionsmodell (15).....	62
Tab.: 12:	Berechnungstabelle.....	64
Tab.: 13:	Übersicht: Eingabedaten für WUFI (29).....	77
Tab.: 14:	Zusammenfassung der Gefährdungsklassen (33).....	84
Tab.: 15:	Zusammenfassung der Gebrauchsklassen (34).....	86
Tab.: 16:	mindest erforderliche immisionsflächenbezogene speicherwirksame Masse (9).....	88
Tab.: 17:	Luftwechselzahlen (9).....	88

Tab.: 18:	Z <sub>ON</sub> -Faktoren (9).....	89
Tab.: 19:	Aufbau Außenwand AW1 .....	93
Tab.: 20:	Aufbau Kellerwand KW1 .....	93
Tab.: 21:	Aufbau Kellerdecke KD1 .....	93
Tab.: 22:	Aufbau Sockelwand AW2 .....	95
Tab.: 23:	Aufbau Sockelwand AW3 .....	97
Tab.: 24:	Zusammenstellung der in der Berechnung verwendeten Wärmeübergangswiderstände 97	
Tab.: 25:	U-Wert Berechnung Außenwand AW1 .....	98
Tab.: 26:	U-Wert Berechnung Außenwand AW2 .....	98
Tab.: 27:	U-Wert Berechnung Außenwand AW3 .....	99
Tab.: 28:	U-Wert Berechnung Außenwand KD1 .....	99
Tab.: 29:	Ergebnisse der Standardvariante mit Hinterlüftung.....	145
Tab.: 30:	Ergebnisse der Variante Betonsockel mit Hinterlüftung .....	145
Tab.: 31:	Ergebnisse der Standardvariante mit WDVS.....	145
Tab.: 32:	Nutzungsklassen und deren mögliche entsprechende Gebrauchsklassen (35) .....	147
Tab.: 33:	Aufbau Außenwand AW1 .....	150
Tab.: 34:	Aufbau Geschoßdecke GD1 .....	150
Tab.: 35:	Aufbau Geschoßdecke GD2 .....	151
Tab.: 36:	Aufbau Geschoßdecke GD3 .....	153
Tab.: 37:	Aufbau Geschoßdecke GD4 .....	155
Tab.: 38:	Feuchtigkeitsbeanspruchung (8).....	157
Tab.: 39:	Feuchtraumabdichtungen (8).....	158
Tab.: 40:	Inspektion, Wartung und Instandhaltung (8) .....	158
Tab.: 41:	Aufbau Sockelwand AW3 .....	159
Tab.: 42:	U-Wert Außenwand AW1 .....	161
Tab.: 43:	U-Wert Geschossdecke GD1 .....	161
Tab.: 44:	U-Wert Geschossdecke GD2.....	162
Tab.: 45:	U-Wert Geschossdecke GD3 .....	162
Tab.: 46:	U-Wert Geschossdecke GD3 (optimiert).....	163
Tab.: 47:	U-Wert Geschossdecke GD4 (Nassraum) .....	163
Tab.: 48:	Ergebnisse der Standardvariante mit gedämmter Unterseite .....	202
Tab.: 49:	Ergebnisse der Variante mit ungedämmter Unterseite .....	202
Tab.: 50:	Bauteilaufbau Flachdach FD1 .....	205
Tab.: 51:	Bauteilaufbau Flachdach FD1 .....	206
Tab.: 52:	Ergebnisse der Standardvariante (Attika mit BSP).....	220
Tab.: 53:	Ergebnisse der Standardvariante (Attika mit OSB).....	220

Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte  
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl