
**Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der
Wald- und Holzforschung Nr. 2009.14**

**„Vergleichende Untersuchungen zum Feuchte- und Wärme-
verhalten in unterschiedlichen Holzwandelementen“**

Abschlussbericht

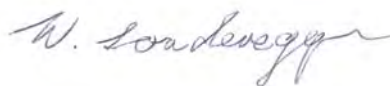
Projektleitung:

Prof. Dr. Peter Niemz



Bearbeitung:

Dr. Matus Joscak
Walter Sonderegger



Unter Mitarbeit des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, Holzkirchen

Industriepartner: Gisler Holzbau, Gantereschwil
Isofloc AG, Bütschwil
Nägeli AG, Gais
Pavatex SA, Cham
Pius Schuler AG, Rothenthurm
Tschopp Holzbau AG, Hochdorf
Flumroc AG, Flums
Kälin & Co. AG, Winterthur
Kuratle & Jaeger AG, Leibstadt
Création Holz GmbH, Herisau

Zürich, 9. Februar 2011



Abschlussbericht

Fonds zur Förderung der Wald- und
Holzforschung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU
Office fédéral de l'environnement OFEV
Ufficio federale dell'ambiente UFAM
Uffizi federal d'ambient UFAM



Fraunhofer
IBP

Vergleichende Untersuchungen zum Feuchte- und Wärmeverhalten in unterschiedlichen Holzwandelementen

M. Joscak, W. Sonderegger, P. Niemz

Abschlussbericht

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung

Vergleichende Untersuchungen zum Feuchte- und Wärmeverhalten in unterschiedlichen Holzwandelementen

Projekt Nr.:

2009.14

Durchführungsträger

ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Holzphysikgruppe
Schafmattstrasse 6
CH-8093 Zürich

Projektleitung: Prof. Dr. Peter Niemz

Projektbearbeiter: Dr. Matus Joscak, Dipl. Forsting. ETH Walter Sonderegger

Mitarbeit

Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Fraunhoferstrasse 10
D-83626 Valley

Projektleitung: Dr. Andreas Holm

Projektbearbeiter: Dr. Martin Krus, Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld, Dipl.-Ing. (FH) Theo Großkinsky

Projektdauer

Dezember 2009 bis Februar 2011

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Über das Projekt	3
2 Problemstellung	5
3 Kenntnisstand	6
4 Zielstellung	8
5 Verlauf der Messungen	9
5.1 Versuchsprinzip	9
5.2 Getestete Holzwandelemente	10
5.3 Instrumentierung	10
6 Ergebnisse	17
6.1 Wärmetransport	17
6.2 Thermographie	24
6.3 Feuchtetransport	28
6.4 Holzfeuchte	31
7 Simulation	32
7.1 Simulation in Delphin	32
7.1.1 Modelle	32
7.1.2 Eingangsgrößen und Koeffizienten	32
7.1.3 Materialeigenschaften	35
7.2 Ergebnisse der Berechnung	48
7.2.1 Wärmetransport	48
7.2.2 Feuchtetransport	53
7.2.3 Holzfeuchte	54
8 Diskussion und Zusammenfassung	57
9 Literaturverzeichnis	61
Anhang: Zustand der Wandelemente nach einem Jahr	65

Erweiterter Anhang – Beiträge des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP:

- IBP-Bericht RKB 001/2011/292 (30 Seiten)
- Protokolle der WUFI-Berechnungen (29 Seiten)
- Montagebilder von den Wandelementen (13 Seiten)

1 Über das Projekt

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden in Zusammenarbeit mit Industriepartnern aus der Schweiz (aus den Gebieten Holzbau, Holzwerkstoffe und Dämmstoffe) unterschiedliche massive Wandaufbauten und Bauten in Rahmenbauweise mit verschiedenen Dämmstoffen (auf Holzfaserbasis, Zelluloseflocken und Steinwolle) unter realen Bedingungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen (Deutschland) getestet. Die Messresultate wurden anschliessend mittels den bauphysikalischen Simulationssoftwares Delphin (Entwickler: Institut für Bauklimatik TU Dresden) und WUFI (Entwickler: Fraunhofer-Institut für Bauphysik) validiert.

Das Projekt ist eine Ergänzung laufender und bereits abgeschlossener Projekte, die in der Arbeitsgruppe Holzphysik der ETH Zürich [23], [24] und von Hermann Blumer (Création Holz GmbH) [5], mit der Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt BAFU (Fonds zur Förderung der Wald und Holzforschung und Aktionsplan Holz) sowie des schweizerischen Vereins Urholz (im Rahmen eines Regio Plus Projektes), durchgeführt wurden. Die gesamte Projektstruktur ist in Abb. 1 dargestellt.

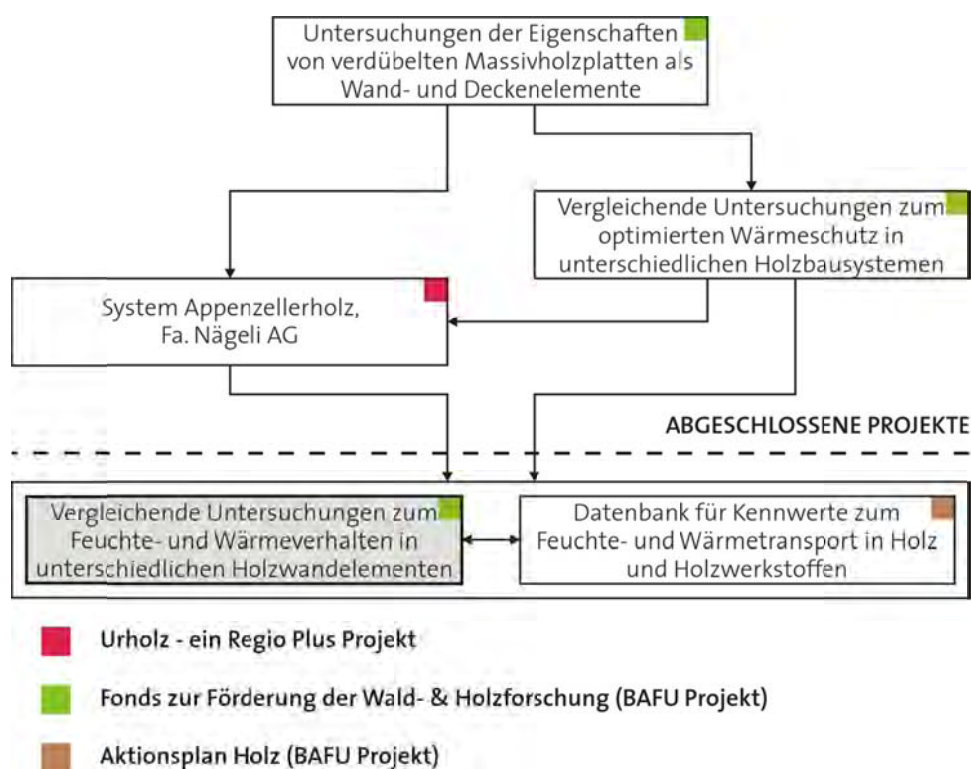


Abb. 1: Übersicht über die Projekte zu den Feuchte- und Wärmeuntersuchungen an Holzbau-elementen.

Dieses Projekt (Projekt-Nummer 2009.14) wird vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) über den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung unterstützt. An der Finanzierung haben sich weiter die Industriepartner selber beteiligt, die, neben einem Cashbeitrag, auf eigene Kosten Bau, Montage und Transport der Elemente übernommen haben (Tab. 1). Dank diesen Unterstützungen konnte die ETH Zürich die Messtechnik, Projektkoordinierung, Projektbearbeitung sowie die Infrastruktur und die Betreuung seitens des Fraunhofer-Instituts in Holzkirchen finanzieren. Am Projekt war beratend seit Bearbeitungsbeginn Herr Hermann Blumer beteiligt.

Bei der Durchführung der Simulation mittels der Software Delphin wurde im Rahmen des Projektes auch eng mit dem Institut für Bauklimatik an der TU Dresden zusammengearbeitet.

Tab. 1: Liste mit den beteiligten Industriepartnern und ihren Leistungen.

FIRMA	ADRESSE	ANSPRECHPARTNER	LEISTUNG
Gisler Holzbau	Neckertalstrasse 27 9608 Gantereschwil	Hans Gisler, Christof Deutsch	Geschlitzte Holzkonstruktion
Isofloc AG	Soorpark 9606 Bütschwil	Willi Senn, Lucia Gross	Brettstapelkonstruktion/ Dämmung
Nägeli AG	Zwislenstrasse 27 9056 Gais	Hannes Nägeli	Massivholzkonstruktion
Pavatex SA	Knounerstrasse 6330 Cham	Matthias Oelhafen, Pascal Ruedin	Dämmsteinkonstruktion
Pius Schuler AG	Kronenstrasse 12 6418 Rothenthurm	Pius Schuler	Holzplattenkonstruktion
Tschopp Holzbau AG	An der Ron 17 6280 Hochdorf	Josef Willimann, Manuel Irniger	Brettstapelkonstruktion
Flumroc AG	Industriestrasse 8 8890 Flums	Franz Kainz, Marc Saner	Holzplattenkonstruktion/ Dämmung
Kälin & Co. AG	Hobelwerkweg 45 8404 Winterthur	Hans-Ulrich Kipfer	Fassadelieferant
Kuratle & Jaecker AG	Bahnhofstrasse 311 5325 Leibstadt	George Kuratle	Transport
Création Holz GmbH	Tobelackerstrasse 6 9100 Herisau	Hermann Blumer	Beratung

2 Problemstellung

Allgemein ist derzeit ein starker Trend zur Anwendung verschiedener Holzprodukte im Bauwesen zu beobachten. In der Schweiz wurden und werden zahlreiche innovative Systeme für den wachsenden Holzbaubereich entwickelt. Insbesondere von den am Projekt beteiligten Schweizer Betrieben (Holzbauelemente der Firmen Nägeli AG, Gisler Holzbau, Tschopp Holzbau AG) wurden in den letzten Jahren zahlreiche Produkte geschaffen, die zum Teil heute weltweit eingesetzt werden.

Die für die Erstellung und Dimensionierung der Bauten erforderlichen Materialkennwerte wurden durch Vorarbeiten in der Arbeitsgruppe Holzphysik ermittelt [40], [43], [45]. Zusätzlich erfolgten zahlreiche Arbeiten zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit und des Diffusionswiderstandes von Holz und Holzwerkstoffen [43], [44]. Die Ergebnisse zeigen auf gewisse Unstimmigkeiten von bis jetzt in der Literatur oder in Normen angegebenen Kennwerten, die häufig aus sehr alten Quellen stammen. Diese veralteten Daten, meist im stationären Zustand ermittelt, werden jedoch häufig noch für die Berechnung von Holzbauten eingesetzt. Bei neuen Entwicklungen werden die Werte oft nur geschätzt. Insbesondere die für die Wärmeleitfähigkeit angegebenen Werte sind bis zu 20-30 % zu hoch, wodurch u.a. das Dämmvermögen zu schlecht bewertet wird. Da vorwiegend stationär gerechnet wird, wird oftmals die im Winter durch die reduzierte Holzfeuchte herabgesetzte Wärmeleitfähigkeit des Holzes nicht berücksichtigt. Ebenso kann mit solchen Berechnungen die instationäre Feuchteverteilung innerhalb einer Konstruktion nicht aufgezeigt werden. Das Potential des Werkstoffes Holz wird daher nicht ausgeschöpft.

Eine vergleichende Prüfung von Wandaufbauten aus neuen Materialien und Konstruktionen unter einheitlichen (vergleichbaren) Bedingungen fehlt bislang. Das instationäre Verhalten der Bauteile unter Praxisbedingungen kann daher nur unzureichend abgeschätzt werden.

Die gekoppelte Berechnung des Feuchte- und Wärmetransportes ist heutzutage mit vorhandenen Bauphysik-Berechnungsprogrammen für Gebäude durchführbar. Bisher wurden die Programme weitgehend für konventionelle Baustoffe wie Beton, Ziegel etc. überprüft. Eine Validierung für zahlreiche Holzkonstruktionen fehlt dagegen bisher, die allerdings mit Hilfe der neu gemessenen Kenngrössen erbracht werden kann.

3 Kenntnisstand

Im Allgemeinen werden die Vorteile des Holzes gegenüber anderen Baustoffen im ökologischen Bereich (erneuerbar, kein Primärenergieeinsatz, CO₂-Speicherung) gesehen. Davon ausgehend kann das Holz als das „grünste“ Baumaterial benannt werden [10]. Daneben sind für die Bauindustrie auch die Materialeigenschaften der Gebäudehüllen, wie z. B. Vorfertigungsgrad, Dauerhaftigkeit, Energieeffizienz (Wärmedämmung, Wärmespeicherung), Raumklimabildung etc. wichtig. Auch hier weist Holz als Baumaterial mit seinen natürlichen Eigenschaften viele Vorteile auf [3], [11], [15], [16], [26], [30].

Ebenfalls aus diesem Grund hat sich die Palette von Holzbau-Produkten in den letzten Jahren bedeutend ausgeweitet. Neben herkömmlichen Ständerkonstruktionen, Bau- und Hohlkastensystemen werden zunehmend Konstruktionen in Massiv- oder Vollholzbauweise errichtet. Dazu zählen verschiedene Brettsperrholzelemente, Brettstapelelemente, Kreuzbalkensysteme, Blockhäuser sowie Massivbauelemente aus Holzwerkstoffen [4], [34], [35], [51], [52]. Das grosse Angebot verdeutlicht, dass Holz sowohl für Leichtbauten als auch für Massivbauten eingesetzt werden kann. Besonders diese zwei Bauarten weisen deutlich unterschiedliche Eigenschaften auf. Der Einsatz von Dämmstoffen (mit niedrigem Wärmeleitfähigkeitswert) bei einer Leichtbaukonstruktion gewährleistet zwar einen hohen Wärmedurchgangswiderstand und reduziert wesentlich die Wärmeverluste. Andererseits wird das Wärmespeichervermögen aufgrund der niedrigeren Dichte und, je nach Material, geringeren, spezifischen Wärmekapazität ebenfalls reduziert. Demgegenüber weisen die Massivbaukonstruktionen bei allen, oben erwähnten, wärmespezifischen Parametern gegensätzliches Verhalten auf. Diese unterschiedlichen Wärmeparameter können die Energieeinsparung eines Gebäudes sowie die Raumklimabildung im Innern deutlich beeinflussen. Bei der statischen Berechnung der Energiekosten ist der Einfluss der Wärmespeicherung nicht inbegriffen. Unter realen (d. h. instationären) Bedingungen konnte allerdings in gewissen Fällen ein Einfluss der Wärmespeicherung auf die Energiekosten nachgewiesen werden [46], [50], [53]. Aste et al. [2] versuchten die Reduktion der Energiekosten aufgrund von besseren Wärmeeindringkoeffizienten (Gleichung 1) an Konstruktionen mit gleichen U-Werten zu quantifizieren. Dies ergab eine Einsparung von max. 10 % im Winter (Heizkosten) und 20 % im Sommer (Kühlungskosten). Häufig wird jedoch die Energieeinsparung aufgrund höherer Wärmespeicherungswerte nur anhand der Kühlungskosten bei heissen (sommerlichen) Klimabedingungen gemessen [2], [14], [47].

Wärmeeindringkoeffizient:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad [(W \cdot s^{0.5}) / (m^2 \cdot K)] \quad (1)$$

λ ist die Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)], ρ ist die Rohdichte [kg/m³], und c ist die spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)] des Materials.

Das Verhältnis der Wärmedämmungs- gegenüber den Wärmespeicherungsparametern einer Gebäudehülle hat auch Auswirkung auf die Raumklimabildung [46]. Bei instationärem Verlauf der Aussentemperaturen wird der Wärmedurchgang von aussen nach innen durch die Gebäudehülle vom Wärmeeindringkoeffizienten beeinflusst. Dies kann anhand der Kenngrössen wie der zeitlichen Phasenverschiebung (φ) und der Temperatur-Amplitudendämpfung (f) dargestellt werden. Zu einer Optimierung der beiden Parameter (φ und f) in Abhängigkeit von der Dicke des Materials wurden bis jetzt bereits einige Modelle entwickelt [9], [27]. Das Holz bietet in diesem Rahmen zusammen mit dem Feuchtespeichervermögen ausgewogene Materialeigenschaften, was auch zahlreiche Studien zur Untersuchung der Raumklimabildung und Behaglichkeit bestätigen [15], [16], [17].

An Holzbauelementen wurden bis jetzt überwiegend Untersuchungen an Ständerkonstruktionen mit verschiedenen Materialaufbauten (Variation der Dämmstoffe, Dampfbremsen, belüftete/unbelüftete Fassaden etc.), auch unter freier Bewitterung, durchgeführt [13], [37]. Ebenso wurde der Ersatz der Dampfbremsen durch verschiedene Holzwerkstoffe (MDF, OSB, Sperrholzplatten) unter künstlicher Beregnung geprüft [32], [48]. Von Messungen an Versuchsbauten unter freier Bewitterung versuchten Kruger und Adiazola [31] die thermischen Koeffizienten für Holzwerkstoffe abzuleiten. Zahlreiche Untersuchungen bezüglich des Feuchte- und Wärmeverhaltens an Ständerkonstruktionen erfolgten aufgrund von Feuchteschäden, welche durch Wärmebrücken, die von zerknüllter, gesetzter oder sogar fehlender Dämmung herrührten, verursacht waren, oder sie erfolgten aufgrund von durch Feuchte-, Wärme- und mechanische Belastung entstandener, gekrümmter Balken [28], [36], [37]. Das Verhalten von Vollholzkonstruktionen unter freier Bewitterung wurde dagegen nur selten untersucht [15].

Neben Untersuchungen an realen Bauten und Laboruntersuchungen wurde oftmals das Feuchte- und Wärmeverhalten der Ständerkonstruktionen mittels verschiedener Simulationsprogramme berechnet [13], [14], [25]. Die Begründung für die Unterschiede zwischen den berechneten und gemessenen Werten liegt meistens an:

- Vereinfachten oder ungenauen (häufig Ersatz-) Materialkenngrößen und Funktionen einzelner Materialien.
- Möglicher Undichtigkeit in der Dämmschicht und anderen möglichen Abweichungen oder Messfehlern.
- Anisotropischen Eigenschaften (Feuchteverteilung) des Holzes (Verbesserung könnte eine 3D Simulation bringen).
- Ungenauer Bestimmung der Anfangsfeuchte.
- Nicht Berücksichtigung der Kontaktstellen zwischen den Materialien (kleine Luftschichten).
- Ungenauer Einstellung von Simulationsparametern (Eingangsgrößen) wie Wärmeübergangskoeffizienten, Emissionskoeffizienten, etc. [25], [48].

Im Rahmen von Vorarbeiten in der Arbeitsgruppe Holzphysik der ETH Zürich, finanziert vom Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, vom Verein Urholz aus dem Kanton Appenzell über ein Regio Plus Projekt und von den Betrieben, wurden Messungen zur Wärmeleitfähigkeit von Vollholzelementen sowie Messungen an Versuchsbauten [23], einer Klimatrube [5] und an realen Bauten [22], [24] durchgeführt. Dabei wurden zahlreiche Erkenntnisse gewonnen.

Für das Massivholzbauelement „Appenzellerholz“ (Fa. Nägeli AG) wurde ein Lambda-Wert von $0,088 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bestimmt [45]. Als Vergleich: Für ein ähnliches Produkt aus Österreich wurde an der TU Graz ein Lambda-Wert von $0,079 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ gemessen [39]. Das neu entwickelte Holzbauelement der Fa. Gisler Holzbau erreichte sogar einen Lambda-Wert von $0,063 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [40]. Ebenso erreichten die Holzbauelemente der Fa. Tschopp Holzbau bei Messungen an der ETH einen Lambdawert von $0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Allein schon diese Ergebnisse zeigen, dass die Möglichkeiten des Holzes als Baumaterial noch nicht erschöpft sind.

Auch weitere Messungen an Versuchsbauten zeigten deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Wandaufbauten. Jedoch wurde bei diesen Messungen an kleinen, unbewohnten Hütten nur das Materialverhalten geprüft, das Nutzerverhalten blieb unberücksichtigt. Dadurch wirkte sich die Konstruktion extrem auf die Messwerte aus. Bei Messungen an bewohnten Bauten wird dagegen der Einfluss der Bewohner der Häuser mit berücksichtigt. Zu beiden Untersuchungen liegen bereits die Ergebnisse vor [22], [23], [24]. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die Messungen an den Versuchshütten aufgrund der fehlenden Klimatisierung im Innenraum die praktischen Bedingungen nicht exakt wiedergeben und dass bei den Untersuchungen an den realen Bauten das Verhalten (Lüften, Heizen) der Bewohner dominiert.

4 Zielstellung

Das Ziel des Projektes liegt einerseits auf einem direkten Vergleich des Feuchte- und Wärmeverhaltens von fünf Holzbauelementen, die unter freier Bewitterung auf dem Gelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) getestet werden. Andererseits werden anhand der gemessenen Daten zwei verbreitete Bauphysik-Berechnungsprogramme (Delphin und WUFI) für herkömmliche und neu entwickelte Holzbaukonstruktionen validiert.

Die Untersuchungen werden am IBP in Holzkirchen durchgeführt, da dort für diese Zwecke bereits spezielle Versuchsanlagen stehen (im Innenraum wird im Winter einheitlich ein konstantes Klima verwendet, während aussen das natürliche Klima wirkt). Die Wandelemente werden nach vom IBP bestimmten Abmessungen und nach entsprechender Positionierung der einzubauenden Sensoren von den Projektpartnern hergestellt und nach Holzkirchen geliefert. Die Elemente werden aus Vollholz, Holzwerkstoffen und anderen Dämmstoffen hergestellt. Die gemessenen Daten sollen die Erstellung und Auswertung von Feuchte- und Wärmeprofilen in den einzelnen Wandelementen sowie daraus abgeleitet die Bestimmung der dynamischen U-Werte und anderer wichtiger bauphysikalischer Parameter ermöglichen.

Für die Simulation sollen neu gemessene Materialkennwerte eingesetzt werden. Dadurch soll dem Projekt eine zuverlässige Datenbasis für die Berechnung bauphysikalischer Kennwerte von Holzbauten im instationären Zustand zu Grunde gelegt werden.

Ferner wird durch das hier beantragte Gemeinschaftsprojekt eine wichtige Basis zur Fortsetzung der Förderung des Holzbaus in der Schweiz geschaffen.

Zusammengefasst soll das Projekt folgenden Output für Forschung und Praxis bringen:

- Es sollen Erkenntnisse zum realen Bauteilverhalten beim Feuchte- und Wärmetransport (relative Energieeinsparung) gewonnen und rechnerisch erfasst werden.
- Die Versuche sollen vorab durchgeführte Arbeiten an unbewohnten Versuchsbauten ergänzen.
- Validierung und ggf. Ergänzung kommerzieller Bauphysikprogramme für Holzbauten unter Einbeziehung der Entwickler der Software.
- Bereitstellung der Materialkennwerte für die geprüften Elemente.
- Werbung für den Werkstoff Holz im Bauwesen.

5 Verlauf der Messungen

5.1 Versuchsprinzip

Verschiedene Holzwandelemente wurden untersucht, um das instationäre Verhalten des Feuchte- und Wärmetransports durch die Wände unter freier Bewitterung zu prüfen. Die Messungen beinhalteten einen direkten Vergleich folgender Holzbaukonstruktionen:

- Geschlitzte Vollholzkonstruktion mit einer Dämmung aus geschlitzten Brettelementen (*Geschlitzte Holzkonstruktion*).
- Massivholzkonstruktion aus verdübelten Vollholzlagen (*Massivholzkonstruktion*).
- Dämmsteinkonstruktion, neu entwickelt, aus zusammengeklebten Massivholz- und Holzweichfaserplatten (*Dämmsteinkonstruktion*).
- Holzrahmenkonstruktion mit doppelter Dämmschicht aus Steinwolle und Innenbeplankung aus einer Massivholzplatte (*Holzplattenkonstruktion*).
- Holzbaukonstruktion aus Brettstapelelementen und einer Holzrahmenkonstruktion mit Dämmung aus Zelluloseflocken (*Brettstapelkonstruktion*).

Eine genauere Beschreibung der Aufbauten ist im folgenden Kapitel 5.2 dargestellt.

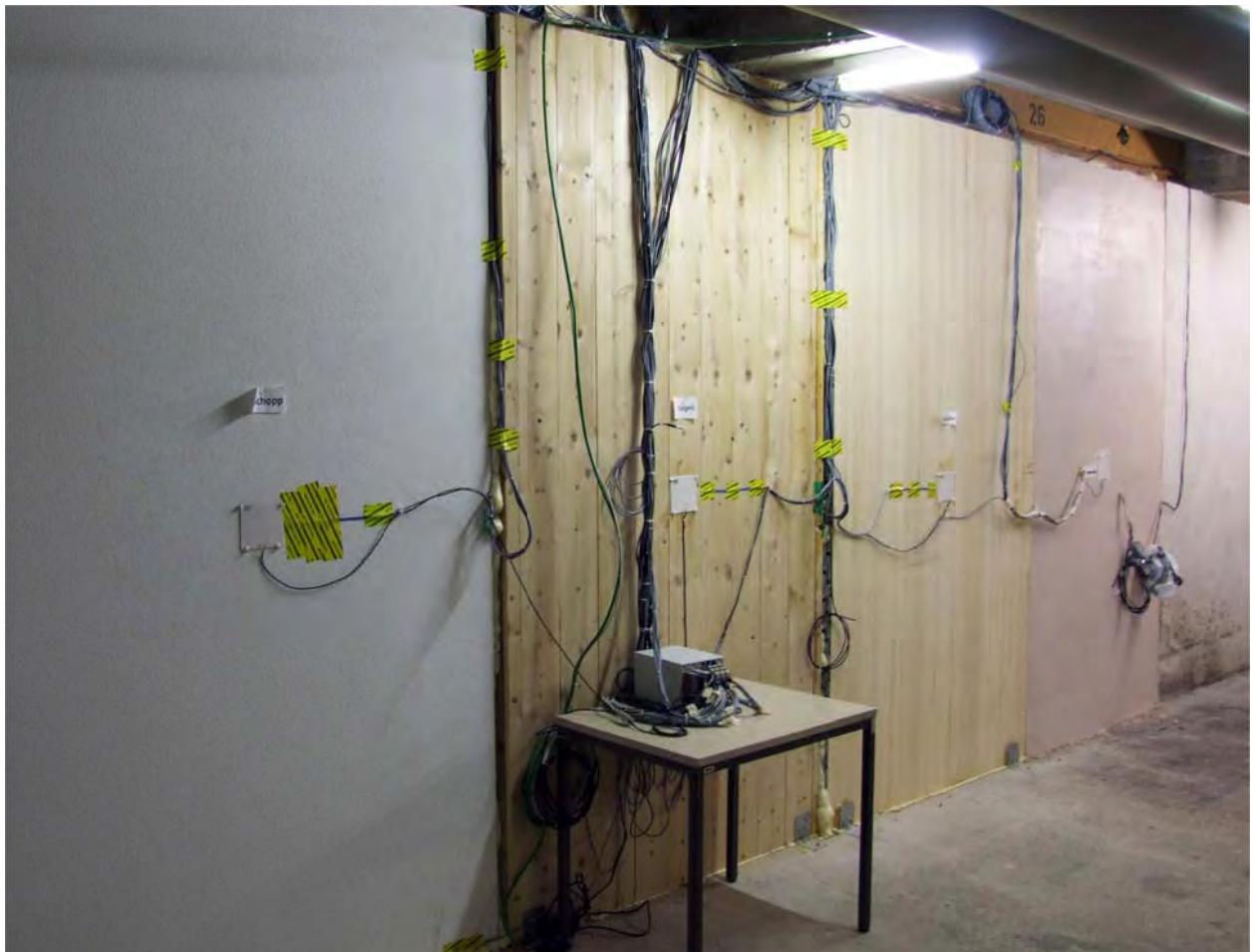


Abb. 2: Blick im Innern des Testgebäudes auf die Vernetzung der gesamten Messtechnik nach der Installation.

Nach ungefähr vier Monaten Vorbereitungsarbeiten erfolgte die Installation der Holzwandelemente in Holzkirchen vom 22. – 24. September 2009 (Bilder von der Montage befinden sich im erweiterten Anhang). Die fünf geschosshohen (ca. 2,8 m) Wandelemente wurden auf dem Gelände des IBP auf der Westseite eines Versuchsgebäudes mit einer jeweiligen Breite von ca. 1,5 m errichtet. Von aussen waren die Elemente einer Freibewitterung ausgesetzt. Während des Untersuchungszeitraumes wurde das

Versuchsbauwerke in der Heizperiode auf 20-23 °C und 50-60 % rel. Feuchte klimatisiert. Während des Sommers wurde die Klimatisierung ausgeschaltet und das Klima im Innenraum des Testgebäudes ohne Regulierung der Temperatur und der rel. Luftfeuchte belassen. Als Fassade wurde an den vier Holzwandelementen eine einheitliche, vergraute Holzfassade installiert. Um der Anforderung des Einsatzes unter realen Bedingungen nachzukommen, wurde dagegen die Aussenseite der Dämmsteinkonstruktion verputzt.

Nach der Installation der Holzwandelemente wurden die zu ermittelnden Daten automatisch im Ein-Minuten-Takt erfasst (Abb. 2).

Am 17. Dezember 2009 wurden vom IBP zusätzlich Thermographiebilder von der Aussenseite der Holzbauelemente aufgenommen.

5.2 Getestete Holzwandelemente

Insgesamt wurden fünf Holzwandelemente mit unterschiedlichen Konstruktionen getestet. Diese sind detailliert, zusammen mit den eingesetzten Materialien und der Positionierung der Sensoren, in den Abb. 3 - Abb. 7 dargestellt. Die Vollholzteile wurden aus Fichten-/Tannenholz (Rahmenkonstruktionen, Schalung, Brettstapelkonstruktion, geschlitzte und verdübelte Holzelemente, 3-schichtige Massivholzplatten) bzw. Buchenholz (Verbindungs-Dübel für Brettstapel- und verdübelte Massivholzkonstruktion) hergestellt. Als Dämmmaterialien wurden Holzweichfaserplatten, Steinwolle und Zelluloseflocken eingesetzt.

Die einheitliche Fassade wurde aus vorvergrauten (Anstrich auf Leinölbasis), profilierten Brettern aus Fichten-/Tannenholz mit einer Dicke von 20 mm und einer Breite von 70 mm hergestellt. Die einzelnen Bretter wurden durch Nut und Kamm miteinander verbunden und mit Klammern und Schrauben vertikal sowie kompakt (ohne Hinterlüftung) auf den vorgefertigten Wandelementen befestigt.

5.3 Instrumentierung

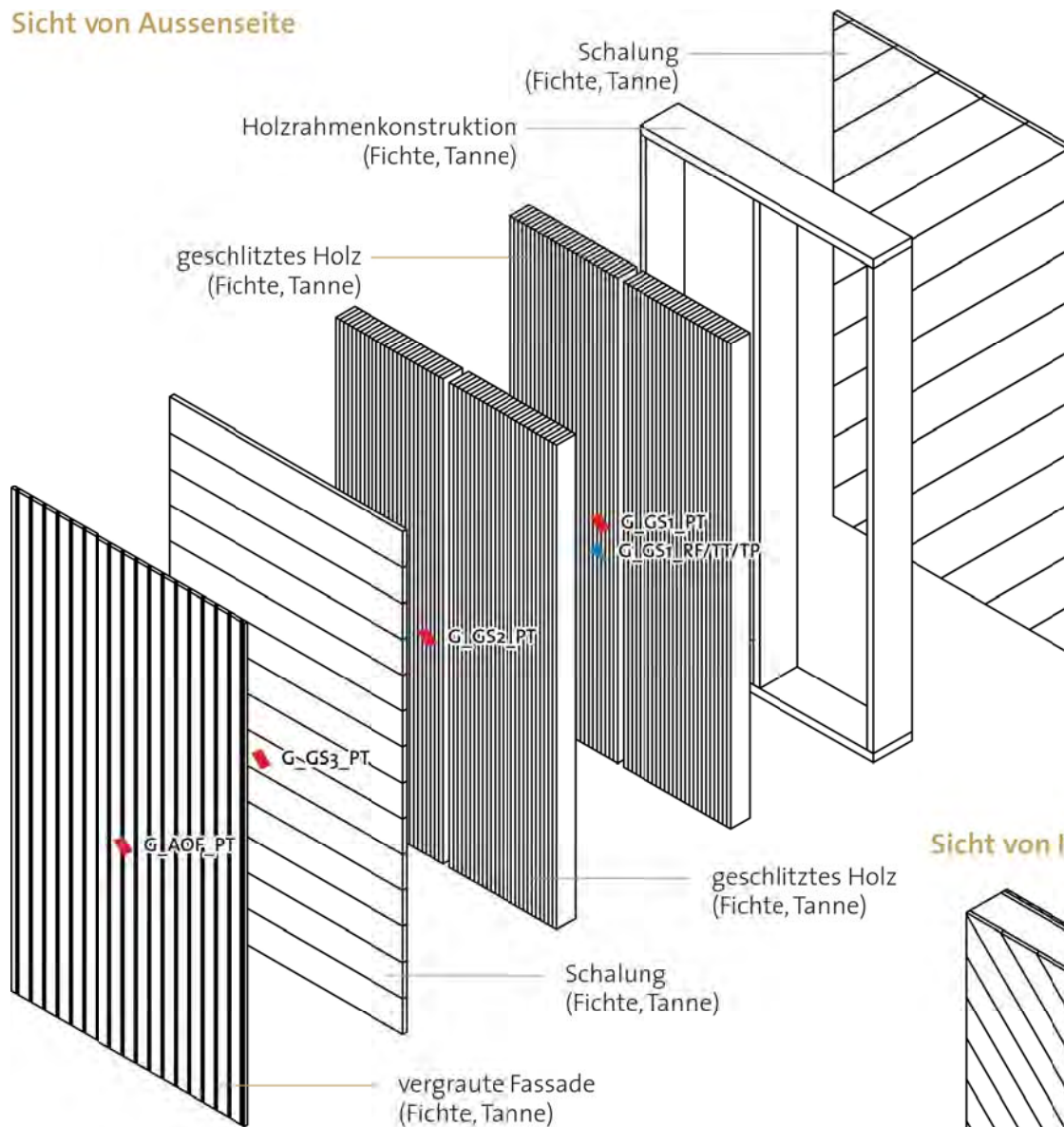
Die Instrumentierung – es wurden Geräte der Hersteller Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH und der Thermo Sensor GmbH verwendet – diente der messtechnischen Erfassung folgender, physikalischer Größen:

- Aussen- und Innenoberflächentemperaturen der Wandkonstruktionen.
- Wärmestromdichte an der Innenseite der Bauelemente.
- Grenzschichttemperatur(en).
- Rel. Luftfeuchte in einer oder mehreren Grenzschichten.
- Raumklima (Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte).
- Holzfeuchte(n).

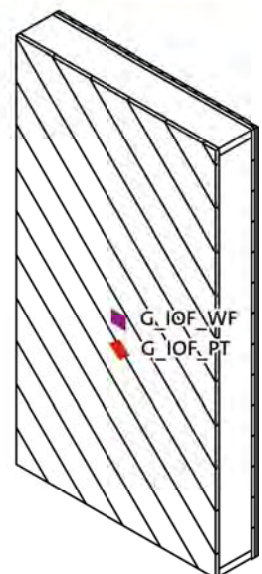
Die genauen Positionen der Messsensoren bei den einzelnen Bauelementen sind in den Abb. 3 - Abb. 7 dargestellt.

Die Oberflächen- und Grenzschichttemperaturen wurden mittels der Widerstandsthermo-Sensoren PT100, Nr. 2113-1-017, der Fa. Thermo Sensors gemessen. Die rel. Luftfeuchten in den Grenzschichten und die rel. Luftfeuchte und Temperatur im Innenraum wurden mittels der digitalen Feuchte- und Temperatur-Sensoren FHAD460 und FHAD462 der Fa. Ahlborn erfasst. Für die Messung der Wärmestromdichte wurden die flexiblen Wärmeflussplatten FQA018CSI und für die Messung der Holzfeuchte die Feuchtigkeitssonden nach dem Leitprinzip FHA636MF10 der Fa. Ahlborn eingesetzt. Zu Vergleichszwecken wurde die Holzfeuchte zusätzlich in gewissen Abständen mit den Widerstandssensoren der Fa. Gann Mess- und Regelungstechnik GmbH von Hand gemessen.

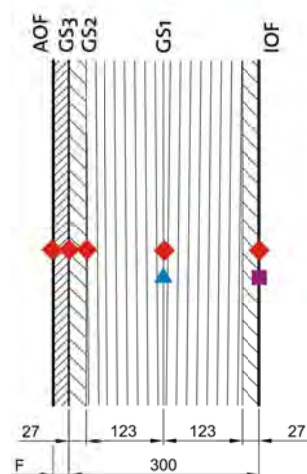
Sicht von Aussenseite



Sicht von Innenseite



Horizontaler Schnitt

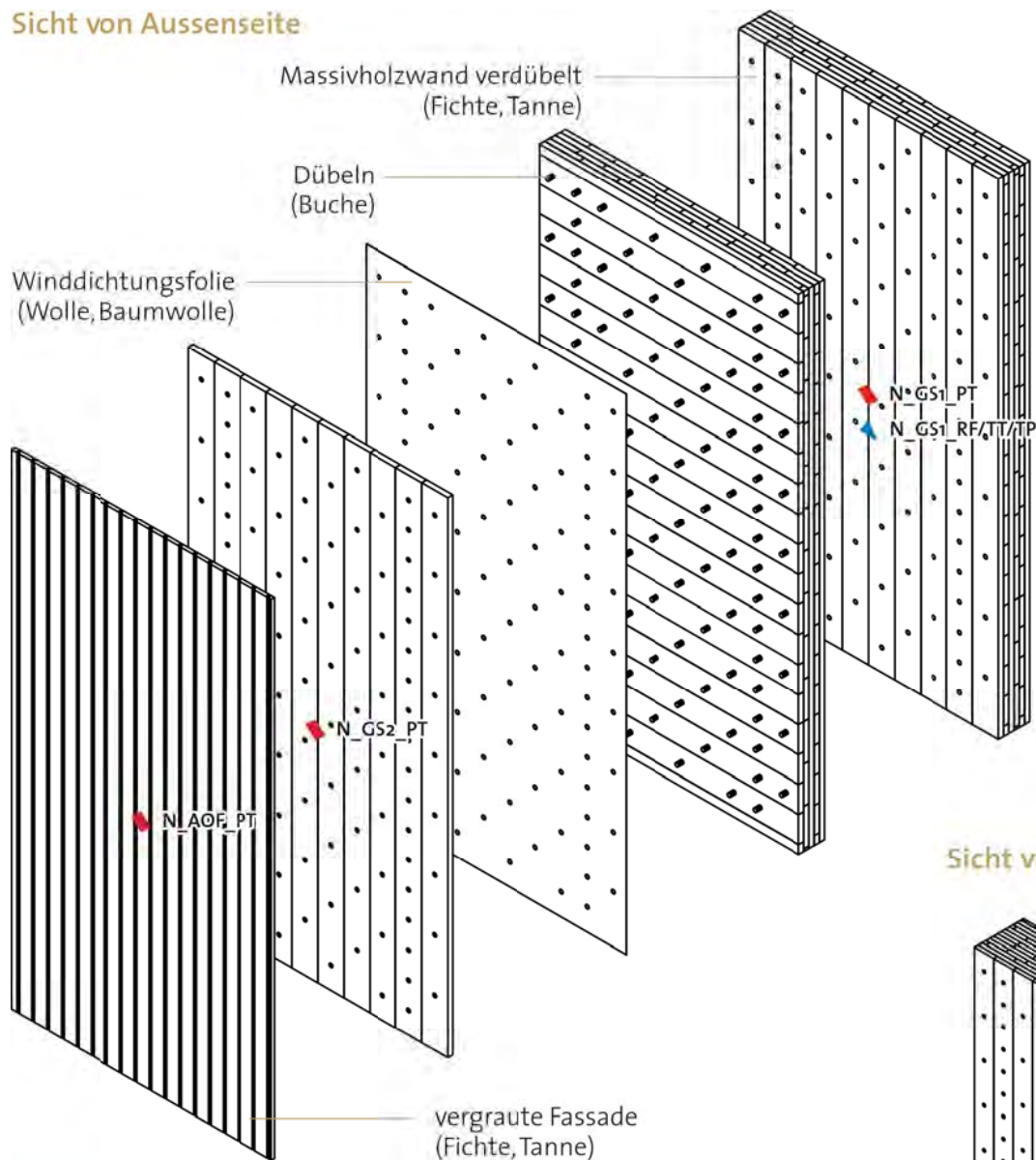


Legende

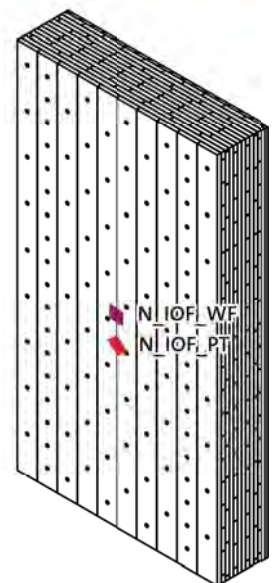
- ◆ Temperaturfühler PT100
- ▲ Feuchte- und Temperaturfühler
- Wärmeflussensor

Abb. 3: Aufbau der geschlitzten Holzkonstruktion (G); GS1, GS2, GS3 – einzelne Grenzsichten; AOF – Aussenoberfläche; IOF – Innenoberfläche, F – Fassade.

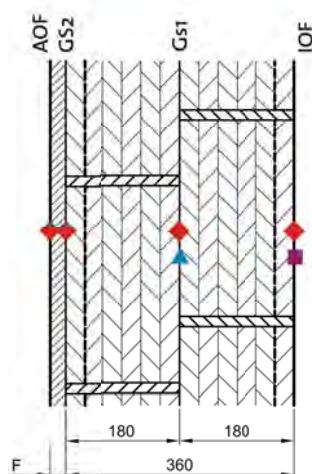
Sicht von Aussenseite



Sicht von Innenseite



Horizontaler Schnitt

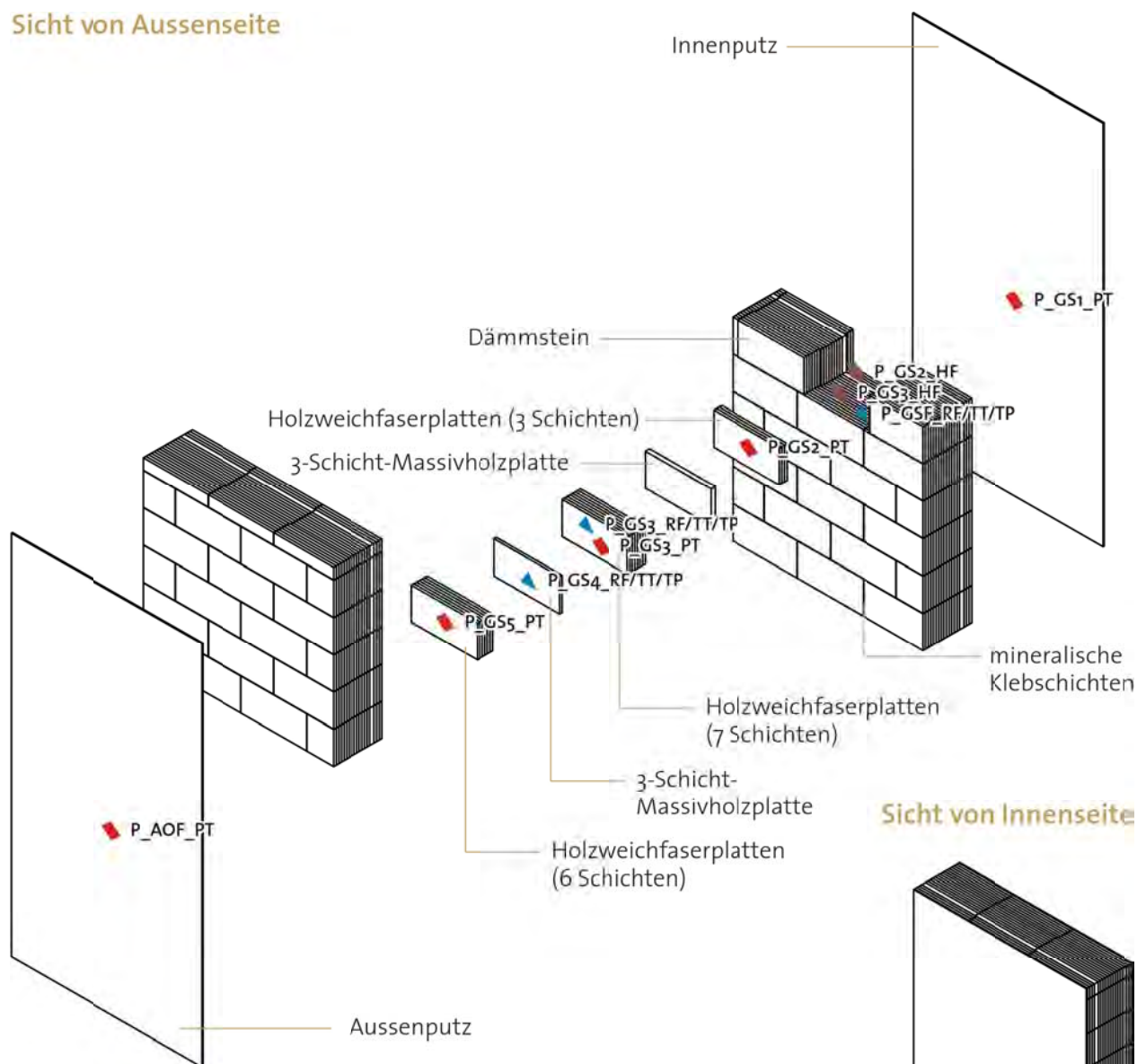


Legende

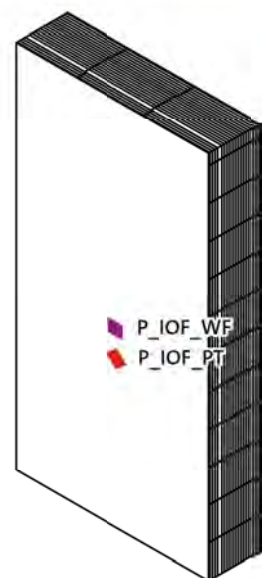
- ◆ Temperaturfühler PT100
- ▲ Feuchte- und Temperaturfühler
- Wärmeflussensor

Abb. 4: Aufbau der Massivholzkonstruktion (N); GS1, GS2 – einzelne Grenzschichten; AOF – Aussenoberfläche; IOF – Innenoberfläche, F – Fassade.

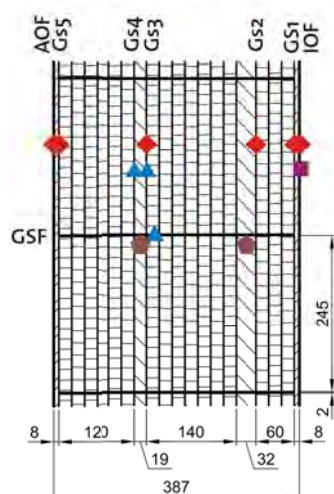
Sicht von Aussenseite



Sicht von Innenseite



Horizontaler Schnitt

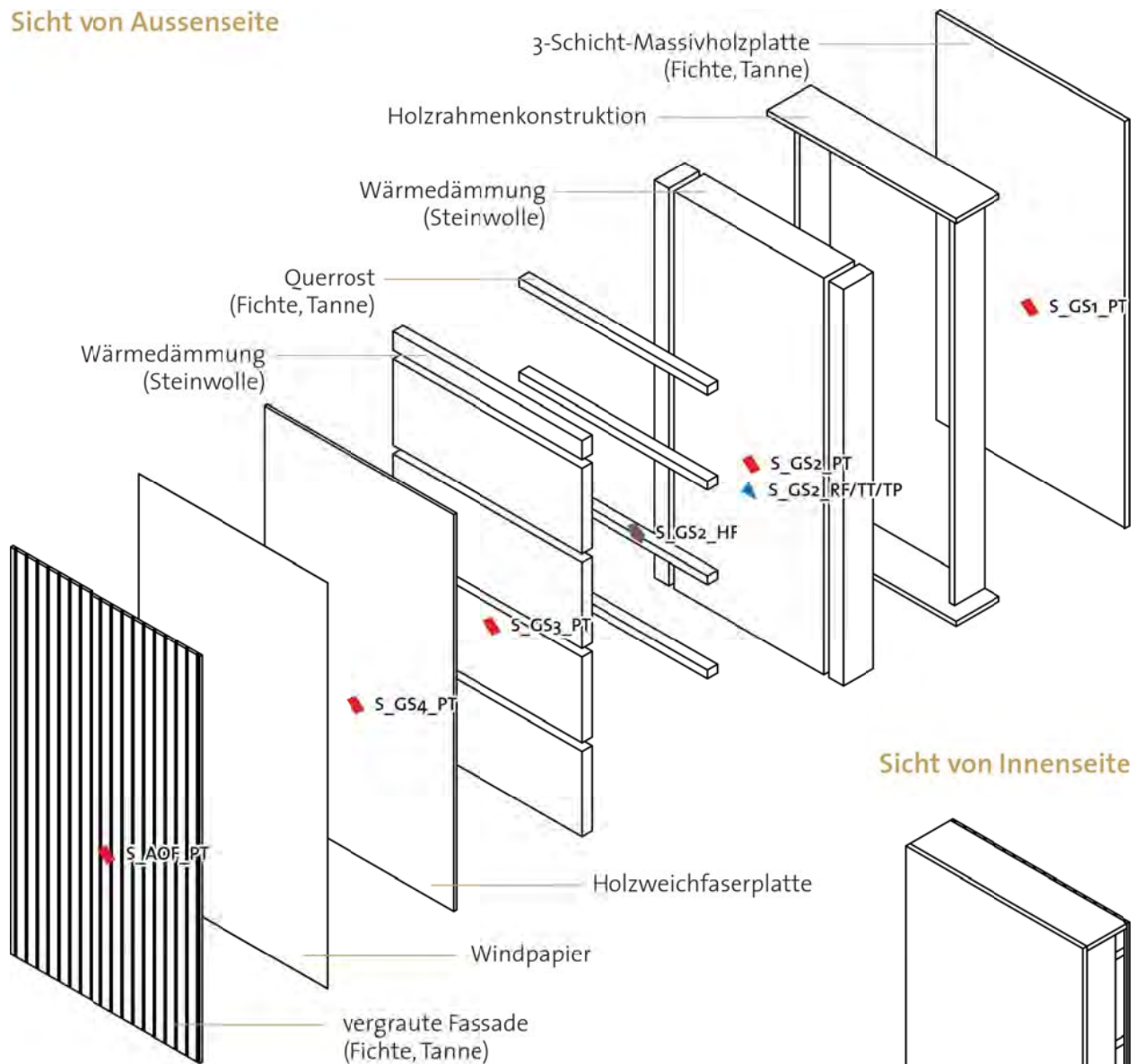


Legende

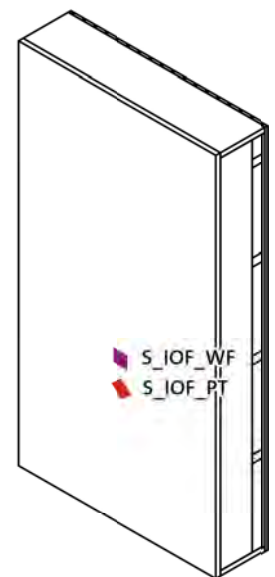
- ◆ Temperaturfühler PT100
- ▲ Feuchte- und Temperaturfühler
- Wärmeflussensor
- Holzfeuchtesensor

Abb. 5: Aufbau der Dämmsteinkonstruktion (P); GS1, GS2, GS3, GS4, GS5 – einzelne Grenzschichten; GSF – Grenzschicht in der Fuge; AOF – Aussenoberfläche; IOF – Innenoberfläche.

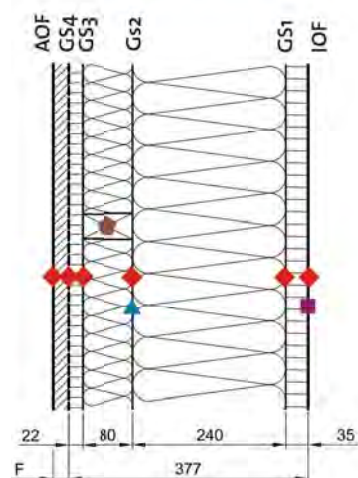
Sicht von Aussenseite



Sicht von Innenseite



Horizontaler Schnitt

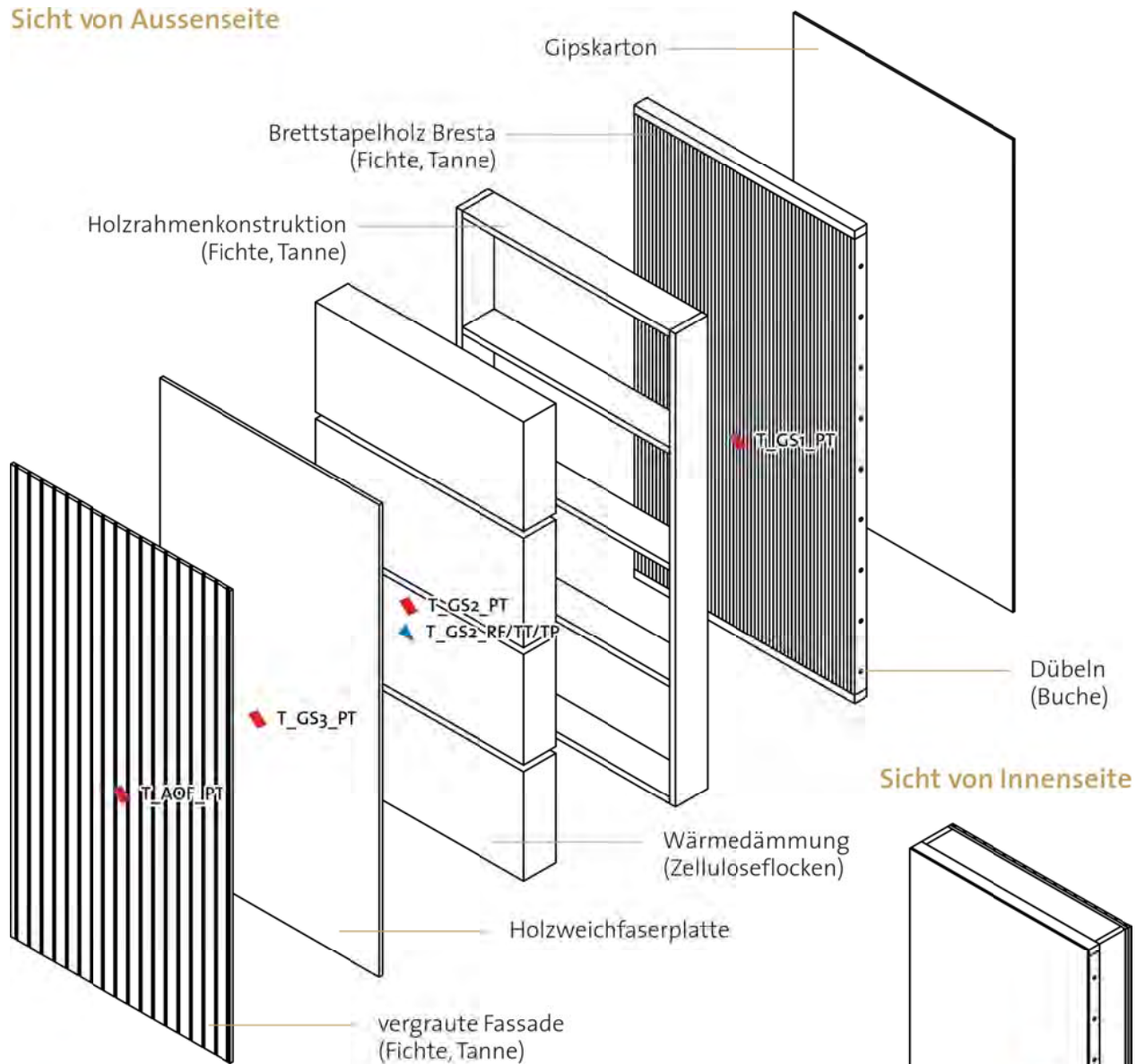


Legende

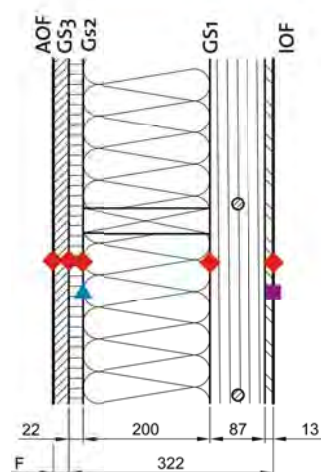
- ◆ Temperaturfühler PT100
- ▲ Feuchte- und Temperaturfühler
- Wärmeflussensor
- ◆ Holzfeuchtesensor

Abb. 6: Aufbau der Holzplattenkonstruktion (S); GS1, GS2, GS3, GS4 – einzelne Grenzschichten; AOF – Aussenoberfläche; IOF – Innenoberfläche, F – Fassade.

Sicht von Aussenseite



Horizontaler Schnitt



Legende

- ◆ Temperaturfühler PT100
- ▲ Feuchte- und Temperaturfühler
- Wärmeflussensor

Abb. 7: Aufbau der Brettstapelkonstruktion (T); GS1, GS2, GS3 – einzelne Grenzsichten; AOF – Aussenoberfläche; IOF – Innenoberfläche, F – Fassade.

Die Messwerte wurden im Ahlborn Datenlogger (Messwerterfassungsanlage) MA56901Mo9TG3, der mit einer Messstellenumschalterkarte und drei Messkarten für die Thermo-Sensoren ergänzt wurde, erfasst und mit einem Ethernet-Datenkabel on-line weitergeleitet und über den Server des IBP der ETH zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden jede Minute 66 Grössen (42 Messstellen) aufgenommen (Abb. 8).

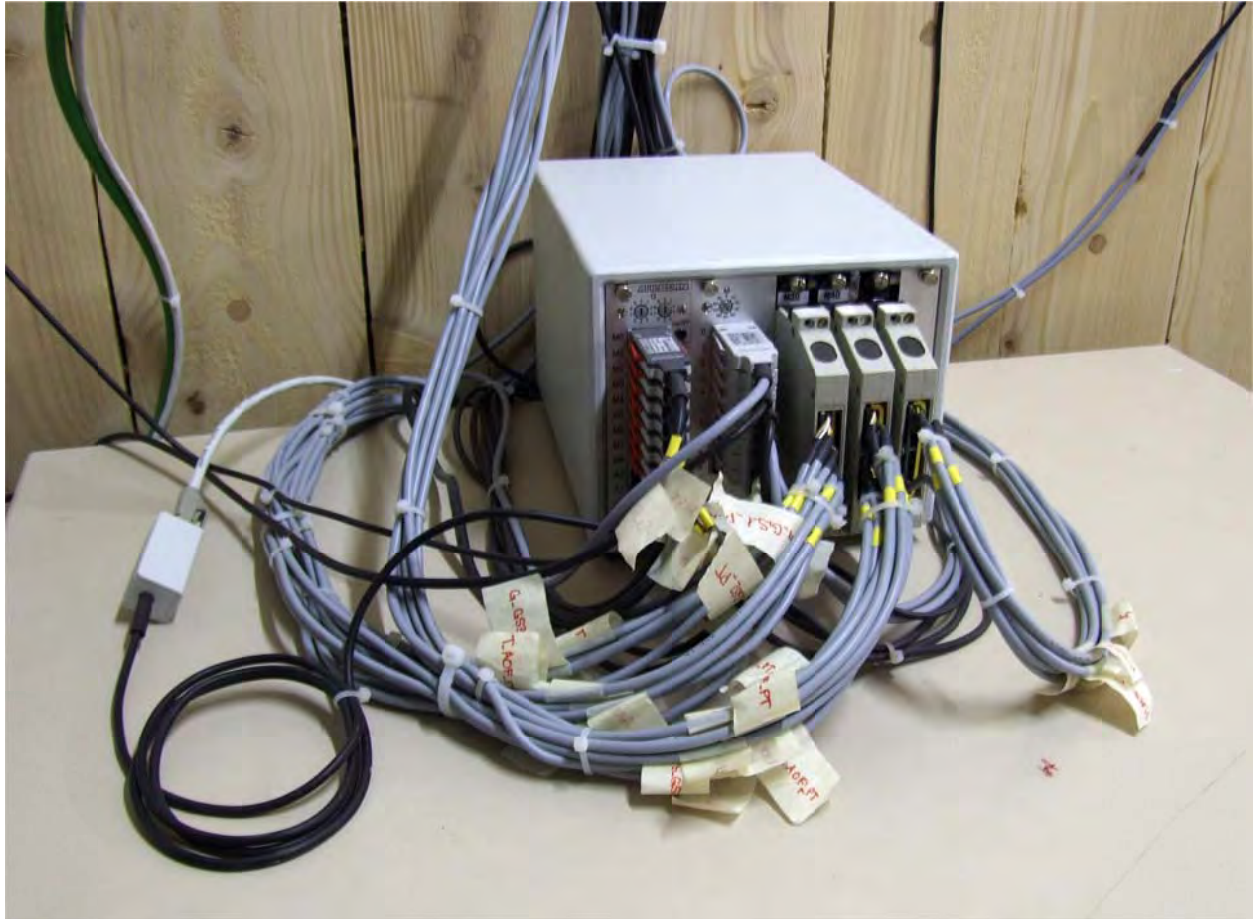


Abb. 8: Datenlogger mit eingesteckten Messsensoren.

Simultan wurden die relevanten meteorologischen Grössen (Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte) inklusive der auftreffenden direkten Einstrahlung („Weststrahlung“) an der Wetterstation des IBP gesammelt.

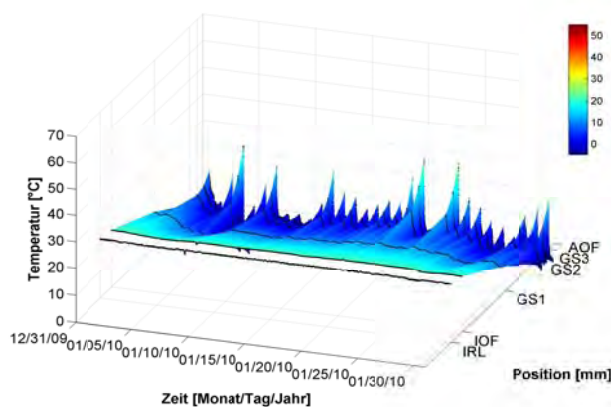
6 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Bei der Auswertung wurde festgestellt, dass bei der Bezeichnung und der Erfassung der Sensoren die Feuchtesensoren in den Grenzschichten 3 und 4 der Dämmsteinkonstruktion vertauscht wurden. Dies haben auch die Simulationsergebnisse bestätigt. Bei der Erstellung der Diagramme wurde die Verwechslung bereits berücksichtigt.

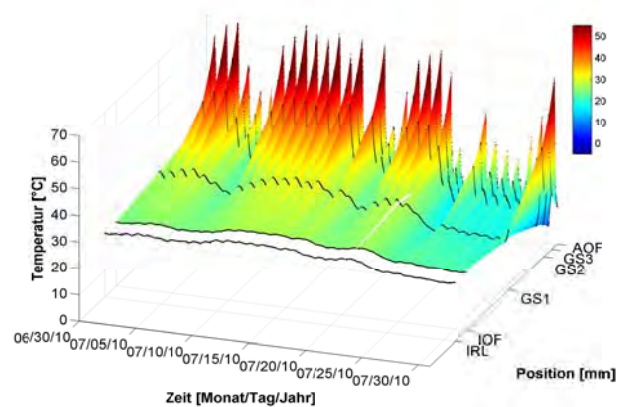
6.1 Wärmetransport

Die Verteilung der Temperaturen innerhalb der Konstruktionen ist in den Abb. 9 - Abb. 13 dargestellt, für deren Auswertung ein Monat im Winter (Januar 2010) und einer im Frühling (Juli 2010) ausgewählt wurde. Deutlich zu erkennen ist, dass die Dämmsteinkonstruktion aufgrund der weissen Putzfassade eine geringere Schwankung der Aussenoberflächentemperatur aufweist, wodurch auch die Temperaturschwankung innerhalb der Konstruktion reduziert wird. Da die restlichen Konstruktionen mit einer einheitlichen, vergrauten Fassade bedeckt sind, ist ein direkter Vergleich innerhalb dieser Konstruktionen möglich. Wie erwartet, dämpfen die beiden Vollholzkonstruktionen die Temperatur wesentlich mehr als die gedämmten Konstruktionen und weisen längere Phasenverschiebungen der Temperatur innerhalb der Wand auf. Die Unterschiede zeigen sich bereits in den äussersten Grenzschichten direkt unter der Fassade. Im Winter während der Nacht sind die Temperaturen beider Vollholzkonstruktionen deutlich höher als bei den drei Dämmkonstruktionen (Abb. 16 a). Bei der Dämmsteinkonstruktion ist die Temperatur hinter dem Putz am niedrigsten. Im Sommer, bei ausgeschalteter Klimatisierung des Testgebäudes, zeigten sich noch deutlichere Unterschiede zwischen den Vollholzkonstruktionen, den Leichtbaukonstruktionen und der Dämmsteinkonstruktion (Abb. 16 b). Zu beobachten ist auch eine erhöhte Schwankung der Innenoberflächentemperatur bei der Brettstapelkonstruktion und hauptsächlich bei der Holzplattenkonstruktion, obwohl diese die stärkste Dämmung aufweist (Abb. 15 c und Abb. 12 f). Die Temperatur an der Innenoberfläche der Vollholzkonstruktionen und der Dämmsteinkonstruktion ist trotz stark schwankenden Aussenbedingungen sehr stabil. Bei der Dämmsteinkonstruktion liegt die Innenoberflächentemperatur im Sommer um ca. 1°C unter der Raumlufttemperatur (Abb. 15 c und Abb. 11 f). Im Winter lagen die Temperaturen der Innenoberflächen aller Konstruktionen um ca. 1°C unter der Raumlufttemperatur (Abb. 14 c). Die Unterschiede zwischen den einzelnen Konstruktionen sind jedoch gering und streuen häufig nur um ca. 0,4°C. Am kältesten ist die Oberfläche der Massivholzkonstruktion, am wärmsten diejenige der Holzplattenkonstruktion zusammen mit derjenigen der Dämmsteinkonstruktion. Demgegenüber variiert die Temperatur der geschlitzten Holzkonstruktion im erwähnten Bereich (Abb. 14 c).

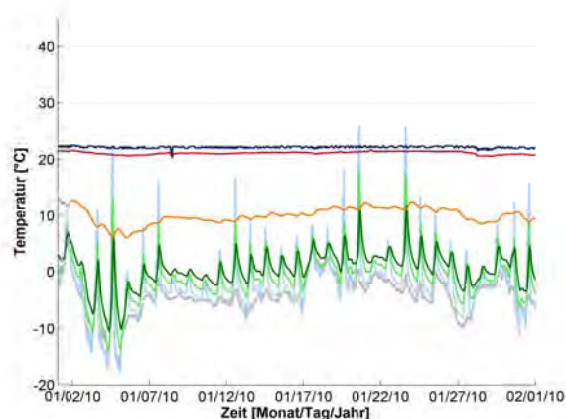
Im November 2010 ist mitunter eine Senkung der Oberflächentemperaturen an der Aussenoberfläche während der Nacht erkennbar (Abb. 17). Diese Temperaturen lagen dann jeweils unerwünschterweise unter der Aussenlufttemperatur, was unter Umständen zu Kondensation des Wassers und damit zu Schimmel- und weiterer Pilzbildung an der Fassade führen könnte (siehe Kapitel 8). Die Temperaturen hinter der Holzfassade, bzw. dem Putz liegen nur bei den drei Dämmkonstruktionen unter der Aussenlufttemperatur (Abb. 16 a). Wenn man weiter die Temperaturen hinter der (äusseren) Holzweichfaserplatte der beiden Konstruktionen in Rahmenbauweise vergleicht, liegen diese hauptsächlich während der Nacht bei der Brettstapelkonstruktion wesentlich höher als bei der Holzplattenkonstruktion (Abb. 12 c, e und Abb. 13 c, e). Dies weist andererseits auf bessere Dämmeigenschaften der Holzplattenkonstruktion hin, da hier am wenigsten Wärme von innen nach aussen abtransportiert wird. Aus dem in Abb. 14 d dargestellten Verlauf des Wärmeflusses geht weiter hervor, dass die geschlitzte Holzkonstruktion und noch deutlicher die Massivholzkonstruktion während des Winters



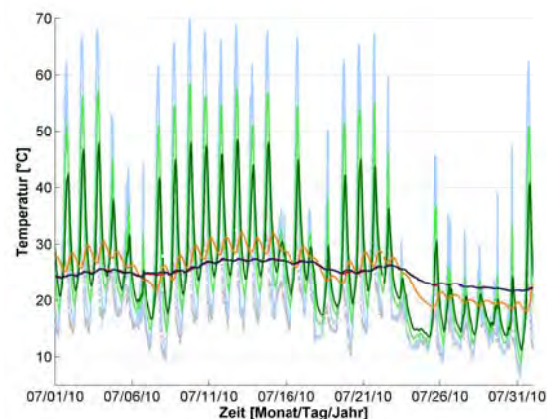
a) Monatsansicht 3D (Januar 2010)



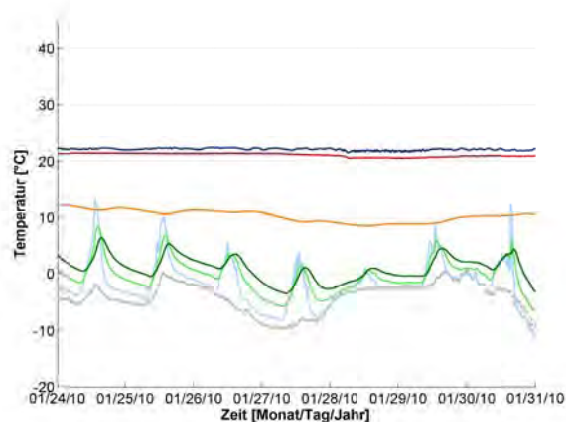
b) Monatsansicht 3D (Juli 2010)



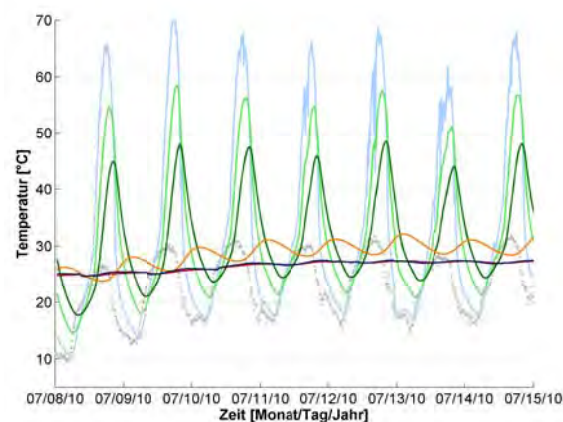
c) Monatsansicht (Januar 2010)



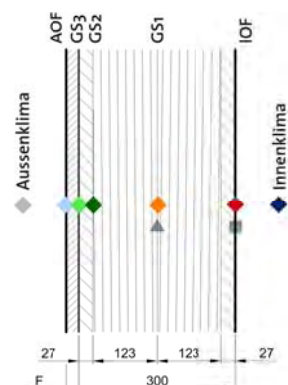
d) Monatsansicht (Juli 2010)



e) Wochenansicht (24. 01. - 31. 01. 2010)

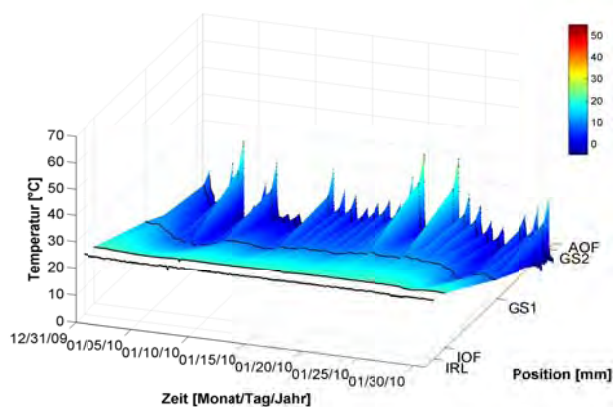


f) Wochenansicht (08. 07 - 15. 07. 2010)

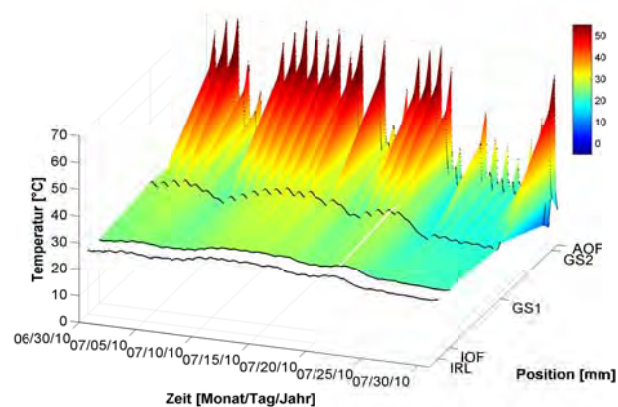


Sensorpositionen in den Diagrammen (c, d, e, f)

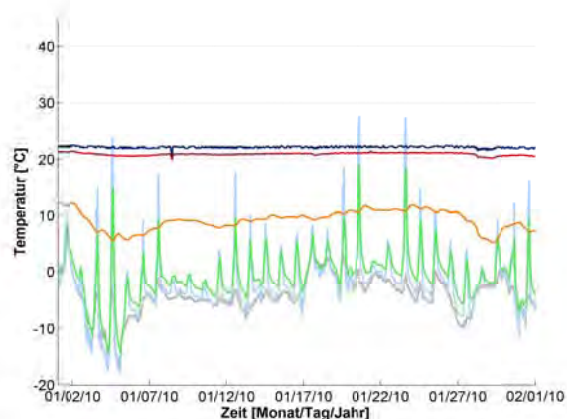
Abb. g: Temperaturverteilung in der geschlitzten Holzkonstruktion während des Winters (links – a, c, e) und Sommers (rechts – b, d, f).



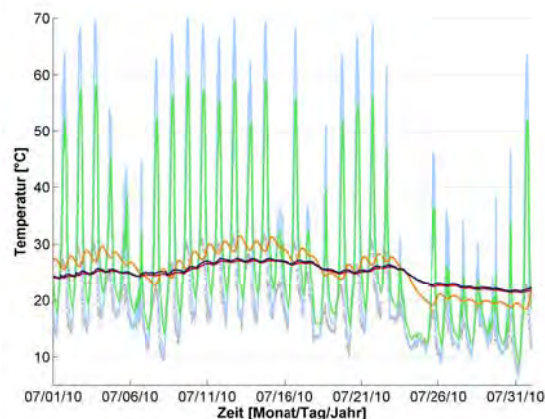
a) Monatsansicht 3D (Januar 2010)



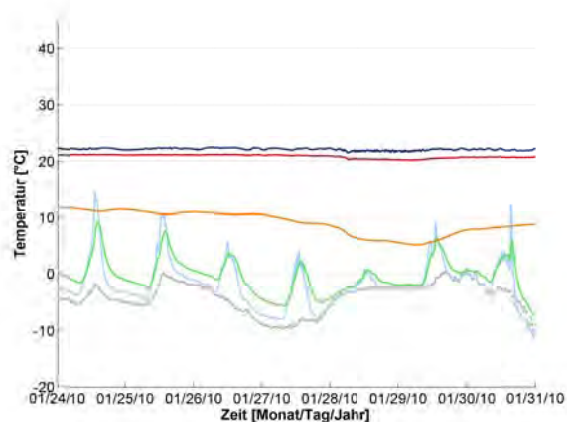
b) Monatsansicht 3D (Juli 2010)



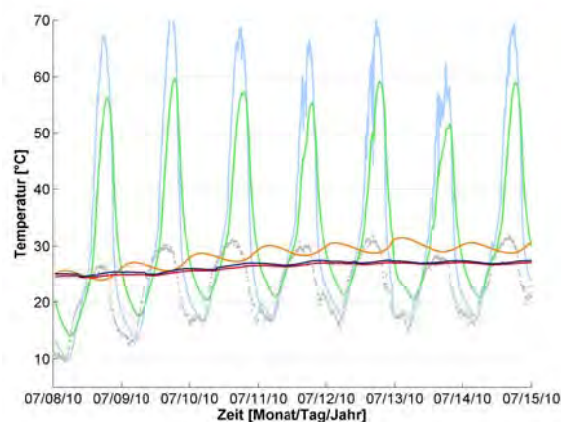
c) Monatsansicht (Januar 2010)



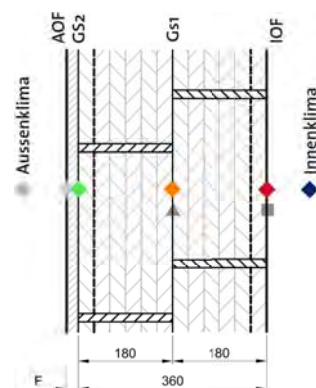
d) Monatsansicht (Juli 2010)



e) Wochenansicht (24. 01. - 31. 01. 2010)

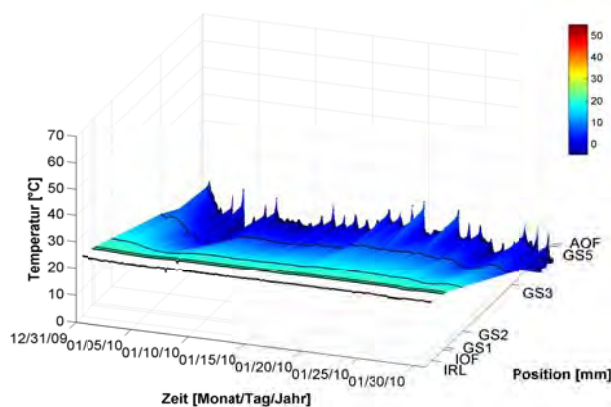


f) Wochenansicht (08. 07 - 15. 07. 2010)

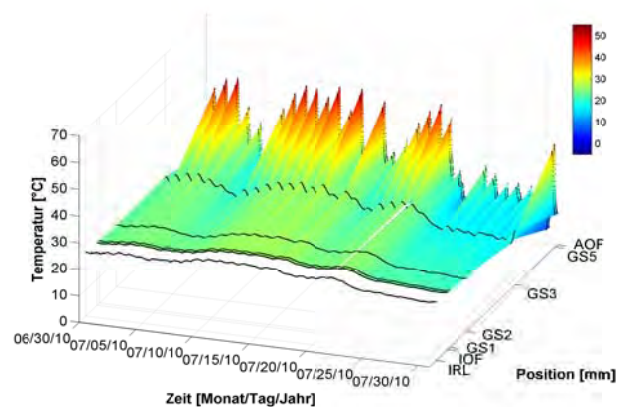


Sensorpositionen in den Diagrammen (c, d, e, f)

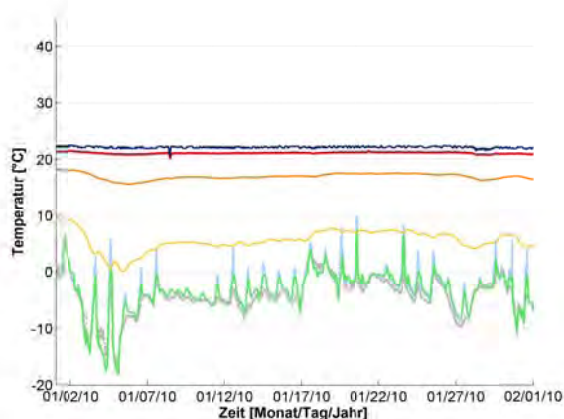
Abb. 10: Temperaturverteilung in der Massivholzkonstruktion während des Winters (links – a, c, e) und Sommers (rechts – b, d, f).



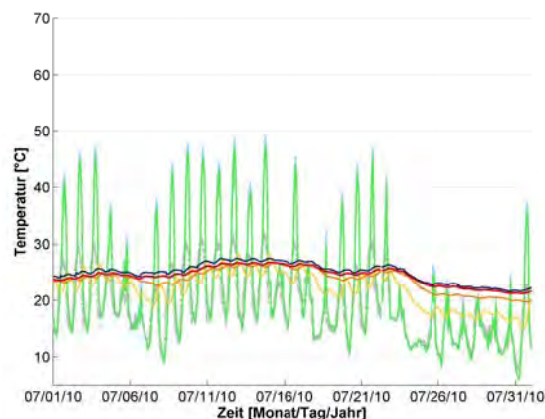
a) Monatsansicht 3D (Januar 2010)



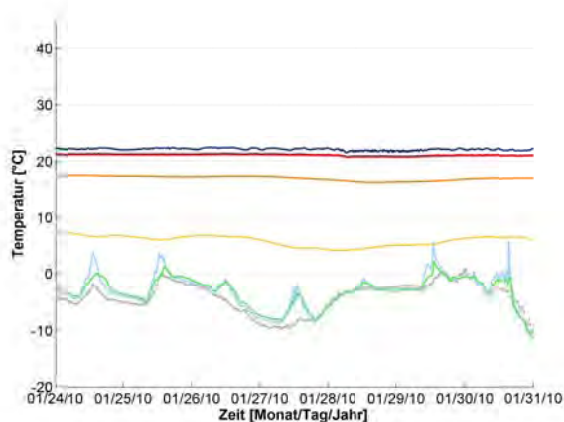
b) Monatsansicht 3D (Juli 2010)



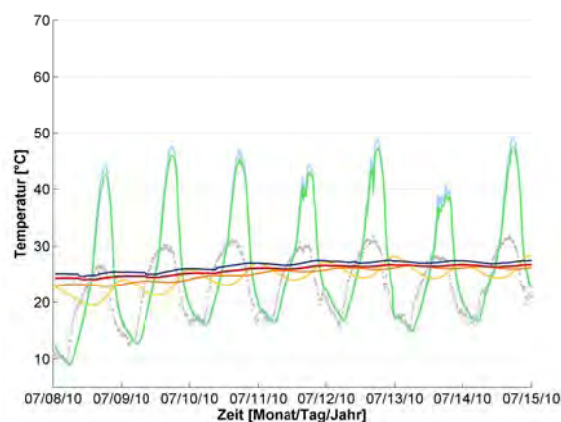
c) Monatsansicht (Januar 2010)



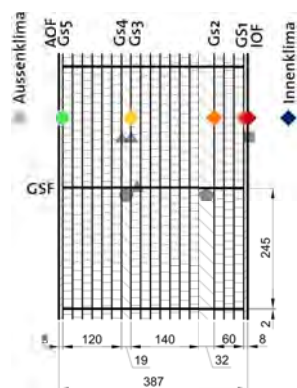
d) Monatsansicht (Juli 2010)



e) Wochenansicht (24. 01. - 31. 01. 2010)

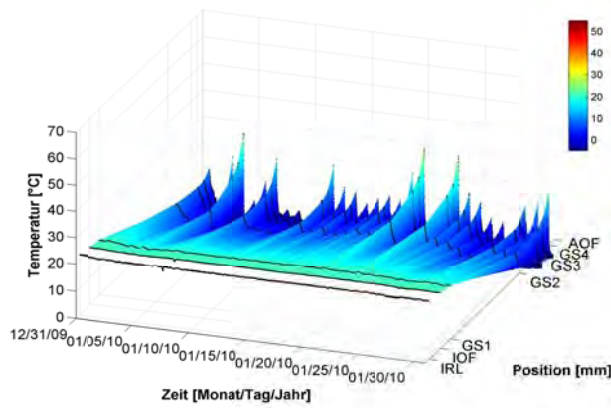


f) Wochenansicht (08. 07 - 15. 07. 2010)

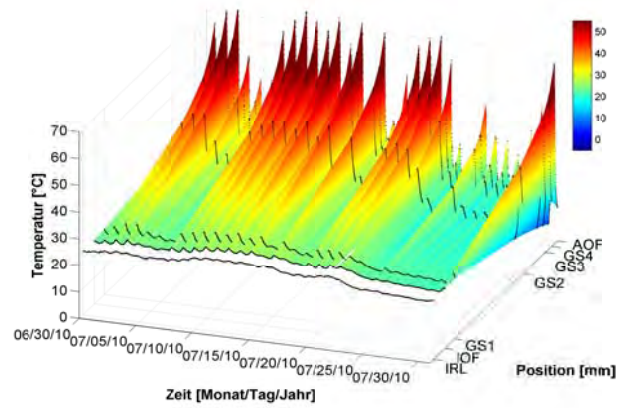


Sensorpositionen in den Diagrammen (c, d, e, f)

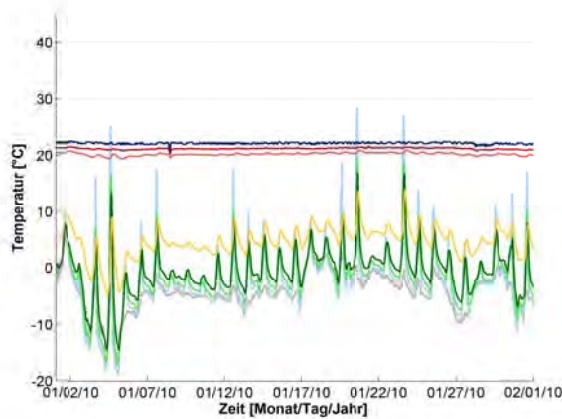
Abb. 11: Temperaturverteilung in der Dämmsteinkonstruktion während des Winters (links – a, c, e) und Sommers (rechts – b, d, f).



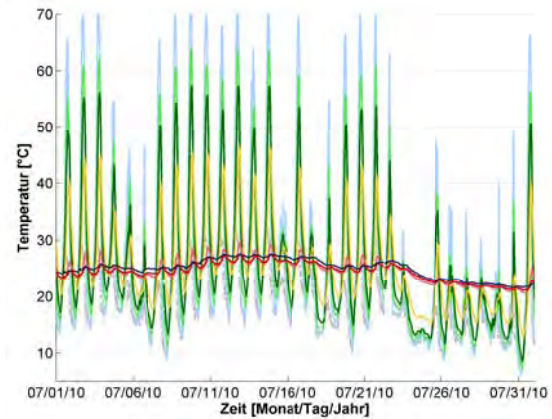
a) Monatsansicht 3D (Januar 2010)



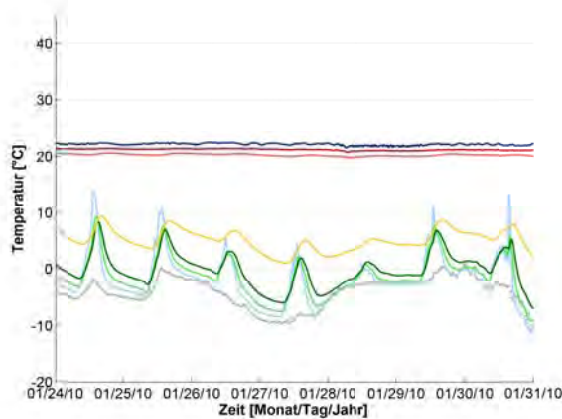
b) Monatsansicht 3D (Juli 2010)



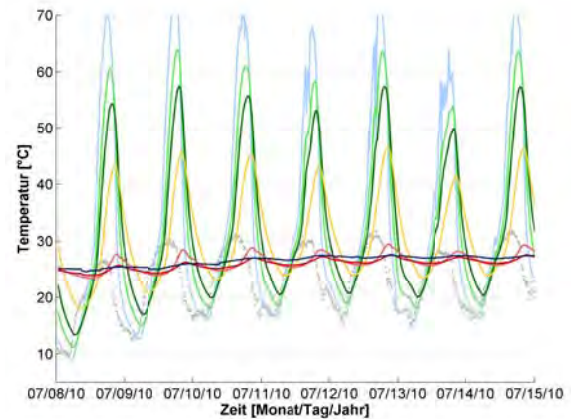
c) Monatsansicht (Januar 2010)



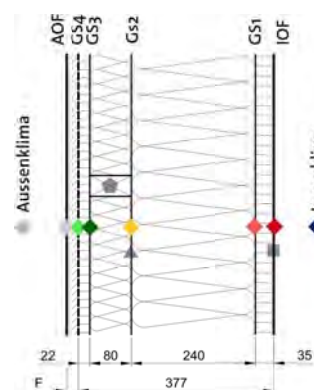
d) Monatsansicht (Juli 2010)



e) Wochenansicht (24.. - 31. Januar 2010)

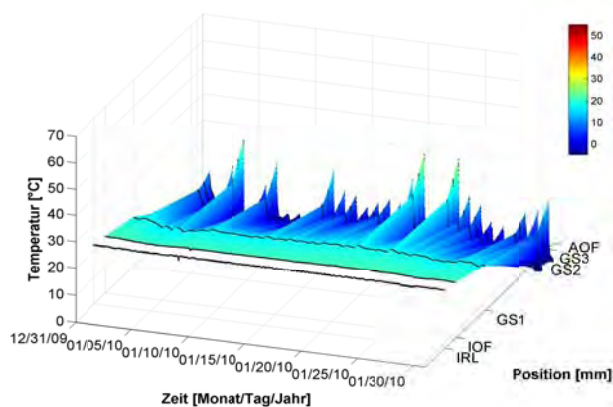


f) Wochenansicht (08. - 15. Juli 2010)

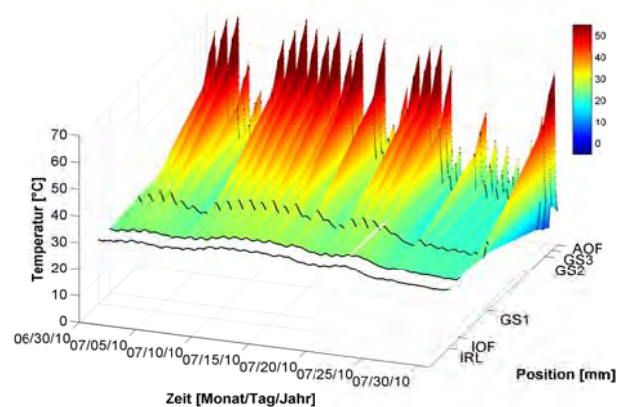


Sensorpositionen in den Diagrammen (c, d, e, f)

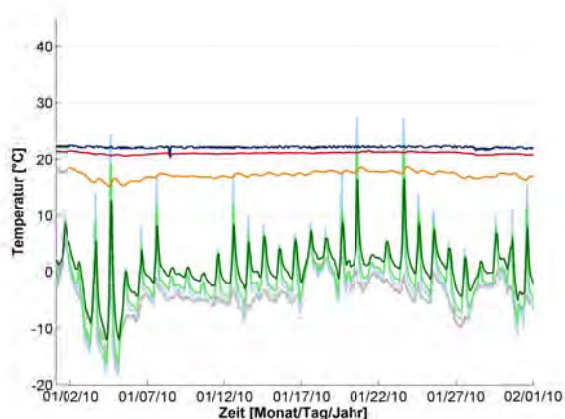
Abb. 12: Temperaturverteilung in der Holzplattenkonstruktion während des Winters (links – a, c, e) und Sommers (rechts – b, d, f).



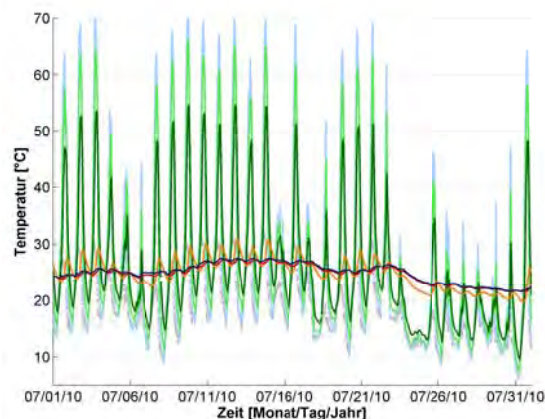
a) Monatsansicht 3D (Januar 2010)



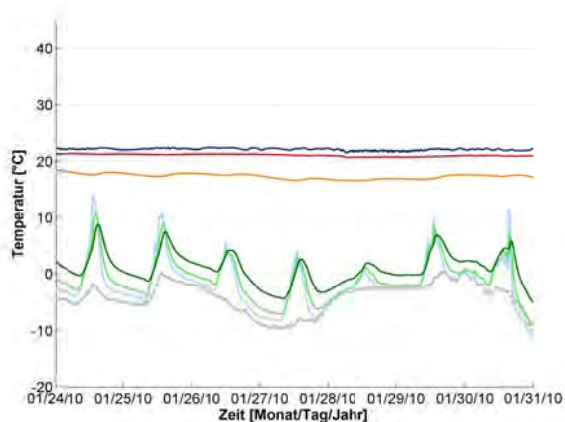
b) Monatsansicht 3D (Juli 2010)



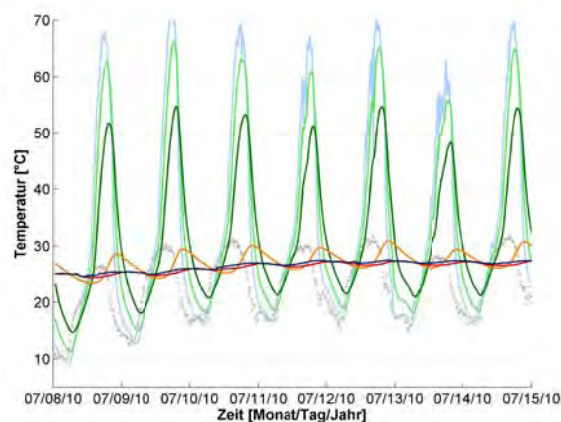
c) Monatsansicht (Januar 2010)



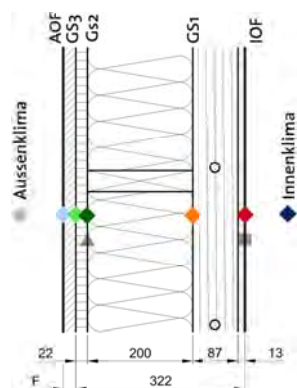
d) Monatsansicht (Juli 2010)



e) Wochenansicht (24. 01. - 31. 01. 2010)



f) Wochenansicht (08. 07 - 15. 07. 2010)



Sensorpositionen in den Diagrammen (c, d, e, f)

Abb. 13: Temperaturverteilung in der Brettstapelkonstruktion während des Winters (links – a, c, e) und Sommers (rechts – b, d, f).

die grössten Wärmeverluste verzeichneten. Erwähnenswert ist dabei eine unregelmässige Erhöhung des Wärmeverlustes bei der Massivholzkonstruktion, die sich mitunter bei einem Temperatursturz der Innenlufttemperatur im Winter zeigte (Abb. 14). Dies hat gleichzeitig eine erhebliche Senkung der Temperatur innerhalb der Massivholzkonstruktion verursacht (Abb. 10 c, e). Die Dämmsteinkonstruktion deckt sich oft mit der Brettstapelkonstruktion, wobei die Werte zwischen denen der Vollholzkonstruktionen und der Holzplattenkonstruktion liegen.

Anhand der gemessenen Wärmeströme wurden die instationären U-Werte während des Winters gemäss den Gleichungen (2) und (3) berechnet. Diese sind in Abb. 18, zusammen mit den daraus abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten (Gleichung 4), für die gesamten Aufbauten dargestellt.

Wärmedurchlasskoeffizient:

$$\Lambda = \frac{-\bar{q}}{\Delta T} = \frac{-\bar{q}}{\overline{T_{si}} - \overline{T_{se}}} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (2)$$

$\bar{q}$ ist der gemittelte, gemessene Wärmestrom [W/m^2], $\overline{T_{si}}$ ist die gemittelte, gemessene innere Oberflächentemperatur [K] und $\overline{T_{se}}$ ist die gemittelte, gemessene äussere Oberflächentemperatur [K].

Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert):

$$U = \frac{1}{R_i + \frac{1}{\Lambda} + R_e} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (3)$$

Λ ist der Wärmedurchlasskoeffizient [$W/(m^2 \cdot K)$], R_i ist der Wärmeübergangswiderstand der Innenseite [$(m^2 \cdot K)/W$] und R_e ist der Wärmeübergangswiderstand der Aussenseite [$(m^2 \cdot K)/W$].

Aus dem Wärmedurchlasskoeffizienten abgeleitete Wärmeleitfähigkeit (Lambda-Wert):

$$\lambda = \Lambda \cdot d \quad [W/(m \cdot K)] \quad (4)$$

Λ ist der Wärmedurchlasskoeffizient [$W/(m^2 \cdot K)$] und d ist die Dicke des Aufbaus [m].

Für die Wärmeübergangswiderstände der Innen- und Aussenseite wurden die in der Norm DIN EN ISO 6946 [7] aufgeführten, stationären Werte $R_i = 0.13 (m^2 \cdot K)/W$ und $R_e = 0.04 (m^2 \cdot K)/W$ eingesetzt. In der Tab. 2 ist ein Vergleich mit den nach der Norm DIN EN ISO 6946 [7] stationär berechneten Werten dargestellt. Die stationären U-Werte wurden aus den Modellen und Lambda-Werten der Materialien, die bei der Delphin-Simulation eingesetzt wurden, berechnet und sind im Kapitel 7.1.1 und Kapitel 7.1.3 dargestellt. Für das Holz wurde im ersten Fall eine Wärmeleitfähigkeit von $0.12 W/(m \cdot K)$ eingesetzt, die in der Norm DIN EN ISO 10456 [8] für Nutzholz mit einer Dichte von $450 kg/m^3$ angegeben ist. Im zweiten Fall wurde für das Holz eine Wärmeleitfähigkeit von $0.1 W/(m \cdot K)$ eingesetzt. Zusätzlich wurde ein stationärer U-Wert aus den an der ETH gemessenen Wärmeleitfähigkeiten für das geschlitzte Holzwandelement von $0.063 W/(m \cdot K)$, für das verdübelte Massivholzelement von $0.088 W/(m \cdot K)$ und für das Brettstapelelement von $0.1 W/(m \cdot K)$ berechnet (dritte Spalte in der Tab. 2) [21], [40], [45]. Für zwei Dämmmaterialien – Zelluloseflocken und Holzweichfaserplatten – wurden die Wärmeleitfähigkeitswerte um einen Feuchte-Zuschlag von 0.5 % pro Prozent Wassergehaltes erhöht. Es wurde bei beiden Dämmstoffen von einem mittleren Wassergehalt von 12 % ausgegangen. Dies ergibt Lambdawerte für Zelluloseflocken von $0.0424 W/(m \cdot K)$, für Holzweichfaserplatten von $0.0445 W/(m \cdot K)$ bei einer Dichte von $155 kg/m^3$, von $0.0477 W/(m \cdot K)$ bei einer Dichte von $183 kg/m^3$ und von $0.0509 W/(m \cdot K)$ bei einer Dichte von $240 kg/m^3$. Die Wärmeleitfähigkeit der Luft in den Hohlräumen wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 6946 [7] berechnet und beträgt für einen Hohlraum mit einer Dicke von 1 mm einen Lambda-Wert von $0.0289 W/(m \cdot K)$ und bei einer Dicke von 2 mm einen Wert von $0.0329 W/(m \cdot K)$.

Beim Vergleich der U-Werte zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den instationären und stationären Berechnungen. Der grösste Unterschied zeigt sich bei der Massivholzkonstruktion, bei der die Berechnung mit einem Lambda-Wert des Holzes von $0.12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ einen deutlich höheren U-Wert von $0.275 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ gegenüber den anderen Berechnungen ergab.

Tab. 2: Vergleich der stationären mit den instationären U-Werten in $[\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}]$ bei den getesteten Konstruktionen.

Aufbau	U-Wert stationär ¹	U-Wert stationär ²	U-Wert stationär ³	U-Wert instationär ⁴
Geschlitzte Holzkonstruktion	0.211	0.195	0.208	0.206
Massivholzkonstruktion	0.275	0.236	0.224	0.240
Dämmsteinkonstruktion	0.137	0.137	-	0.135
Holzplattenkonstruktion	0.098	0.098	-	0.101
Brettstapelkonstruktion	0.159	0.154	0.154	0.157

¹ berechnet mit einer Wärmeleitfähigkeit des Holzes von $0.12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ gemäss der Norm DIN EN ISO 10456 [8]

² berechnet mit einer Wärmeleitfähigkeit des Holzes von $0.1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

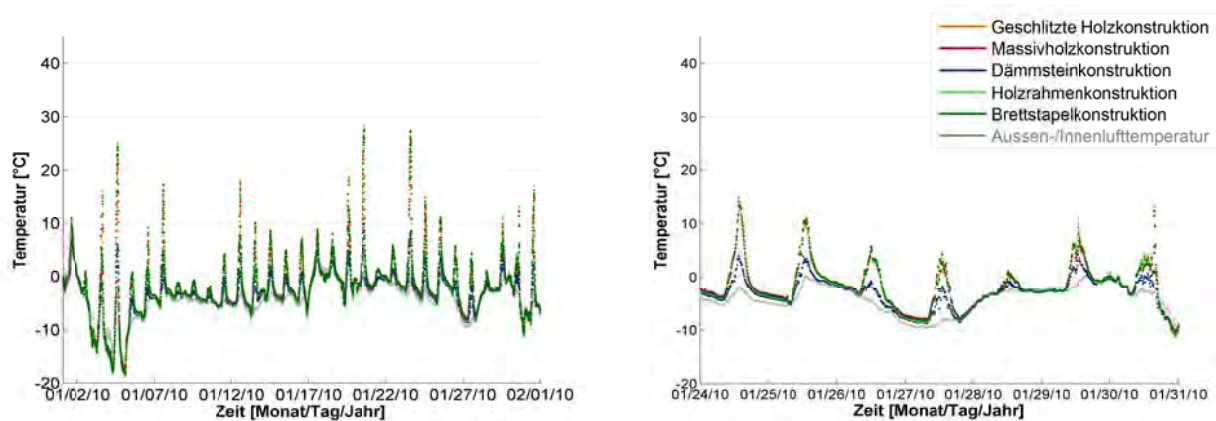
³ berechnet mit den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten für die gesamten Vollholzelemente bei Normalklima ($23^\circ\text{C}/65\%$ rel. Luftfeuchte)

⁴ Mittelwerte von den Monaten Dezember und Januar

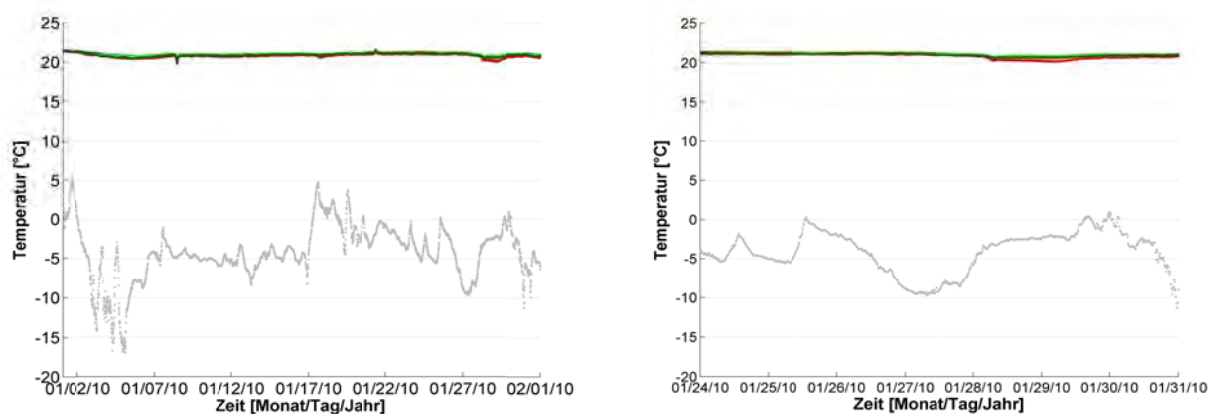
Demgegenüber hat sich eine erhöhte Abgabe der Wärme nach innen aufgrund des erhöhten Wärmespeichervermögens des Massivholzes unter diesen Bedingungen nicht bestätigt. Eine erhöhte Abgabe der Speicherwärme bei Vollholzkonstruktionen sieht man erst in der Sommerperiode bei einem Temperatursturz der Aussenlufttemperatur (Abb. 15 d). Der Verlauf der Wärmeströme nach innen ist jedoch bei Konstruktionen aus Massivholz sowohl im Sommer als auch im Winter stabiler als bei den Dämmkonstruktionen. Demgegenüber wurde der Wärmetransport bei der Holzplattenkonstruktion am stärksten von der Sonnenstrahlung beeinflusst. Dieses unterschiedliche Verhalten kann einen starken Einfluss auf die Regelungstechnik in den Gebäuden haben.

6.2 Thermographie

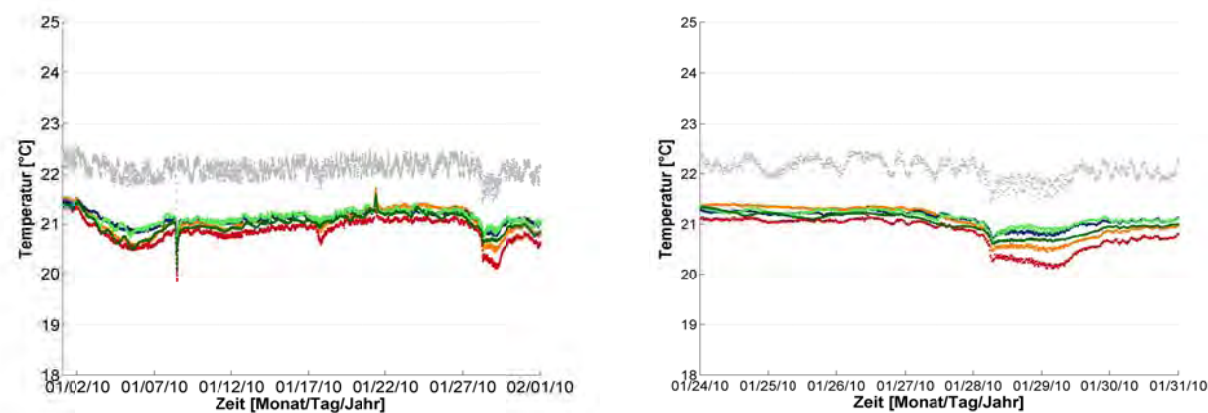
Am 17. Dezember 2009 gegen 7:00 Uhr wurden vom IBP Thermographiebilder von den Aussenfassaden der untersuchten Konstruktionen aufgenommen. Diese sind in Abb. 19 dargestellt. Die Aussenlufttemperatur betrug ca. -8°C . Da bei den Thermographiebildern die Temperaturskala durch Nebeneinflüsse beeinflusst wurde, kann die Skala nur als Orientierungsangabe dienen. Es ist zu erkennen, dass die Holzplattenkonstruktion und die Brettstapelkonstruktion die niedrigsten Oberflächentemperaturen aufweisen, mit leichten Wärmebrücken in den Bereichen, wo die Balken der Rahmenkonstruktionen eingesetzt sind. Die Vollholzkonstruktionen weisen demgegenüber höhere Temperaturen an der Oberfläche auf, jedoch mit gleichmässiger Verteilung über die gesamte Testfläche. Bei der Dämmsteinkonstruktion transportieren die dünnen Klebfugen beachtlich mehr Wärme nach aussen, die dadurch kleine Wärmebrücken bilden.



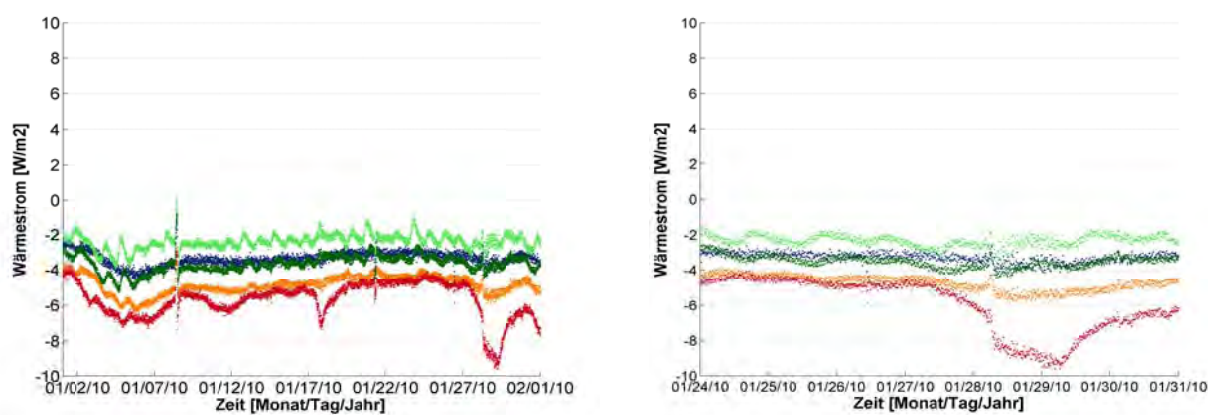
a) Aussenoberflächentemperaturen gegenüber Aussenlufttemperatur



b) Innenoberflächentemperaturen gegenüber Aussenlufttemperatur

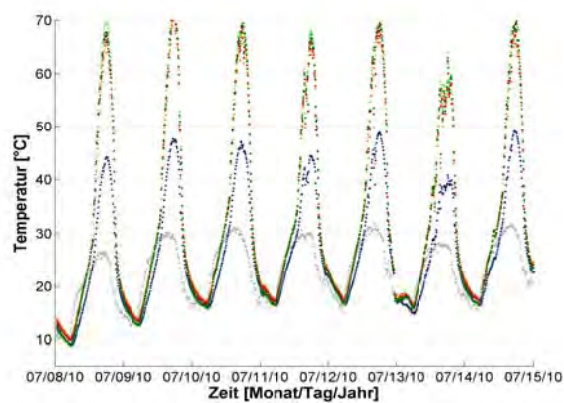
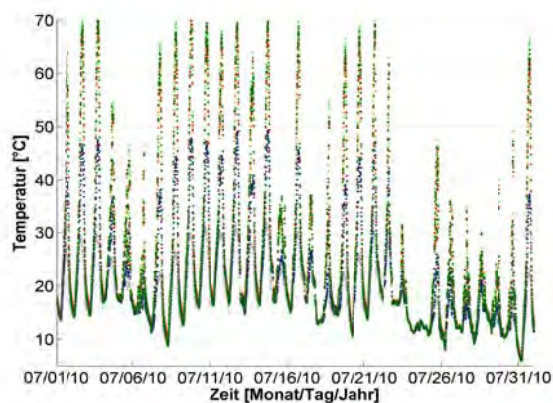


c) Innenoberflächentemperaturen gegenüber Innenlufttemperatur

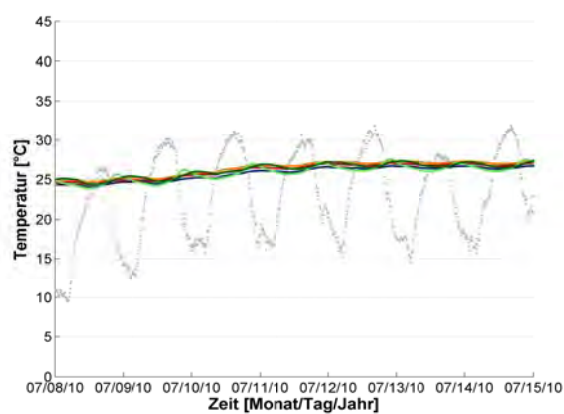
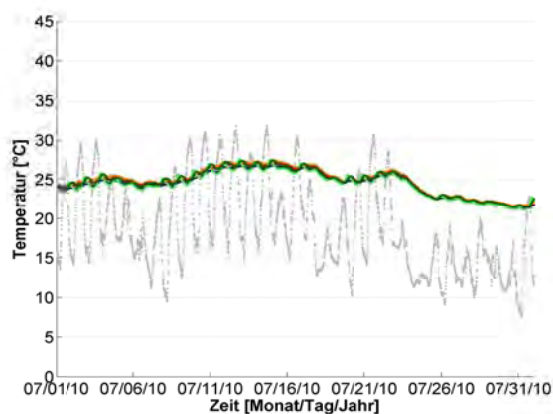


d) Gemessene Wärmeströme an der Innenoberfläche (Wärmeverluste sind Minuswerte)

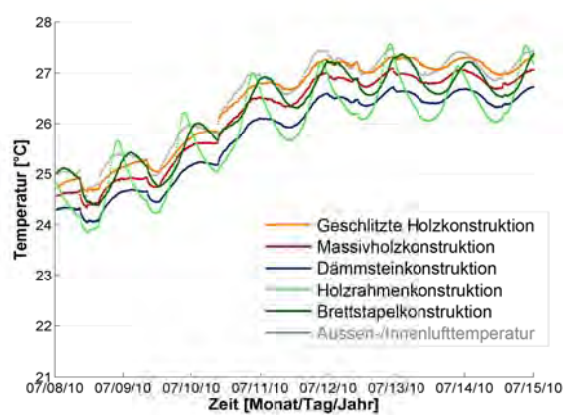
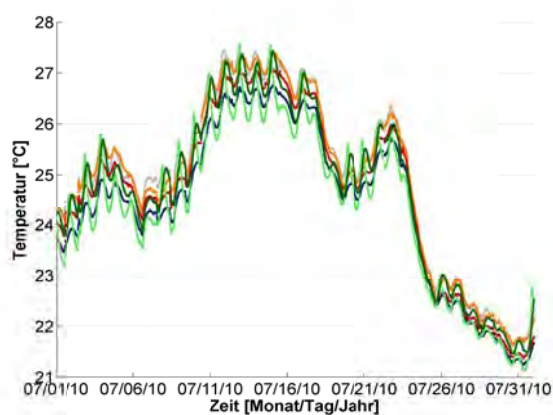
Abb. 14: Vergleich der Temperaturverläufe an den Oberflächen der untersuchten Konstruktionen sowie der gemessenen Wärmeströme im Januar 2010 (links Monatsansicht, rechts Wochenansicht).



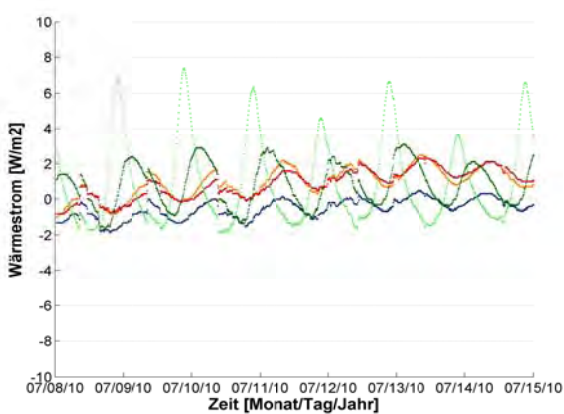
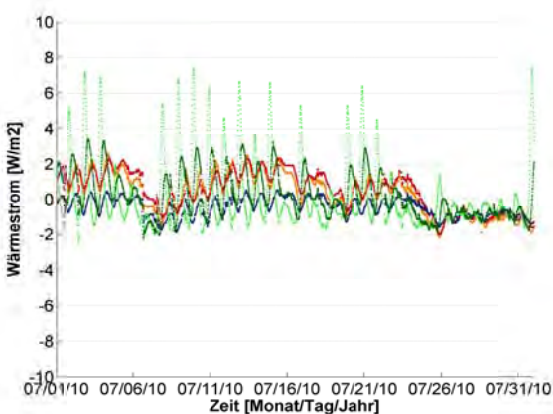
a) Aussenoberflächentemperaturen gegenüber Aussenlufttemperatur



b) Innenoberflächentemperaturen gegenüber Aussenlufttemperatur

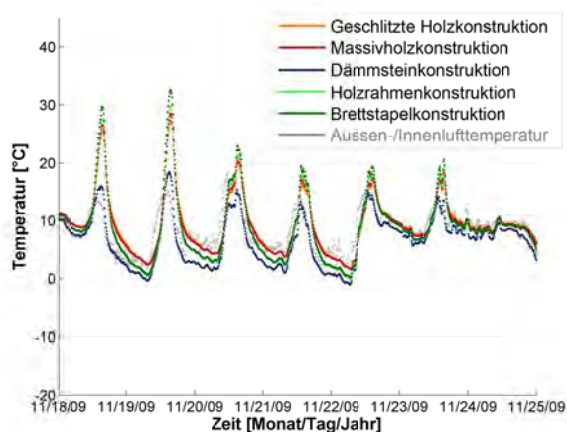


c) Innenoberflächentemperaturen gegenüber Innenlufttemperatur

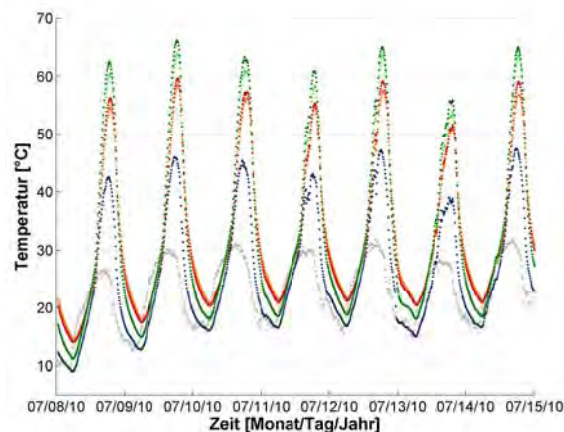


d) Gemessene Wärmeströme an der Innenoberfläche (Wärmeverluste sind Minuswerte)

Abb. 15: Vergleich der Temperaturverläufe an den Oberflächen der untersuchten Konstruktionen sowie der gemessenen Wärmeströme im Juli 2010 (links Monatsansicht, rechts Wochenansicht)

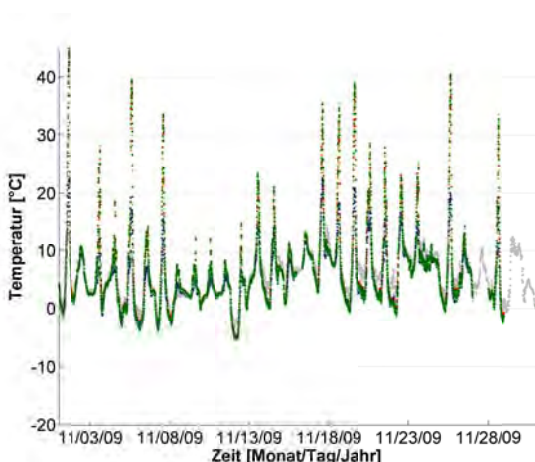


a) Wochenansicht (18.11. - 25.11.2009)

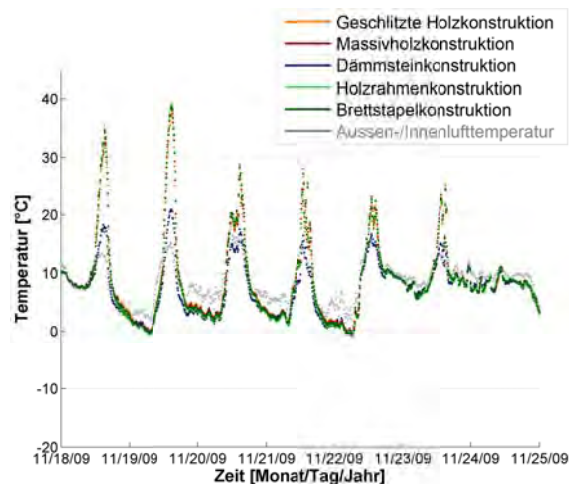


b) Wochenansicht (08.07. - 15.07.2010)

Abb. 16: Vergleich der Temperaturverläufe in der äussersten Grenzschiicht (unter der Fassade bzw. unter dem Putz) der untersuchten Konstruktionen.



a) Monatsansicht



b) Wochenansicht (18.11. - 25.11.2009)

Abb. 17: Vergleich der Temperaturverläufe an der Aussenoberfläche der untersuchten Konstruktionen im November 2009.

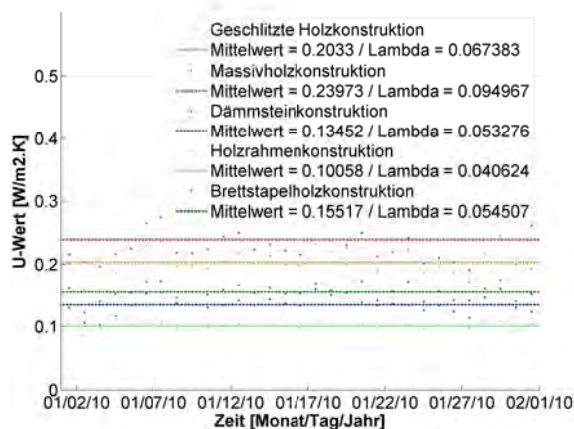
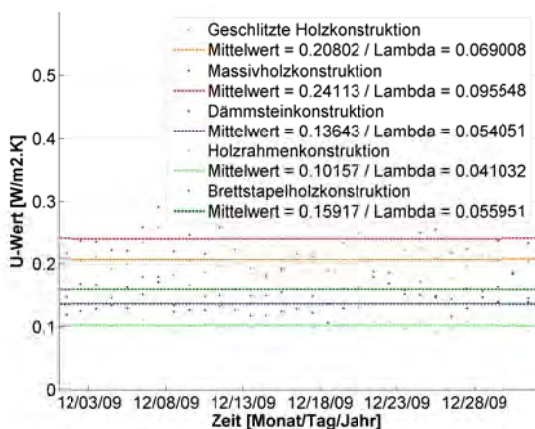


Abb. 18: Begerechnete instationäre U-Werte der untersuchten Konstruktionen in den Wintermonaten Dezember 2009 (links) und Januar 2010 (rechts).

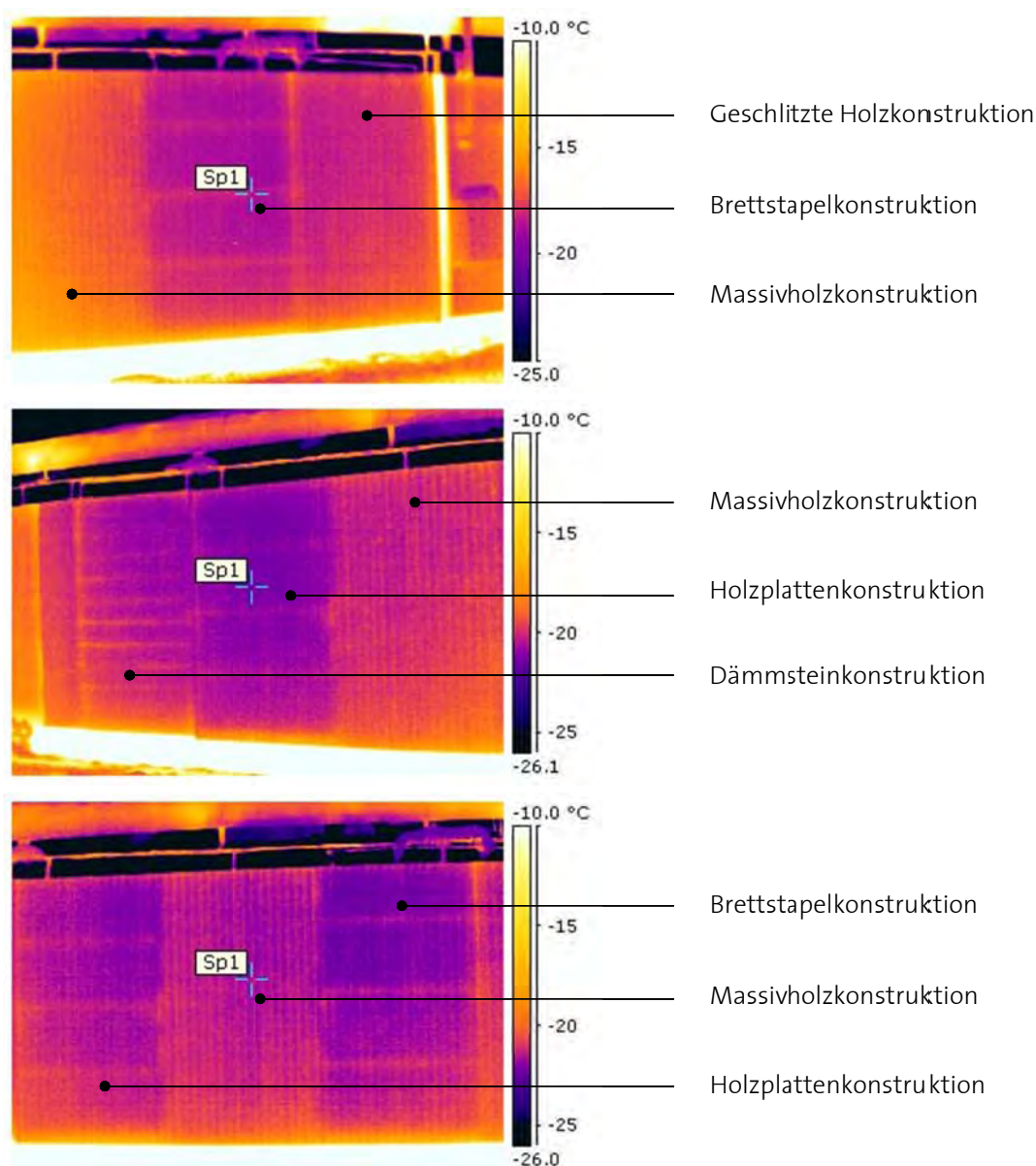


Abb. 19: Thermographieaufnahmen der untersuchten Konstruktionen.

6.3 Feuchtetransport

In den folgenden Abb.20 - Abb.25 sind die mit den innerhalb der Konstruktion angebrachten Feuchtefühlern ermittelten Diagramme dargestellt. Diese zeigen, dass die Vollholzkonstruktionen eine konstante rel. Luftfeuchte in der Mittellage aufweisen. Bei der geschlitzten Holzkonstruktion ist der Verlauf sogar stabiler als bei der Massivholzkonstruktion. Die Werte fallen jedoch leicht höher aus und liegen bei ca. 65 % rel. Luftfeuchte. Die rel. Luftfeuchte liegt bei der Massivholzkonstruktion sehr tief und überschreitet nur leicht den Wert von 55 % (während des Sommers). Bei den restlichen Konstruktionen erreichen die rel. Luftfeuchten im Winter Werte von 85 – 90 % (bei der Holzplattenkonstruktion immer nur kurzfristig bei Erhöhung des Aussenluftdampfdruckes). Allgemein gilt bei rel. Luftfeuchten oberhalb von 80 %, hauptsächlich bei Temperaturen nahe bei 30 °C oder darüber, dass dadurch Feuchteschäden innerhalb der Wand verursacht werden können. Bei den beiden Leichtbaukonstruktionen müssen die hohen rel. Luftfeuchten nicht kritisch betrachtet werden, da diese nur bei niedrigen Temperaturen auftreten. Jedoch übersteigen die rel. Luftfeuchten in der Dämmsteinkonstruktion (Abb.22) im Winter die 80 % Grenze und bleiben auch während der sommerlichen Monate zu hoch (bis zu 80 %). Wie Abb. 23 zeigt, erreichen die Werte in der

Grenzschicht 4 80-85 % rel. Luftfeuchte bei Temperaturen von 15 °C bis zu fast 30 °C. Diese Bedingungen stellen ein erhöhtes Risiko für Schimmelpilzbildung dar.

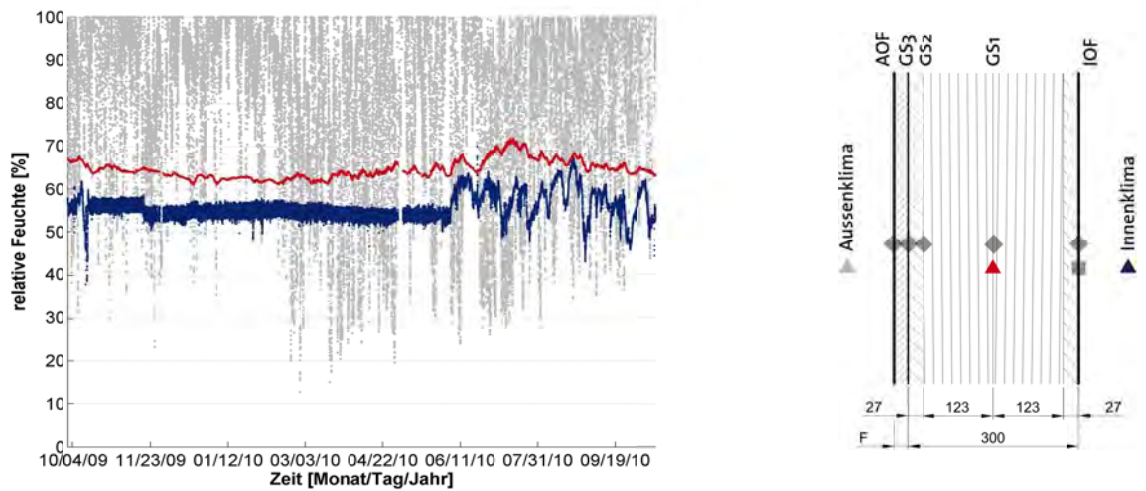


Abb. 20: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der geschlitzten Holzkonstruktion.

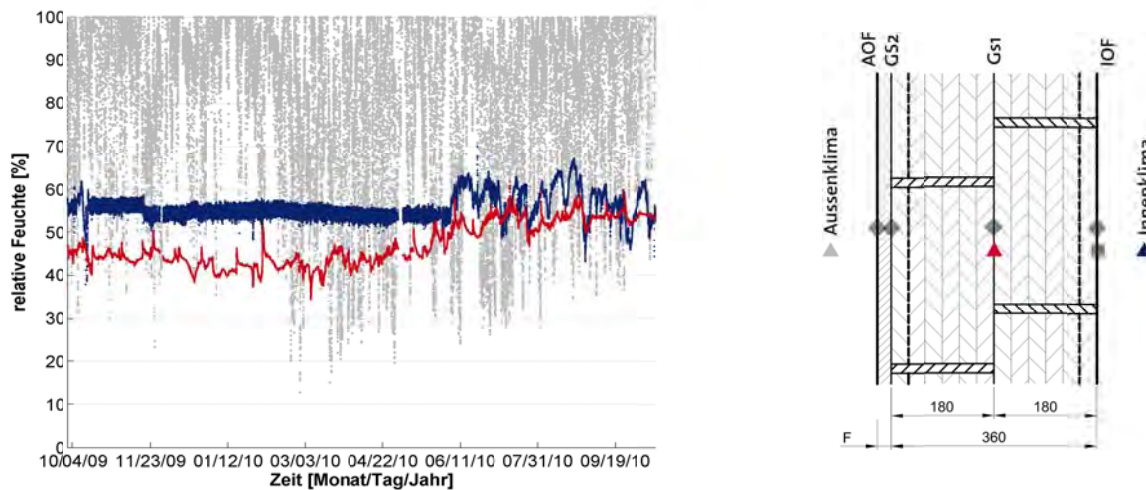


Abb. 21: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Massivholzkonstruktion.

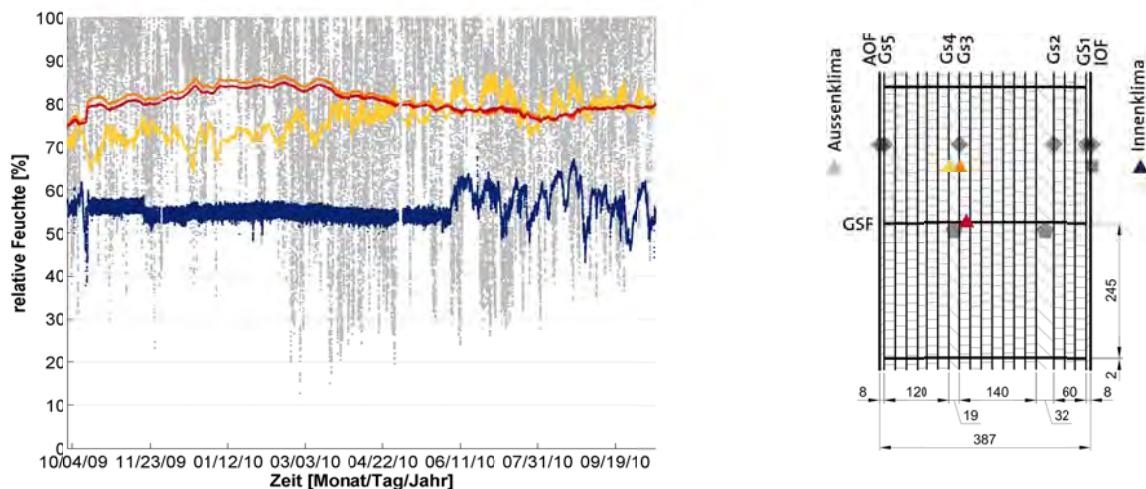


Abb. 22: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Dämmsteinkonstruktion.

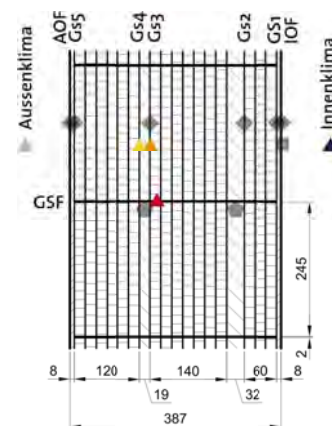
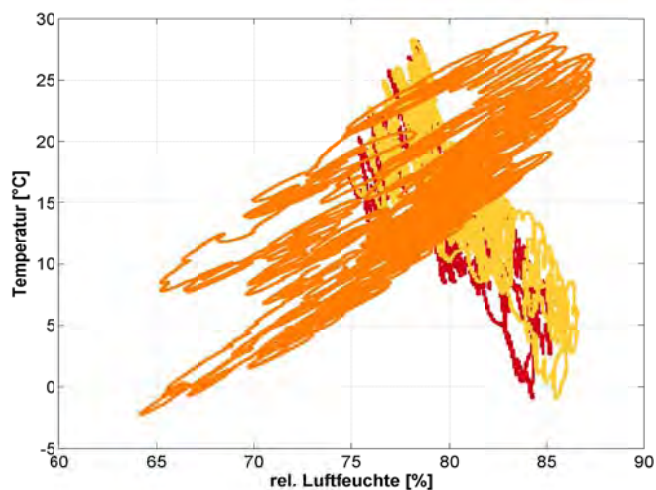


Abb. 23: Hydrothermische Bedingungen in einzelnen Grenzsichten bei der Dämmsteinkonstruktion.

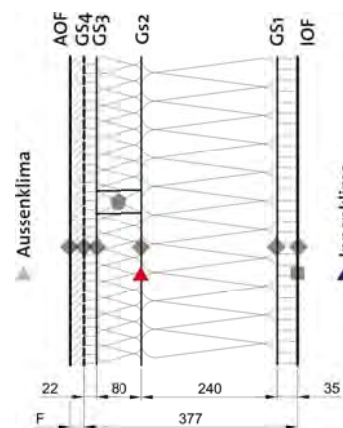
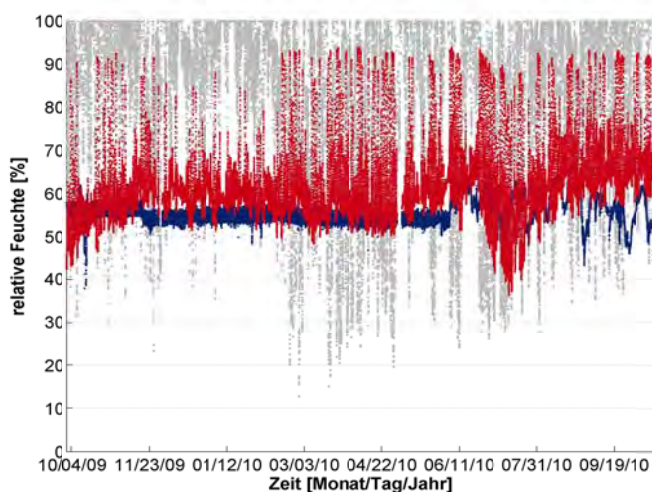


Abb. 24: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Holzplattenkonstruktion.

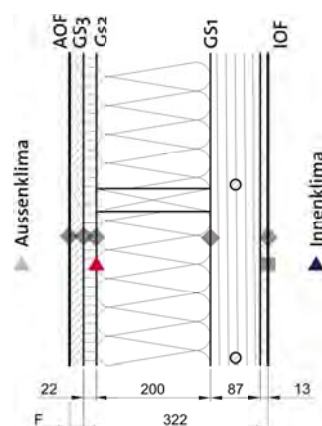
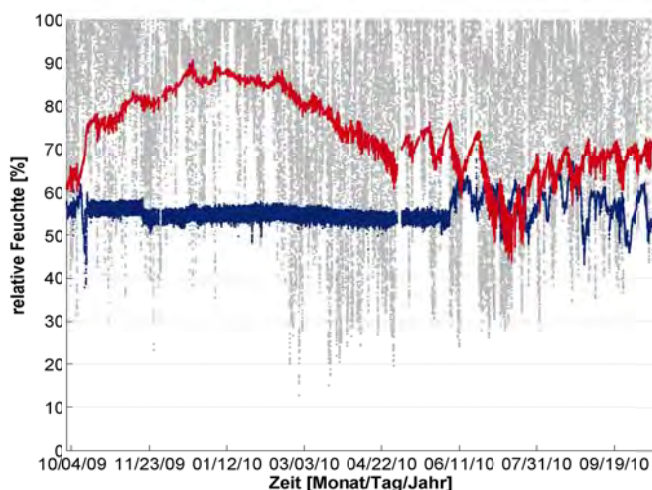


Abb. 25: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Brettstapelkonstruktion.

6.4 Holzfeuchte

Gemessen wurde die Holzfeuchte nur bei der Dämmstein- und der Holzplattenkonstruktion. Zu sehen ist ein Ausfall der Messdaten in der Massivholzplatte an der Innenseite der Dämmsteinkonstruktion kurz nach Messbeginn (Abb. 26). Die Holzfeuchte wurde zusätzlich mit den Ersatz-Sensoren des Fraunhofer-Institutes erfasst, und diese weisen lediglich bei der äusseren Massivholzplatte der Dämmsteinkonstruktion leicht höhere Werte auf. Sonst haben beide Messungen Übereinstimmung gezeigt. Bei beiden Konstruktionen überschreitet jedoch die Holzfeuchte an den gemessenen Stellen den kritischen Wert von 20 % nicht. Bei der Holzplattenkonstruktion bewegt sich die Holzfeuchte im Balken um die 12 % (Abb. 26 und Abb. 27).

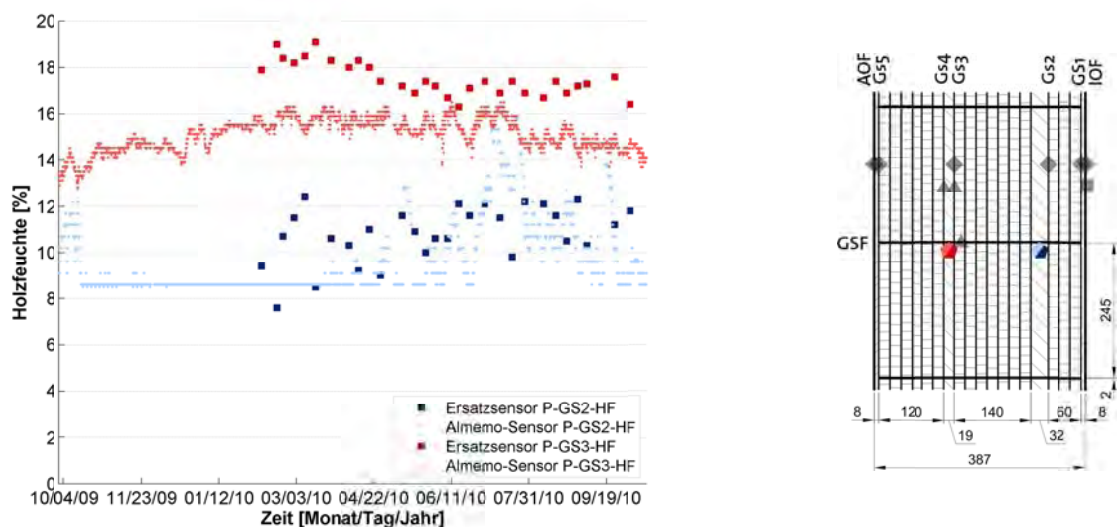


Abb. 26: Verlauf der Holzfeuchte in der Dämmsteinkonstruktion.

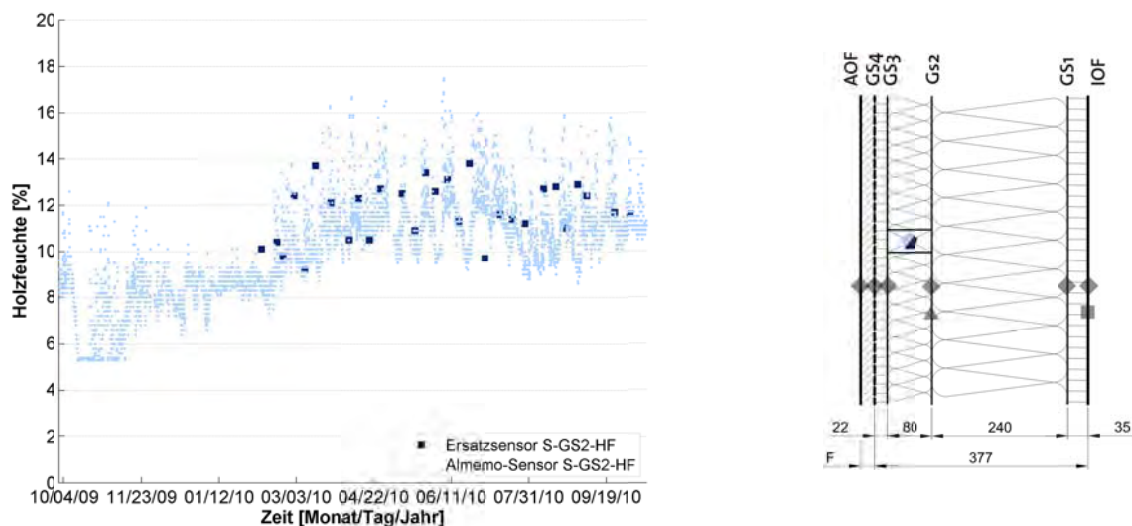


Abb. 27: Verlauf der Holzfeuchte in der Holzplattenkonstruktion.

7 Simulation

Analog zu den gemessenen Daten wurde der Feuchte- und Temperaturtransport in den Wandaufbauten mittels der bauphysikalischen Software Delphin (Version 5.6.5.) simuliert. Die Software wurde am Institut für Bauklimatik der TU Dresden (IBK) für die Simulation des gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Stofftransportes in porösen Medien erstellt [49] und die Simulationsrechnung erfolgte direkt in Zusammenarbeit mit dem IBK.

Zusätzlich wurde die Berechnung mit einer zweiten bauphysikalischen Simulationssoftware, WUFI, entwickelt am IBP zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen, durchgeführt [20]. Die Berechnung der gemessenen Holzwandelemente mittels der Software WUFI wurde direkt am IBP durchgeführt und die Resultate in Form eines separaten Berichtes präsentiert (siehe erweiterter Anhang: **IBP-Bericht RKB 001/2011/292** und **Protokolle der WUFI-Berechnungen**).

Die beiden Programme sind ähnlich konzipiert, allerdings ist Delphin stärker auf wissenschaftliche Fragestellungen hin ausgerichtet und WUFI für den kommerziellen Einsatz entwickelt worden. Die Resultate der Simulationen sollen einerseits den Grad der Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Daten und andererseits die Eignung des Einsatzes der Software für die Berechnung des Feuchte- und Wärmetransportes in Holzbauelementen in der Praxis aufzeigen.

7.1 Simulation in Delphin

Im folgenden Kapitel sind die Modelle und die Einstellungen der Simulation in Delphin sowie die Materialcharakteristiken der eingesetzten Materialien dargestellt.

7.1.1 Modelle

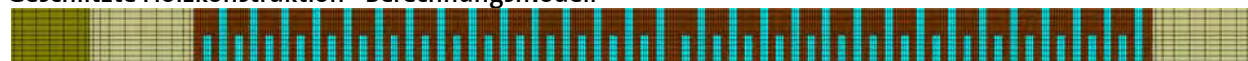
Für die Berechnung wurden die Wandelemente anhand der realen Aufbauten und ihrer Dimensionen als 2D Konstruktionen modelliert. Den Modellen wurden insgesamt 15 Materialien mit unterschiedlichen Parametern zugewiesen. Die Modelle wurden manuell für jede Konstruktion in Berechnungselemente (Simulationsgitter) unterteilt. Die Berechnungsmodelle mit den zugewiesenen Materialien, dem zugewiesenen, langwelligen Strahlungsaustausch in den Hohlräumen und den zugewiesenen Diffusionswiderständen in den Klebfugen sind in den Abb. 28 - Abb. 32 dargestellt.

7.1.2 Eingangsgrößen und Koeffizienten

Allen Modellen wurden die gleichen Randbedingungen zugewiesen. Diese bestehen an der Aussenseite aus den gemessenen Klimadaten (Aussenlufttemperatur, relative Aussenluftfeuchte und direkte Weststrahlung) und an der Innenseite aus den gemessenen Raumluftbedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte). Da die Grösse der Fassade des Testgebäudes die Windbewegungen zum Teil behindert, wurde der Norm-Wert des Austauschkoeffizienten für die Wärmeleitung (Gesamtwärmeübergangskoeffizient, bestehend aus dem konvektiven und radiativen Wärmestrom) an der Aussenseite (h_e) von 25 auf 20 W/m²·K angepasst. Der Austauschkoeffizient für die Wärmeleitung an der Innenseite (h_i) wurde ebenso aufgrund der kleineren Luftbewegung im Testgebäude wegen einer nur temporalen Nutzung des Innenraums von 8 auf 5 W/m²·K reduziert. Die Austauschkoeffizienten für die Dampfdiffusion an der Aussenseite (β_e) und an der Innenseite (β_i) wurden nach den Gleichungen (5) und (6) gemäss Häupl [18] berechnet:

$$\beta_e = 7 \cdot 10^{-9} \cdot h_e \quad [s/m] \quad (5)$$

$$\beta_i = 7 \cdot 10^{-9} \cdot h_i \quad [s/m] \quad (6)$$

Geschlitzte Holzkonstruktion - Berechnungsmodell

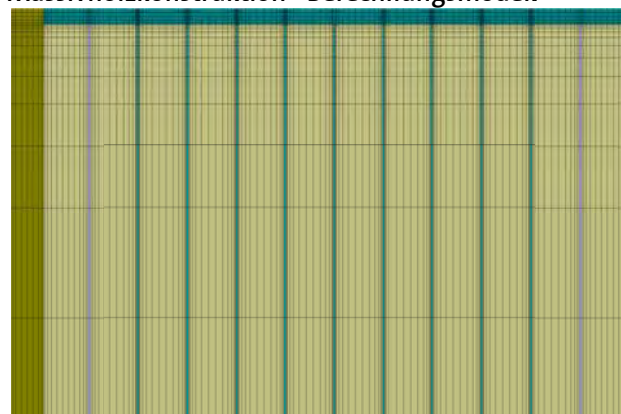
Abmessungen: $20+27+2.5+(59 \times 2)+5+(59 \times 2)+27=320$ [mm]

- vergraute Fassade (Fichtenholz-Fassade)
- Schalung (Fichtenholz)
- geschlitztes Holz (Fichtenholz)
- Luft (Hohlräume)



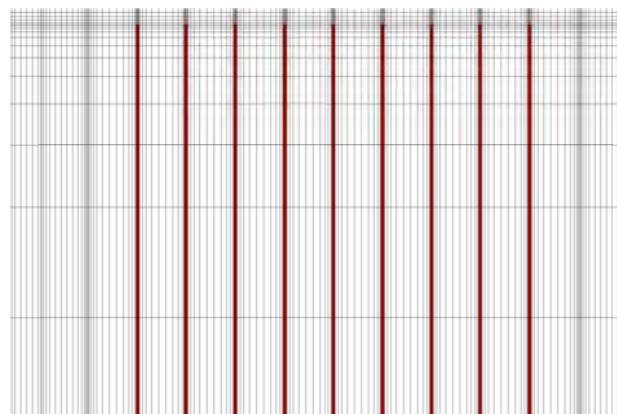
- Langwelliger Strahlungsaustausch im Hohlraum

Abb. 28: Berechnungsmodell der geschlitzten Holzkonstruktion.

Massivholzkonstruktion - Berechnungsmodell

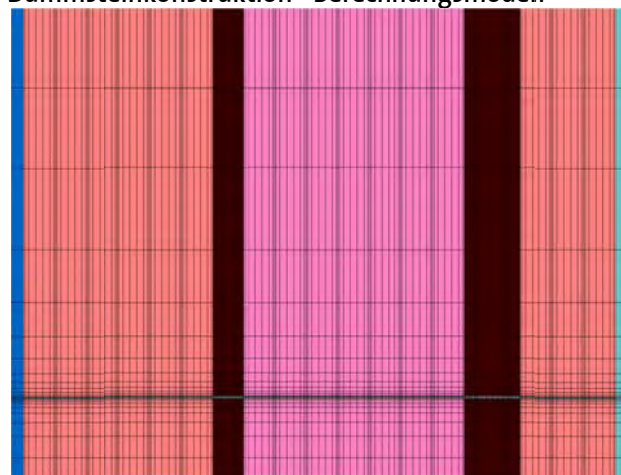
Abmessungen: $20+28.5+2+(29+1) \times 9+29+2+28.5=380$ [mm]

- vergraute Fassade (Fichtenholz-Fassade)
- verdübeltes Massivholz (Fichtenholz)
- Dübel (Buchenholz)
- Winddichtungsfolie (Wolle/Baumwolle)
- Luft (Hohlräume)



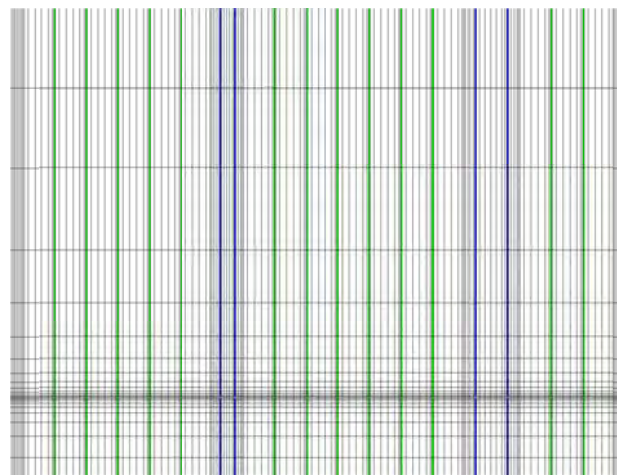
- Langwelliger Strahlungsaustausch im Hohlraum

Abb. 29: Berechnungsmodell der Massivholzkonstruktion.

Dämmsteinkonstruktion - Berechnungsmodell

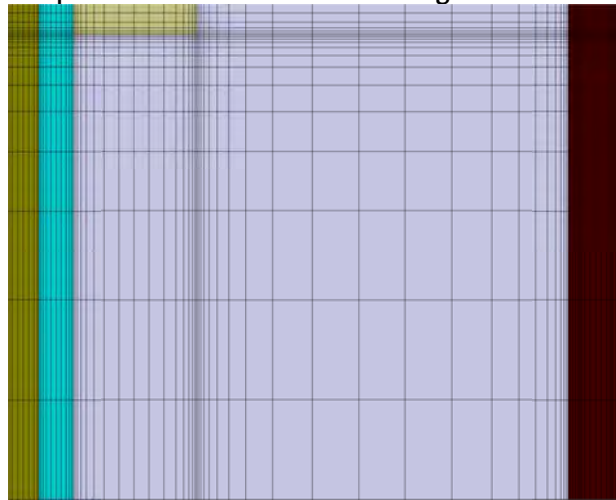
Abmessungen: $8+120+19+140+32+60+8=387$

- Aussenputz
- Holzweichfaserplatten (240 kg/m^3)
- mineralische Klebschichten
- 3-schichtige Massivholzplatte (Fichtenholz - Massivholzplatte)
- Holzweichfaserplatten (155 kg/m^3)
- Innenputz



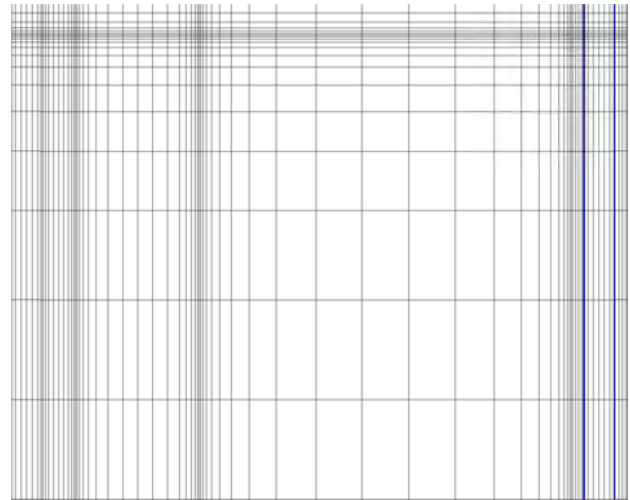
- zusätzlicher Wasserdampfdiffusionswiderstand der Klebfugen in Massivholzplatten
- zusätzlicher Wasserdampfdiffusionswiderstand der Klebfugen zwischen Holzweichfaserplatten

Abb. 30: Berechnungsmodell der Dämmsteinkonstruktion.

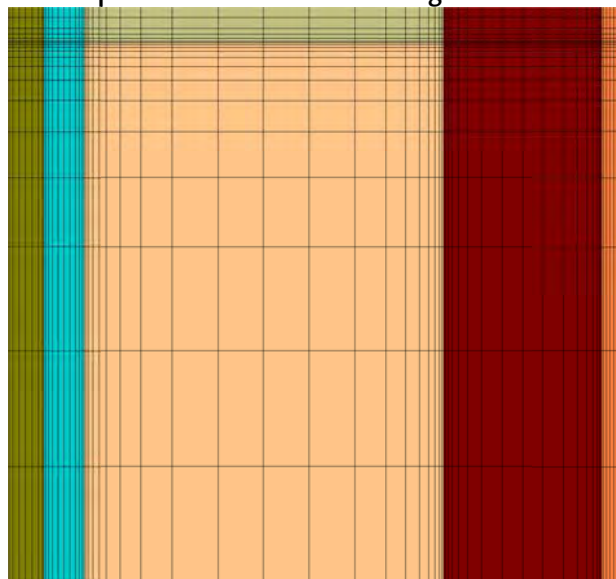
Holzplattenkonstruktion - Berechnungsmodell

Abmessungen: 20+22+80+240+35=397 [mm]

- vergraute Fassade (Fichtenholz-Fassade)
- Querrost (Fichtenholz)
- Holzweichfaserplatte (183 kg/m³)
- Wärmedämmung (Steinwolle)
- 3-schichtige Massivholzplatte (Fichtenholz-Massivholzplatte)



- zusätzlicher Wasserdampfdiffusionswiderstand der Klebfugen in Massivholzplatten

Abb. 31: Berechnungsmodell der Holzplattenkonstruktion.**Brettstapelkonstruktion - Berechnungsmodell**

Abmessungen: 20+22+200+87+13=342 [mm]

- vergraute Fassade (Fichtenholz-Fassade)
- Holzplattenkonstruktion (Fichtenholz)
- Holzweichfaserplatte (183 kg/m³)
- Wärmedämmung (Zelluloseflocken)
- Brettstapelelement (Fichtenholz)
- Gipskarton

Abb. 32: Berechnungsmodell der Brettstapelkonstruktion.

Der Absorptionskoeffizient der Aussenoberfläche wurde bei der vergrauten Fassade mit 0.85 (graue, matte Holzfläche), beim Aussenputz mit 0.35 (weisse Fläche) eingesetzt. Da in der geschlitzten Holzkonstruktion und in der Massivholzkonstruktion Hohlräume bestehen, wurde an diesen Stellen, wie oben erwähnt, ein langwelliger Strahlungsaustausch modelliert (Positionen in Abb. 28 und Abb. 29). Als Emissionsgrad der inneren Oberflächen wurde der Wert von Fricker [12] für Holz von 0.87 verwendet. In den Modellen für die Holzplattenkonstruktion und die Dämmsteinkonstruktion wurden zusätzlich noch Wasserdampfdiffusionswiderstände für die Klebfugen in den Massivholzplatten (s_d -Wert = 2 m) und zwischen den Holzweichfaserplatten (s_d -Wert = 0.6 m, da diese nicht ganzflächig verklebt waren) eingesetzt (Positionen in Abb. 30 und Abb. 31).

Als Anfangsparameter der Materialien (Anfangsfeuchte und Anfangstemperatur) in den Konstruktionen wurden die beim Start aktuell gemessenen Werte (bzw. gemittelten Tageswerte) eingesetzt. Diese wurden jedem Aufbau-Modell immer in einem Bereich laut den Positionen des Messensors zugewiesen.

7.1.3 Materialeigenschaften

Wie bereits erwähnt, wurden insgesamt 15 unterschiedliche Materialien für die Simulation benutzt. Der Materialdatensatz von Fichtenholz (Tab. 3 und Abb. 33) wurde für einen Grossteil der Vollholzelemente eingesetzt (Rahmen- und Schalungselemente, geschlitzte Holzelemente, verdübelte Massivholzelemente und Brettstapelelemente). Bei den Fassadenelementen wurde der Wasseraufnahmekoeffizient aufgrund des Leinölanstriches von 0.0024 auf $0.0016 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$ gesenkt. Damit wurde auch die Flüssigwasserleitfähigkeitskurve automatisch angepasst (nicht im Bericht dargestellt). Für die 3-schichtigen Massivholzplatten wurde das Fichtenholz aufgrund der Klebfugen in Wärmestromrichtung von 0.079 auf $0.09 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ erhöht. Die restlichen Parameter dieser beiden Holzprodukte sind mit dem Material Fichtenholz identisch.

Da die Vollholzelemente aus Fichtenholz gegenüber der Hauptrichtung des Wärme- und Feuchtetransports quer zur Faser angeordnet waren (jedoch nicht in radialer oder tangentialer Richtung ausgerichtet), wurden die Parameter für die Simulation von gemessenen, gemittelten Radial- und Tangentialwerten des Fichtenholzes abgeleitet. Demgegenüber lag die Haupttransportrichtung der Dübel aus Buchenholz in longitudinaler Richtung. Ihre Parameter wurden deshalb von Messwerten in dieser Richtung abgeleitet.

Einzelne Materialkennwerte für Fichten- und Buchenholz wurden in der Holzphysikgruppe an der ETH sowie im IBK bestimmt [1], [6], [19], [29], [33], [43], [44]. Die gesamten Materialdatensätze wurden anschliessend vom IBK zusammengestellt [54]. Einige Materialkennwerte und Materialfunktionen (wie Abhängigkeit der Wärmespeicherung von der Temperatur und dem Feuchtegehalt oder Hystereseeffekte) konnten nicht in den Materialdatensatz integriert werden, da die Software Delphin diese nicht unterstützte.

Die Materialparameter für die restlichen Materialien wurden von der Datenbank der Software Delphin und internen Messungen am IBK [33], [38] übernommen und teilweise mit den Angaben der Produkthersteller ergänzt. Die Wärmeleitfähigkeit von der Holzweichfaserplatte ($183 \text{ kg}/\text{m}^3$) wurde mit $0.045 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, von den Zelluloseflocken mit $0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und von der Steinwolle mit $0.035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ angenommen. Für die Zelluloseflocken wurden zusätzlich der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor auf 1.5 und die spezifische Wärmekapazität auf $2150 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ gesetzt. Für die Holzweichfaserplatten mit unterschiedlichen Dichten wurden die Materialparameter und Materialfunktionen am IBK skaliert [54].

Die Materialparameter von allen eingesetzten Materialien sind in den Tab. 3 - Tab. 15 und in den Abb. 33 - Abb. 44 aufgeführt. Die Materialien sind in folgender Reihenfolge dargestellt: Fichtenholz (inkl. Fassade und 3-schichtige Massivholzplatte), Buchenholz, Holzweichfaserplatte ($183 \text{ kg}/\text{m}^3$), Holzweichfaserplatte ($240 \text{ kg}/\text{m}^3$), Holzweichfaserplatte ($155 \text{ kg}/\text{m}^3$), mineralische Klebschicht, Aussenputz, Innenputz, Gipskarton, Wolle/Baumwolle, Steinwolle, Zelluloseflocken und Luft (Hohlraum 3 mm).

Fichtenholz (inkl. Fassade, 3-schichtige Massivholzplatte)

Material Eigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	425	kg/m ³	Trockenrohichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	1245	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.079*	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.7516	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.59017	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.0024**	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	73	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	9.53469E-10	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.57	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 3: Materialeigenschaften und Materialparameter von Fichtenholz.

*bei der 3-schichtigen Massivholzplatte wurde die Wärmeleitfähigkeit auf 0.09 W/(m·K) erhöht.

**bei der Aussenfassade wurde der Wasseraufnahmekoeffizient auf 0.0016 kg/(m²·s^{0.5}) gesenkt.

Materialfunktionen:

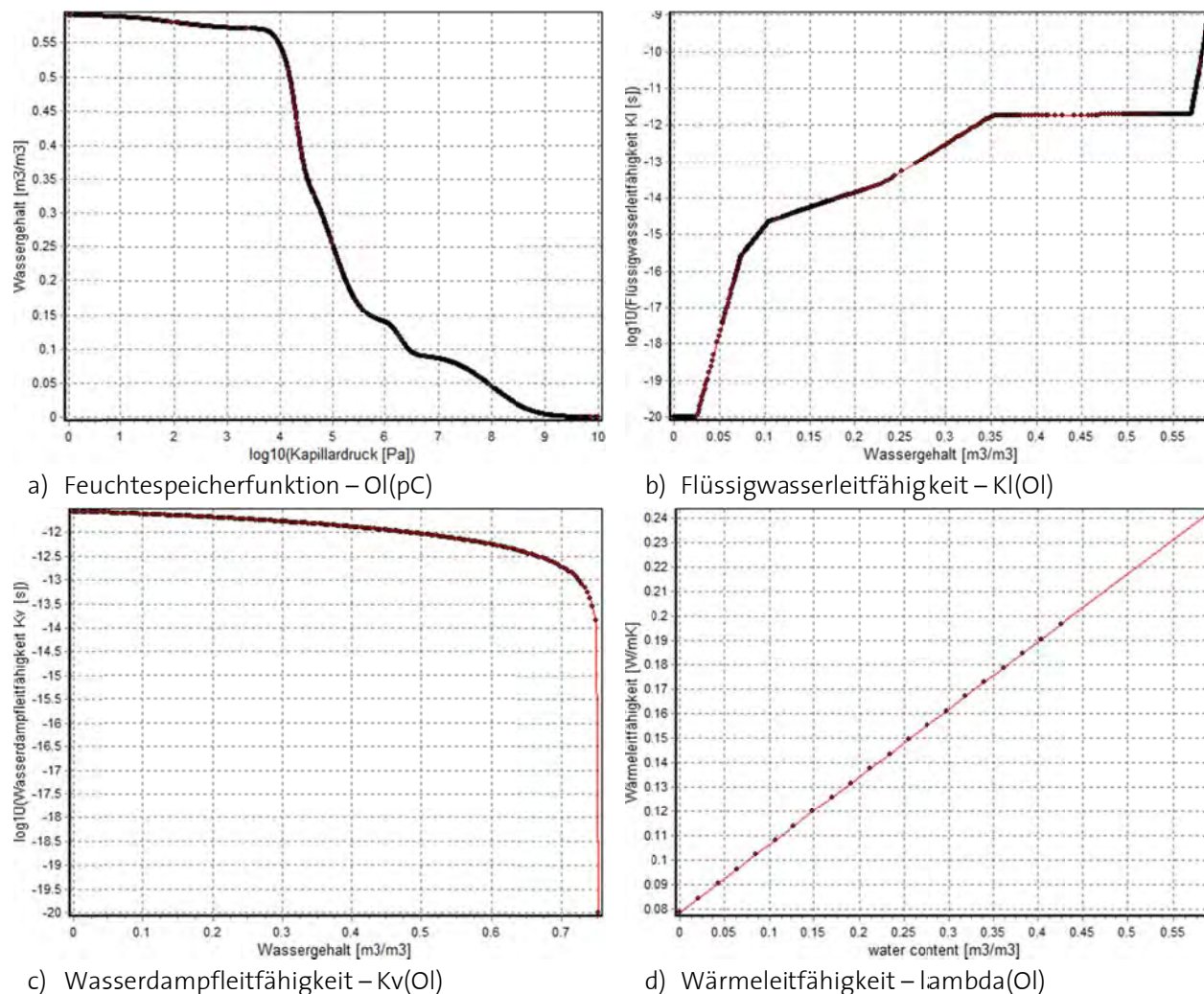


Abb. 33: Materialfunktionen von Fichtenholz.

Buchenholz

Materialeigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	660	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	1134	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.257	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.5886	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.57979	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.0287	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	6	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	1.83584E-08	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.53	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 4: Materialeigenschaften und Materialparameter von Buchenholz.

Materialfunktionen:

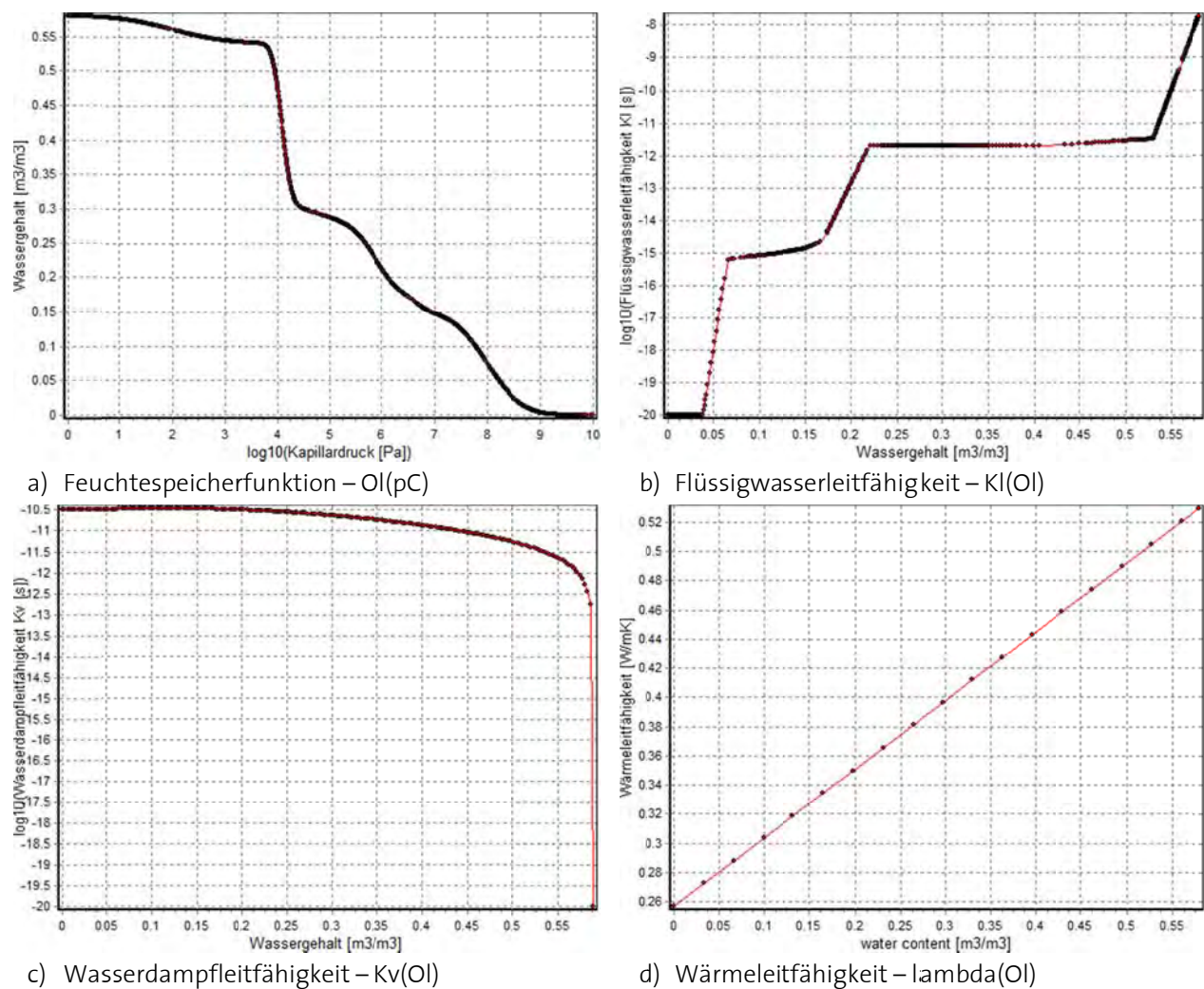


Abb. 34: Materialfunktionen von Buchenholz.

Holzweichfaserplatte (183 kg/m³)

Materialeigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	183.478	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	1474.86	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.045	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.930763	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.312034	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.00889247	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	4.92349	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	4.85277E-09	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.188	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 5: Materialeigenschaften und Materialparameter der Holzweichfaserplatte (183 kg/m³).

Materialfunktionen:

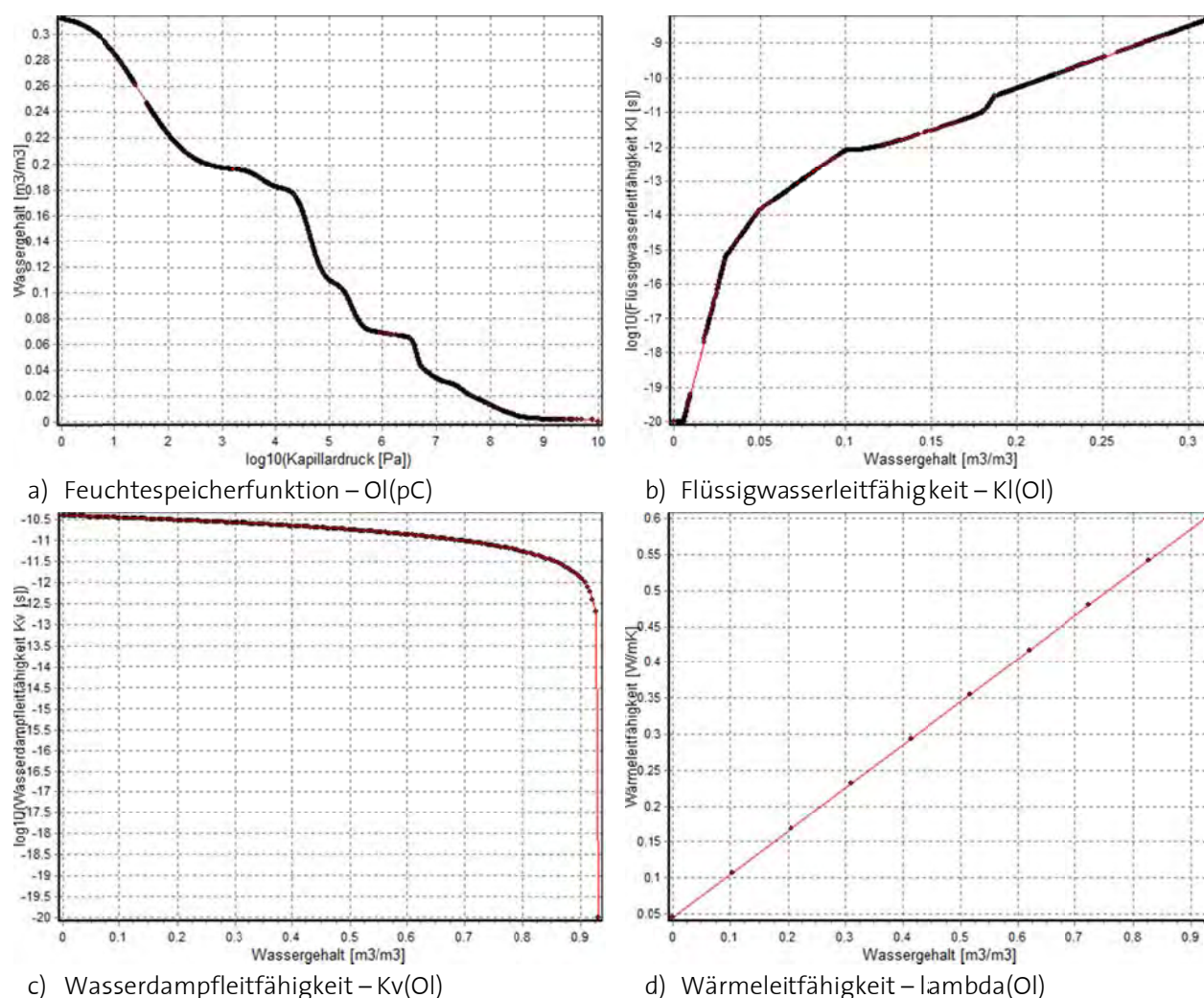


Abb. 35: Materialfunktionen der Holzweichfaserplatte (183 kg/m³).

Holzweichfaserplatte (240 kg/m³)

Materialeigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	240	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	1500	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.048	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.711562	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.4082	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.0116318	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	5	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	6.3477E-09	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.24	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 6: Materialeigenschaften und Materialparameter der Holzweichfaserplatte (240 kg/m³).

Materialfunktionen:

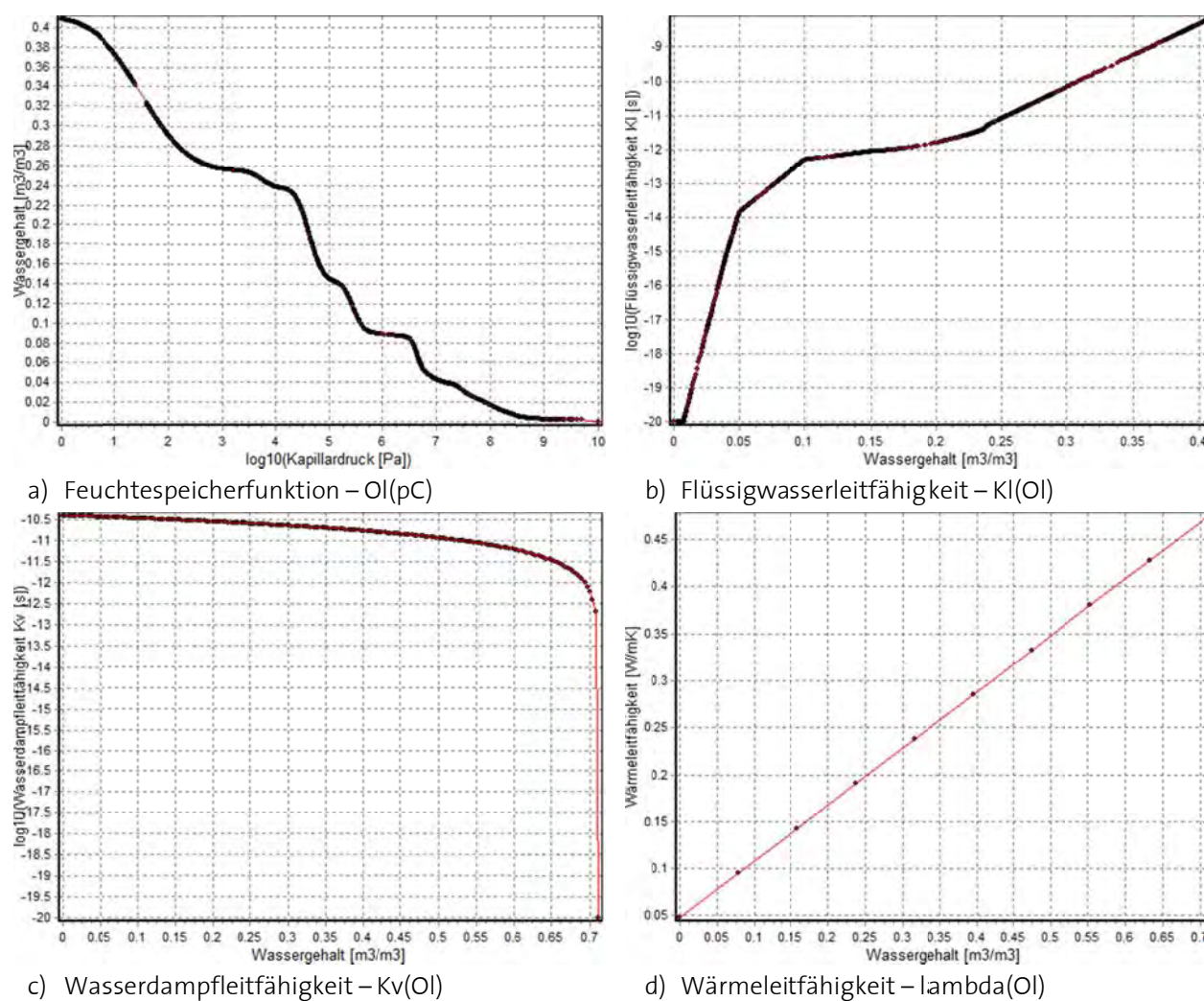


Abb. 36: Materialfunktionen der Holzweichfaserplatte (240 kg/m³).

Holzweichfaserplatte (155 kg/m³)

Materialeigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	155	kg/m ³	Trockenrohichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	1400	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.042	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.96	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.2637	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.00751224	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	5	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	4.09956E-09	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.155	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 7: Materialeigenschaften und Materialparameter der Holzweichfaserplatte (150 kg/m³).

Materialfunktionen:

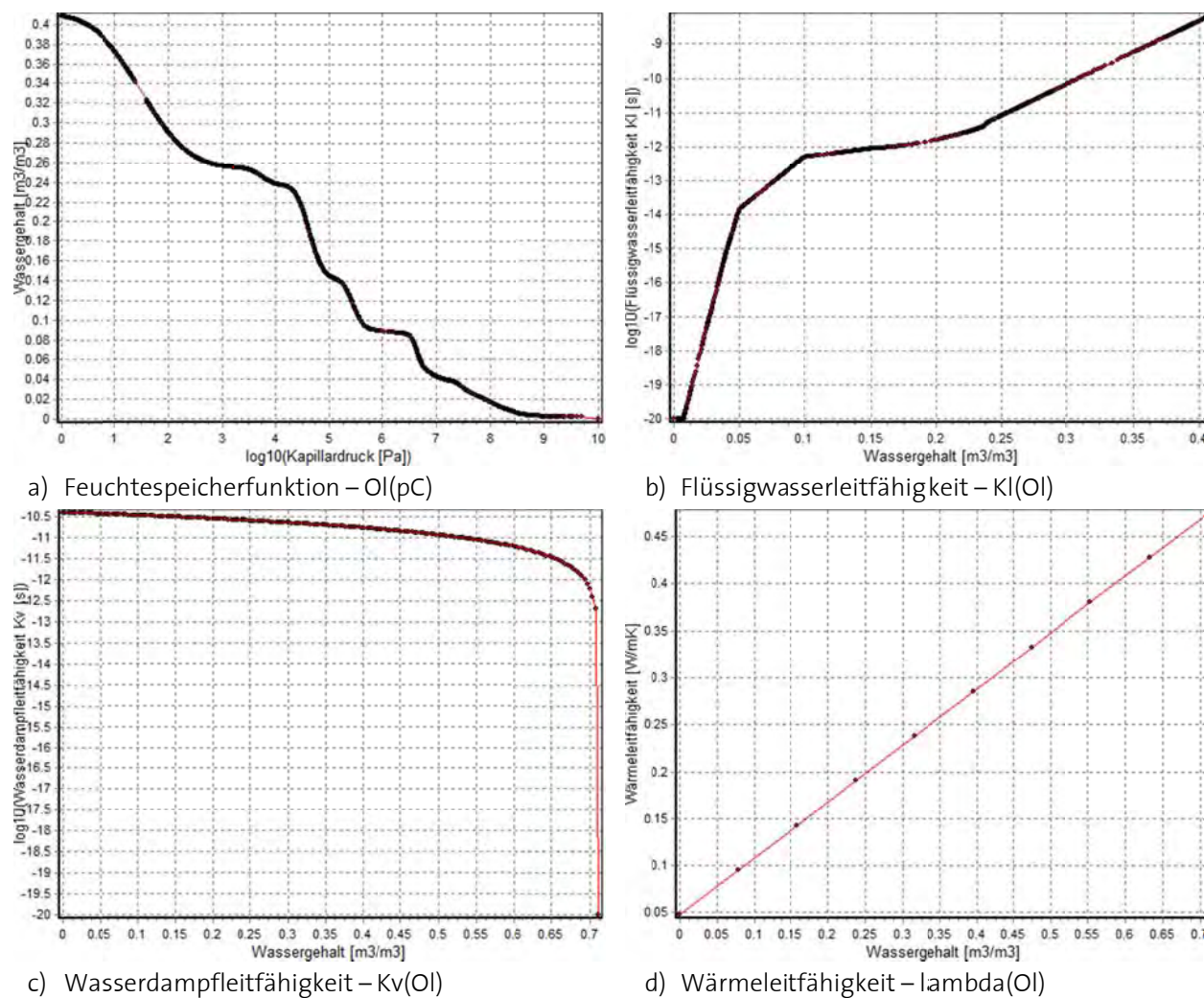


Abb. 37: Materialfunktionen der Holzweichfaserplatte (155 kg/m³).

Mineralische Klebschicht

Materialeigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	833.303	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	853.029	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.154875	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.685546	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.54	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.0030918	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	13.0744	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	1.44395E-09	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.536	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 8: Materialeigenschaften und Materialparameter der mineralischen Klebschicht.

Materialfunktionen:

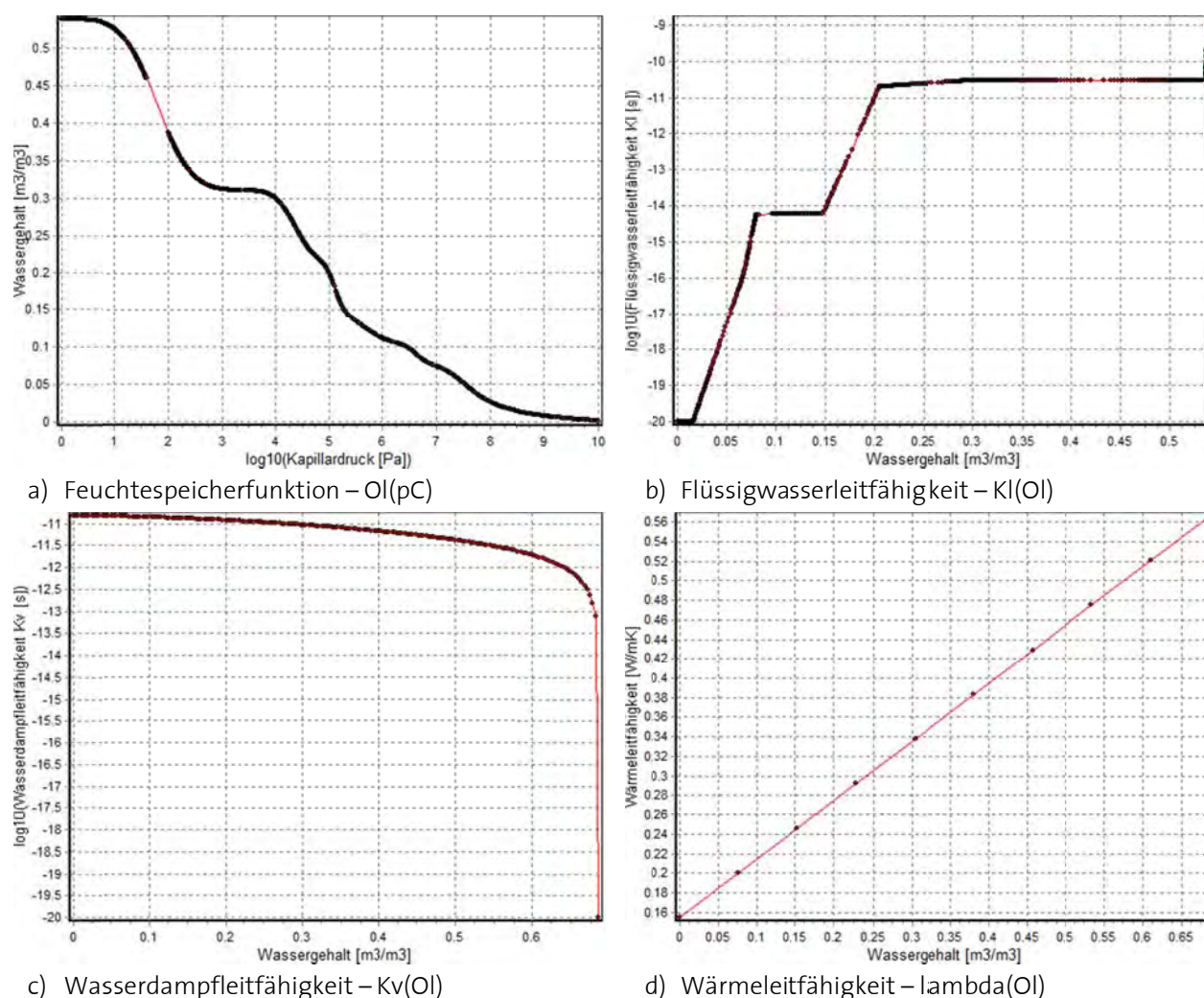


Abb. 38: Materialfunktionen der mineralischen Klebschicht.

Aussenputz

Materialeigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	1365.29	kg/m ³	Trockenrohichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	907.816	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.400083	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.484795	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.29057	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.0678888	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	13.787	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	5.271E-10	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.2329	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 9: Materialeigenschaften und Materialparameter des Aussenputzes.

Materialfunktionen:

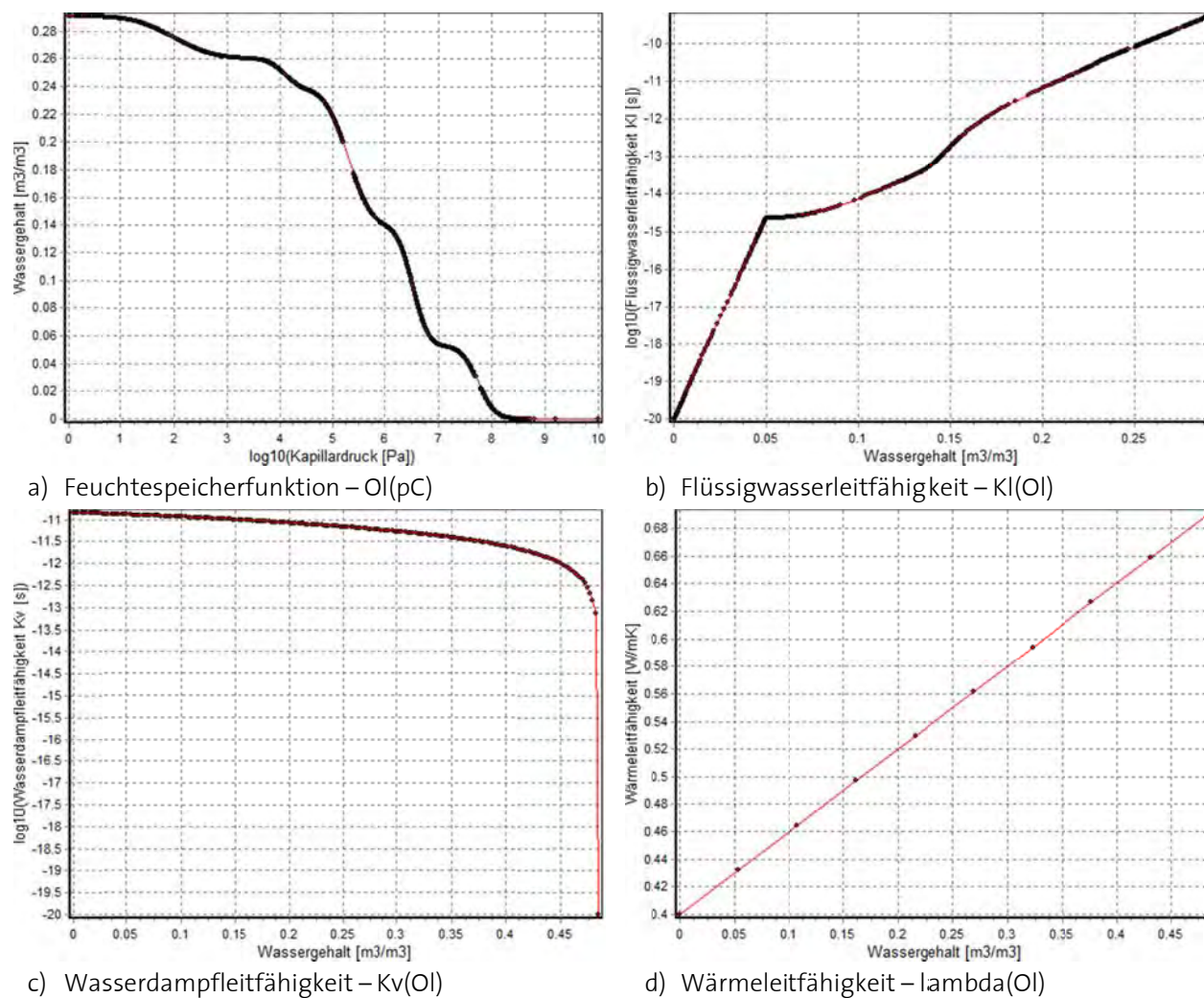


Abb. 39: Materialfunktionen des Aussenputzes.

Innenputz

Materialigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	1324.73	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	733.703	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.3214	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.500103	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.298685	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.0549146	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	12.5135	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	2.11504E-10	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.2265	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 10: Materialeigenschaften und Materialparameter des Innenputzes.

Materialfunktionen:

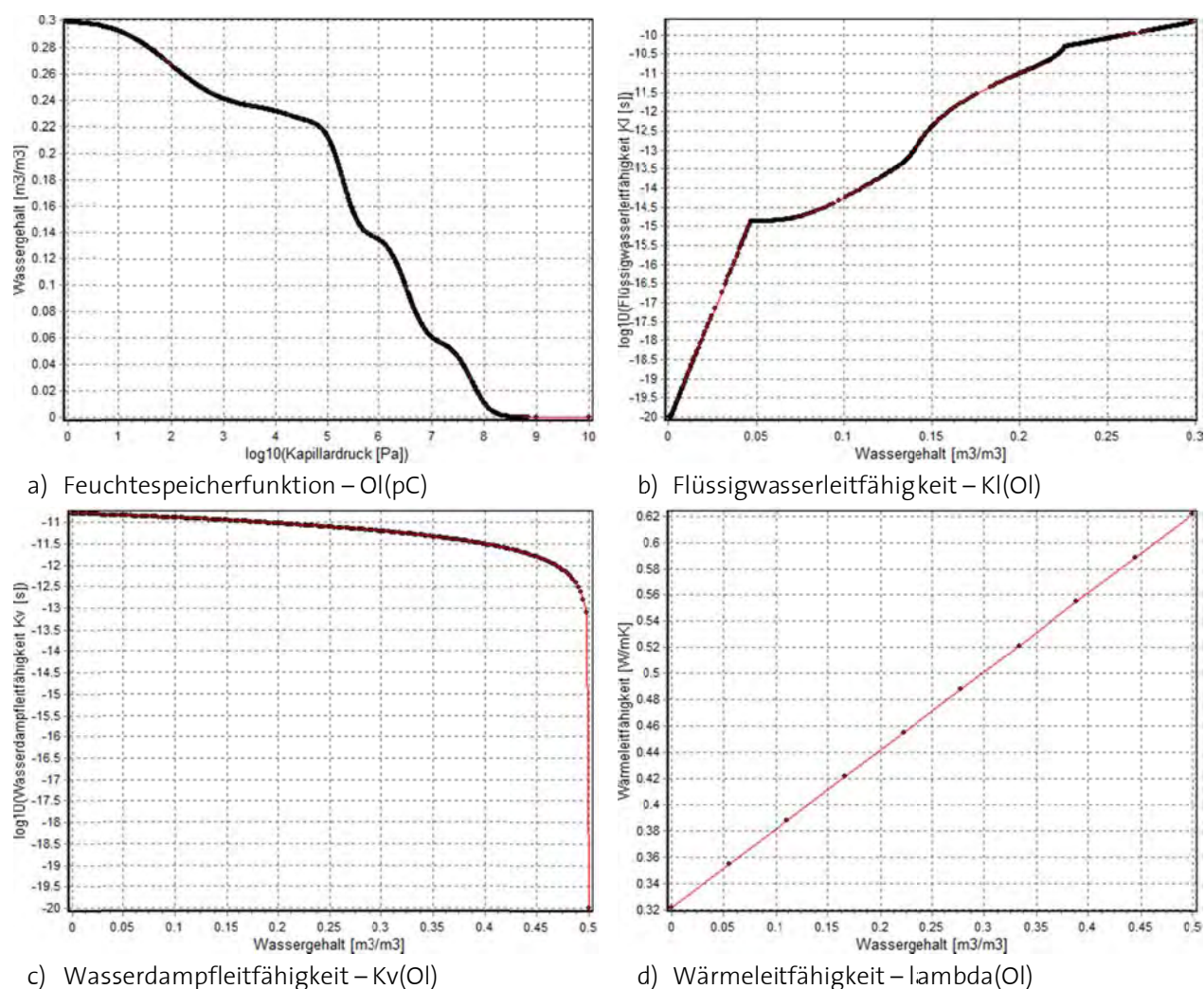


Abb. 40: Materialfunktionen des Innenputzes.

Gipskarton

Materialeigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	732.022	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	1383.88	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.211333	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.724804	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.449824	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.129897	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	6.84688	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	9.00062E-10	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.39	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 11: Materialeigenschaften und Materialparameter von Gipskarton.

Materialfunktionen:

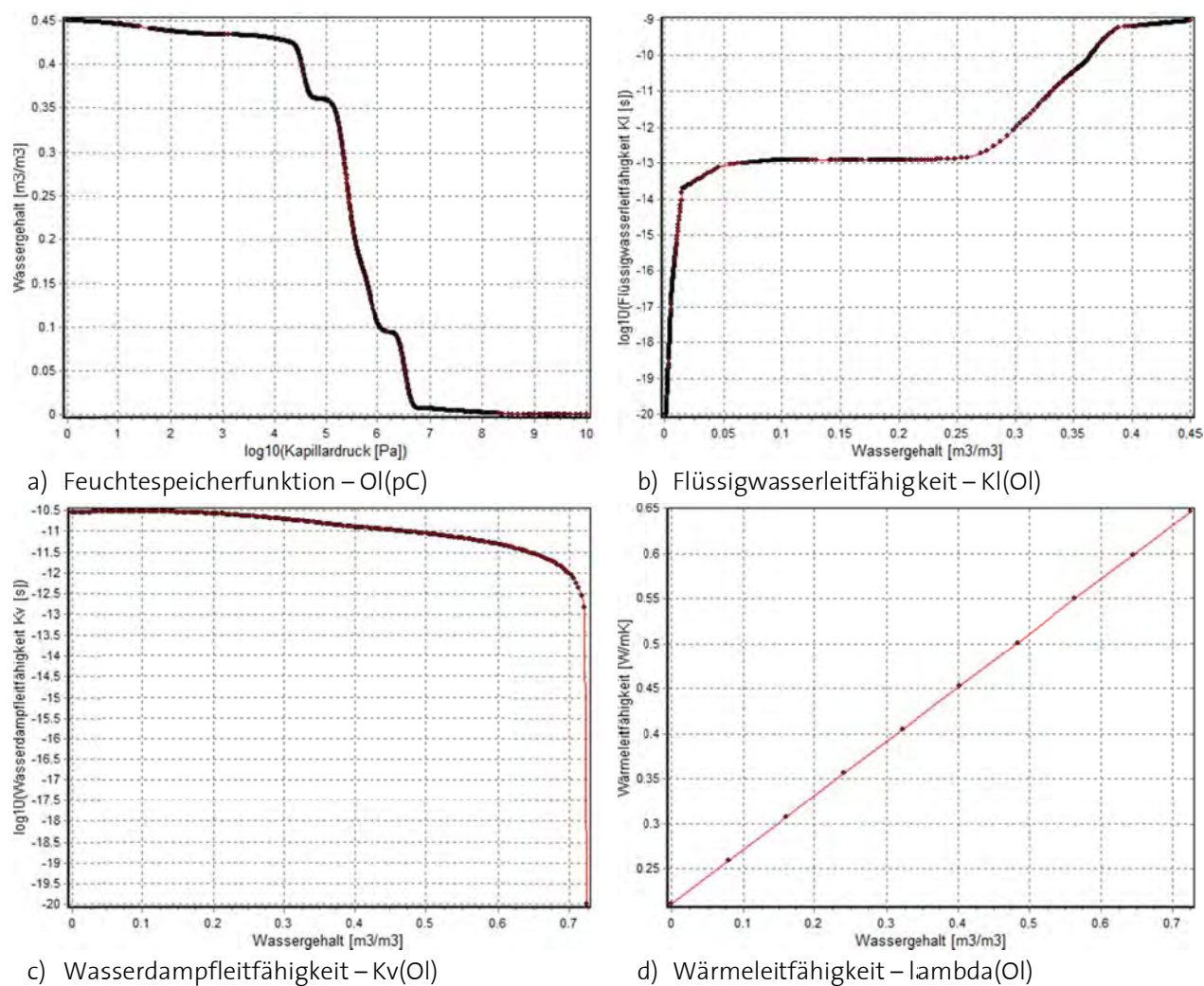


Abb. 41: Materialfunktionen von Gipskarton.

Wolle/Baumwolle

Materialeigenschaften:

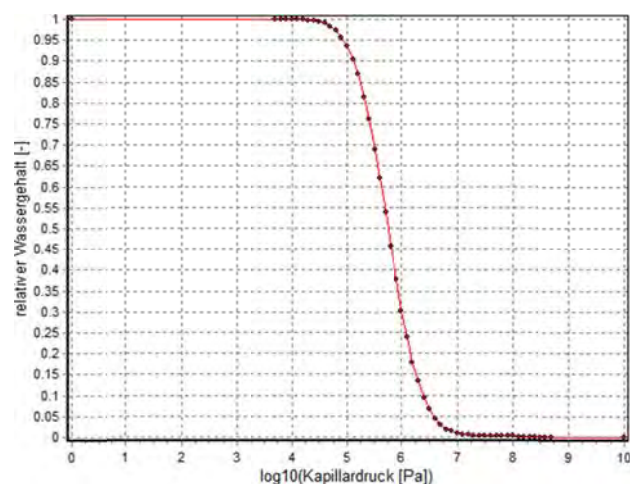
diffusionsoffen, nicht flüssigwasserleitend

Materialparameter:

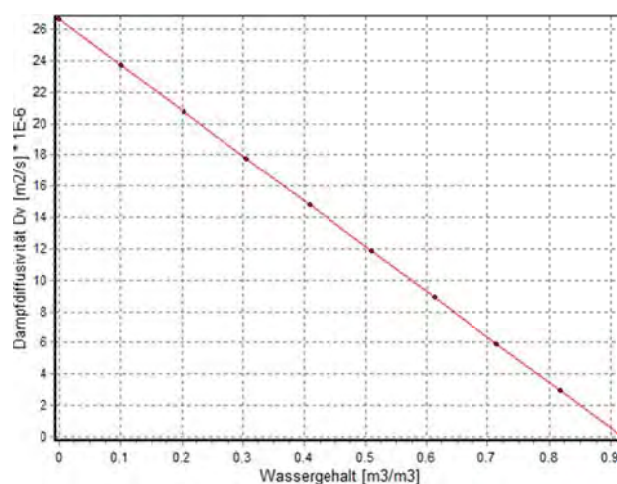
Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	35	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	840	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.04	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.92	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.9	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
MEW	1	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
OCAP	0.9	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung
O8o	0.00307421	m ³ /m ³	Hygroskopische Feuchte bei RH=80%

Tab. 12: Materialeigenschaften und Materialparameter von Wolle/Baumwolle.

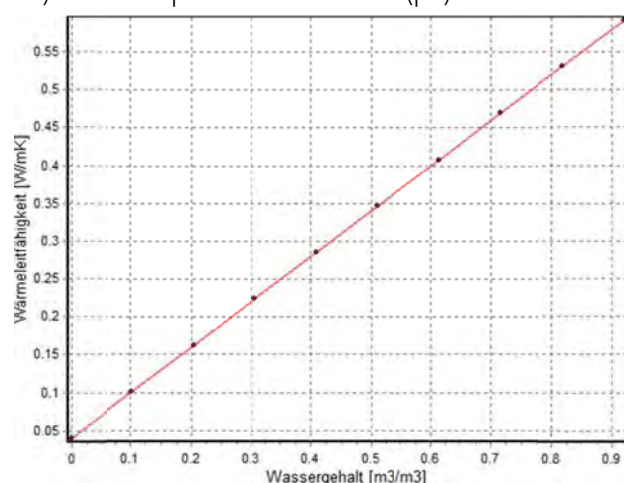
Materialfunktionen:



a) Feuchtespeicherfunktion – Ol(pC)



b) Dampfdiffusivität – Dv(ol)



c) Wärmeleitfähigkeit – lambda(ol)

Abb. 42: Materialfunktionen von Wolle/Baumwolle.

Steinwolle

Materialigenschaften:

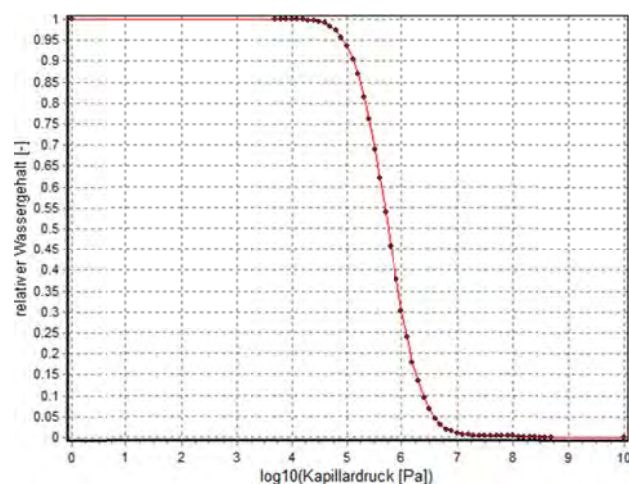
diffusionsoffen, nicht flüssigwasserleitend

Materialparameter:

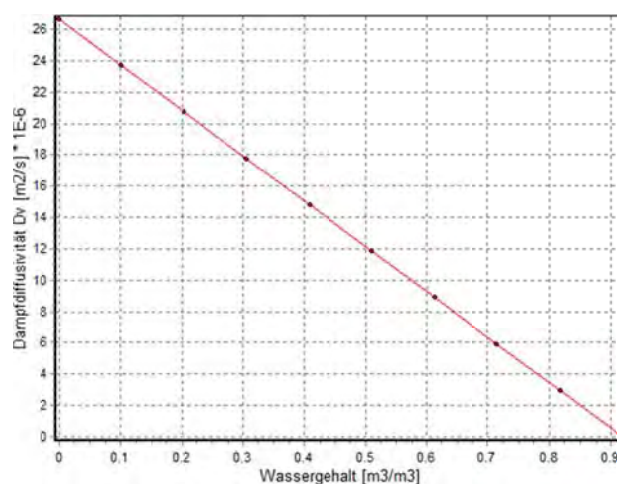
Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	30	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	840	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.035	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.92	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.9	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
MEW	1	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
OCAP	0.9	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung
O8o	0.00307421	m ³ /m ³	Hygroskopische Feuchte bei RH=80%

Tab. 13: Materialeigenschaften und Materialparameter von Steinwolle.

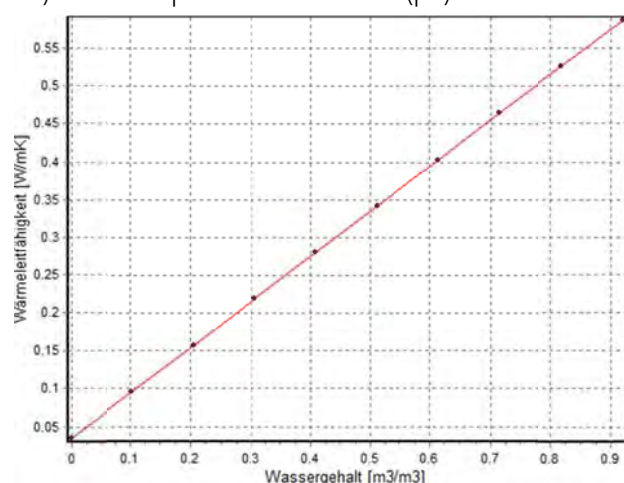
Materialfunktionen:



a) Feuchtespeicherfunktion – Ol(pC)



b) Dampfdiffusivität – Dv(ol)



c) Wärmeleitfähigkeit – lambda(ol)

Abb. 43: Materialfunktionen von Steinwolle.

Zelluloseflocken

Materialigenschaften:

diffusionsoffen, flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	55.2162	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	2150	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.04	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
OPOR	0.926378	m ³ /m ³	Porosität
OEFF	0.78	m ³ /m ³	Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung
AW	0.562862	kg/(m ² ·s ^{0.5})	Wasseraufnahmekoeffizient
MEW	1.5	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
KLEFF	3.458E-06	s	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung
OCAP	0.2	m ³ /m ³	Kapillare Feuchtesättigung

Tab. 14: Materialeigenschaften und Materialparameter von Zelluloseflocken.

Materialfunktionen:

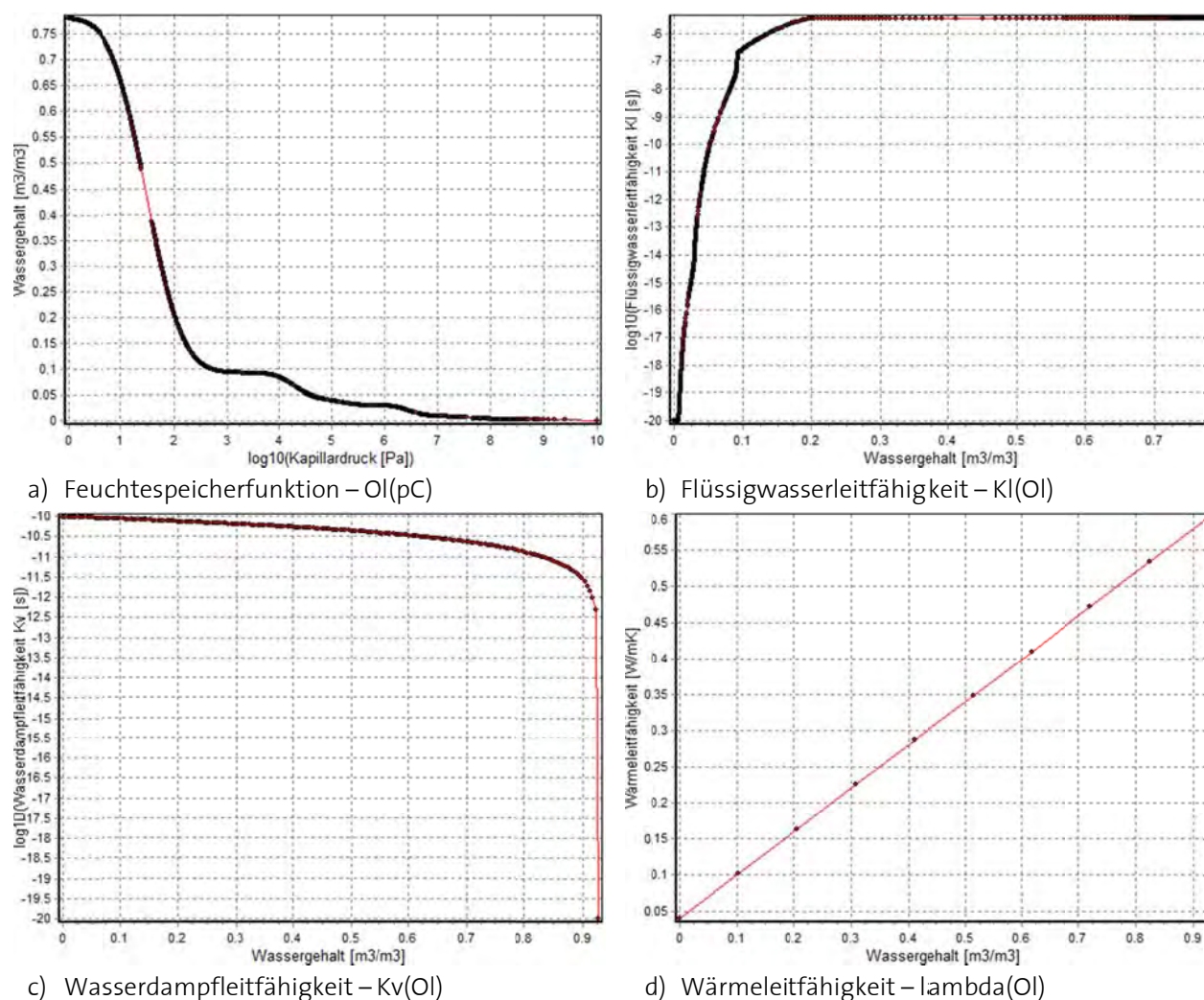


Abb. 44: Materialfunktionen von Zelluloseflocken.

Luft (Hohlraum 3 mm)

Materialeigenschaften:

Luft, diffusionsoffen, nicht flüssigwasserleitend

Materialparameter:

Index	Wert	Einheit	Beschreibung
RHO	1.29	kg/m ³	Trockenrohdichte des Materials (inklusive der Poren)
CE	1000	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
LAMBDA	0.03	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials
MEW	0.95	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor

Tab. 15: Materialeigenschaften und Materialparameter von Luft (Hohlraum 3 mm).

7.2 Ergebnisse der Berechnung

Die Ergebnisse aus den Berechnungen mittels der Software Delphin und der Vergleich mit den gemessenen Daten wurden für die gesamte Messzeit anhand von 12-stündigen Mittelwerten dargestellt. Dies machte die Diagramme übersichtlicher, jedoch muss man bedenken, dass die Schwankungen in den Verläufen aus diesem Grund reduziert sind. Um die Diagramme gut miteinander vergleichen zu können, wurde die Auflösung der Y-Achse ständig mit 5 °C bzw. 5 % angegeben.

7.2.1 Wärmetransport

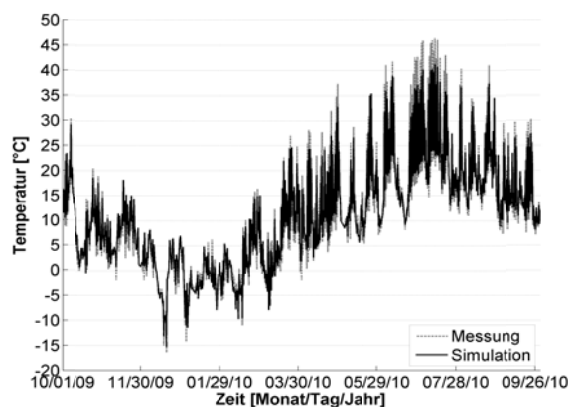
Die Simulationsergebnisse wurden jeweils für jede Konstruktion mit den Werten der Temperatursensoren (PT100) in der Wand sowie an den Oberflächen verglichen. Die gemessenen und simulierten Wärmeströme sind in den Abb. 45 - Abb. 49 dargestellt.

Bei der geschlitzten Holzkonstruktion stimmen die Simulationsergebnisse gut mit den gemessenen Daten überein (Abb. 45). Gewisse Unterschiede bei den Aussenoberflächentemperaturen sind bei den höchsten sommerlichen Temperaturen zu erkennen. Innerhalb der Konstruktion zeigen sich nur kleine Abweichungen der Simulation gegenüber der Messung. Die simulierte Innenoberflächentemperatur deckt sich sehr gut mit den gemessenen Werten. Bei der Berechnung des Wärmestroms an der Innenseite zeigen sich ebenso nur geringe Unterschiede im Wärmegewinn während des Sommers. Bei den Wärmeverlusten während des Winters zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Simulation mit der Messung.

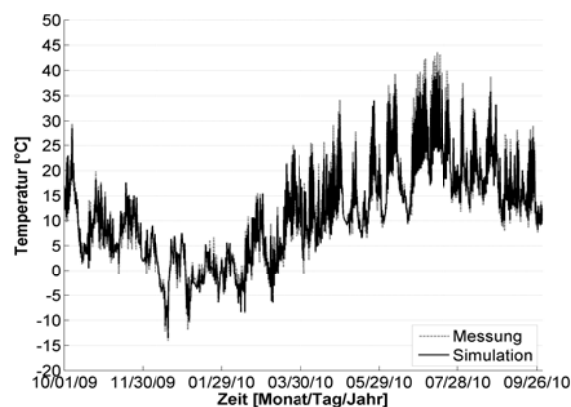
Die gemessenen Temperaturen in der Massivholzkonstruktion sind von den unerwarteten Wärmeverlusten (siehe Kapitel 6.1.) im Winter beeinflusst (Abb. 46). Dies konnte mit der Simulation nicht nachvollzogen werden und die Unterschiede sind deutlich erkennbar. Dies zeigt sich hauptsächlich innerhalb des Aufbaus (Grenzschicht 1) und bei der Berechnung des Wärmestroms während des Winters. Im Sommer stimmen die gemessenen Temperaturen auch innerhalb der Konstruktion gut mit den berechneten Temperaturen überein, jedoch sind beim Wärmestrom leichte Unterschiede erkennbar.

Bei der Dämmsteinkonstruktion sind die berechneten Temperaturen hauptsächlich während des Winters oft höher als die gemessenen Werte (Abb. 47 b, d, e, f). Eine gute Übereinstimmung zeigt sich nur bei den Temperaturen in der Grenzschicht 3 (Abb. 47 c). Dies zeigt sich auch bei der Berechnung des Wärmestroms, wo die Wärmeverluste zu hoch berechnet wurden und damit einen erhöhten Wärmetransport nach aussen darstellen. Andererseits zeigt dies, dass die eingesetzten Wärmeleitfähigkeitswerte zu hoch sind und die Dämmung der gesamten Dämmsteinkonstruktion in Wirklichkeit (Messung) kleinere Wärmeverluste aufweist. Demgegenüber ist die Übereinstimmung im Sommer bei diesem Aufbau sehr hoch.

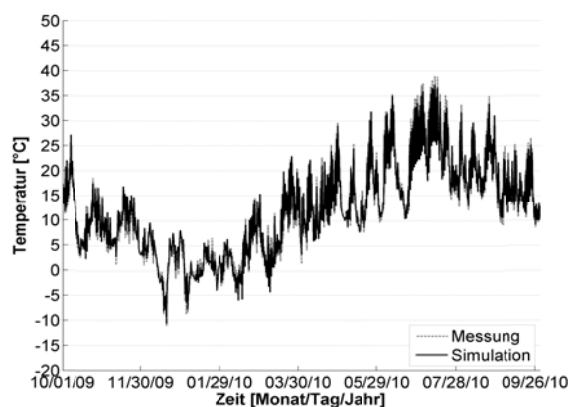
Die berechneten Temperaturen bei der Holzplattenkonstruktion zeigen bis zu einer Tiefe von 122 mm (Grenzschicht 2) eine gute Übereinstimmung während des Winters (Abb. 48). In der Grenzschicht 1 und an der Innenoberfläche sind die berechneten Temperaturen etwas zu hoch. Im Sommer zeigen sich nur leichte Unterschiede bei den Temperaturen an der äusseren Seite der Konstruktion. Der Verlauf des Wärmestroms stimmt bei dieser Konstruktion sehr gut mit den berechneten Daten überein und weist nur im Sommer gewisse Unterschiede bei den höchsten Temperaturen auf, wobei der Wärmegewinn zu tief berechnet wurde.



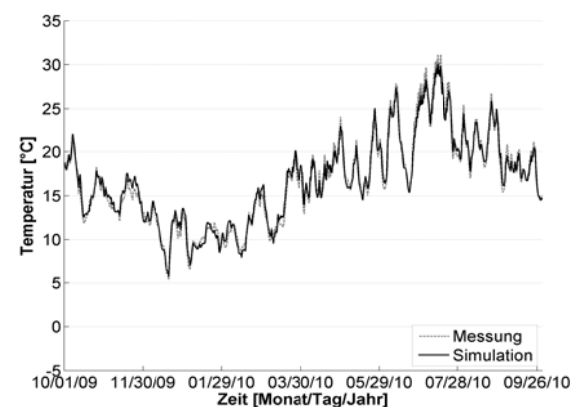
a) Aussenoberfläche



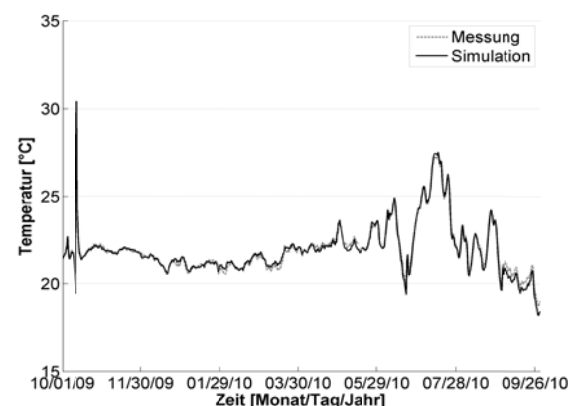
b) Grenzschicht 3 (Tiefe ca. 20 mm)



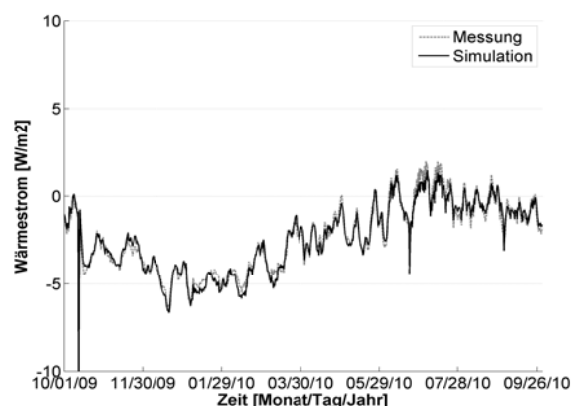
c) Grenzschicht 2 (Tiefe ca. 47 mm)



d) Grenzschicht 1 (Tiefe ca. 170 mm)

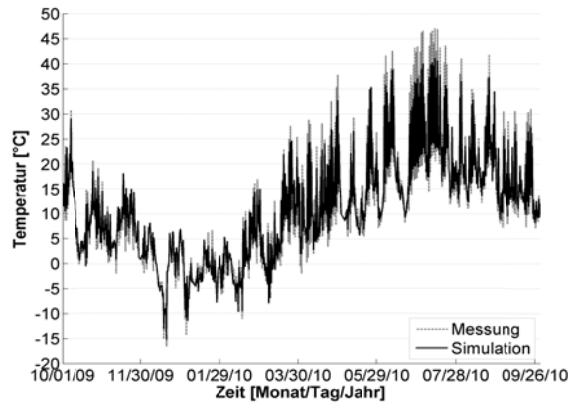


e) Innenoberfläche

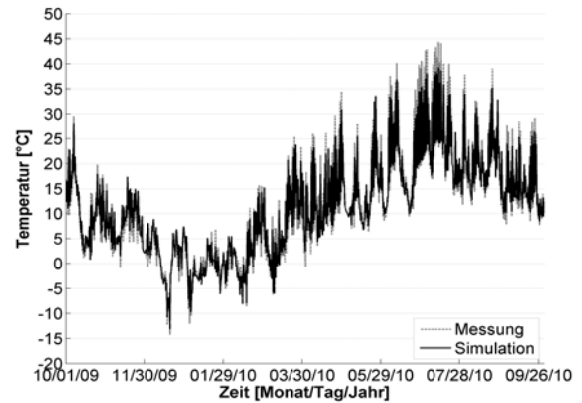


f) Wärmestromdichte an der Innenoberfläche

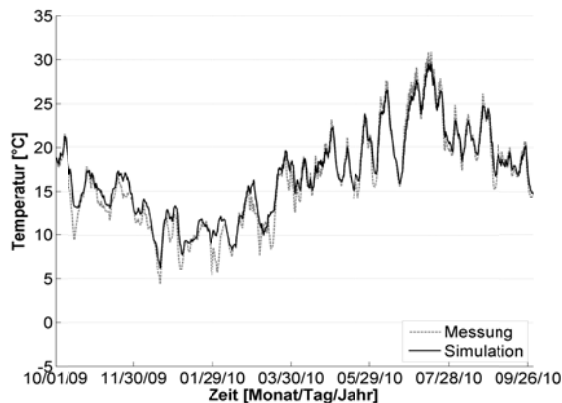
Abb. 45: Vergleich der gemessenen Temperaturen und der Wärmestromdichte mit den Simulationsergebnissen (Delphin) bei der geschlitzten Holzkonstruktion – Mittelwerte von 12 Stunden.



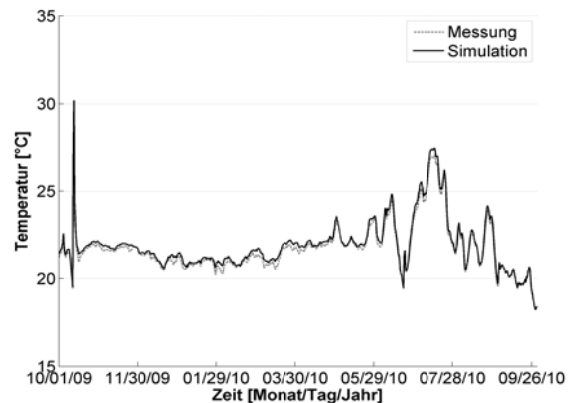
a) Aussenoberfläche



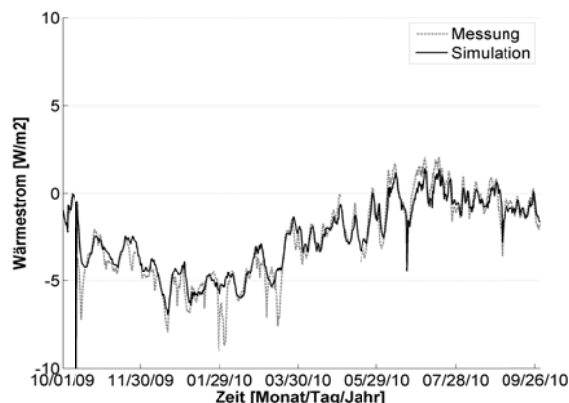
b) Grenzschicht 2 (Tiefe ca. 20 mm)



c) Grenzschicht 1 (Tiefe ca. 200 mm)



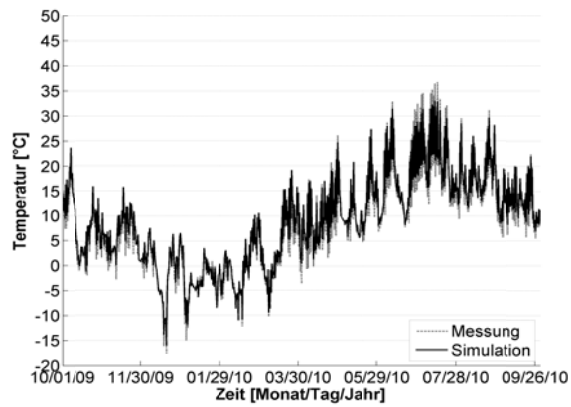
d) Innenoberfläche



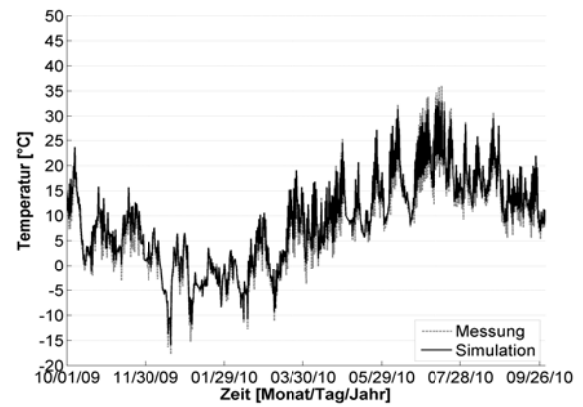
e) Wärmestromdichte an der Innenoberfläche

Abb. 46: Vergleich der gemessenen Temperaturen und der Wärmestromdichte mit den Simulationsergebnissen (Delphin) bei der Massivholzkonstruktion – Mittelwerte von 12 Stunden.

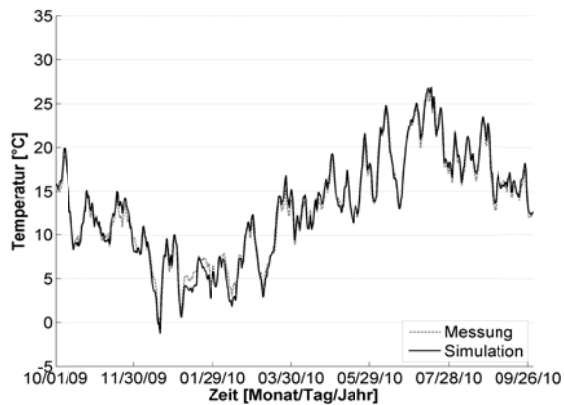
Bei der Brettstapelkonstruktion stimmen die berechneten Ergebnisse gut mit den gemessenen Werten überein (Abb. 49). Leichte Unterschiede sind bei den äusseren Temperaturen der Konstruktion und beim Wärmestrom während des Sommers zu sehen. Im Winter wurden etwas höhere Werte an der Innenseite der Konstruktion gegenüber den Messdaten berechnet.



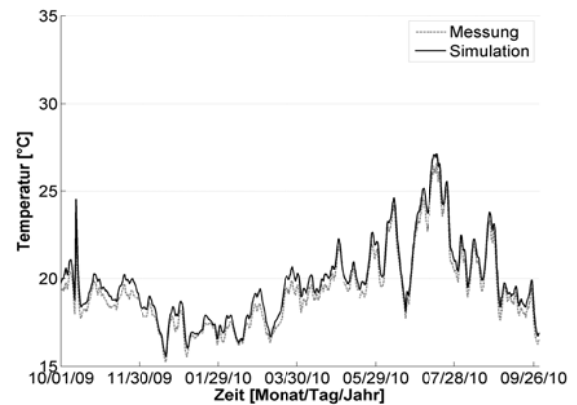
a) Aussenoberfläche



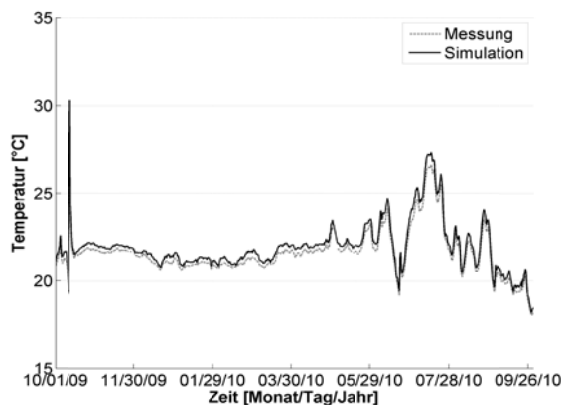
b) Grenzschicht 5 (Tiefe ca. 8 mm)



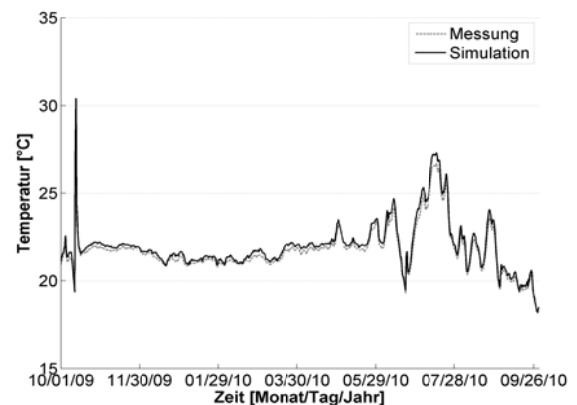
c) Grenzschicht 3 (Tiefe ca. 144 mm)



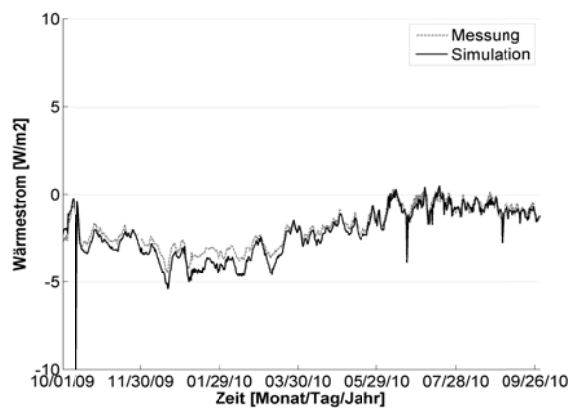
d) Grenzschicht 2 (Tiefe ca. 316 mm)



e) Grenzschicht 1 (Tiefe ca. 376 mm)

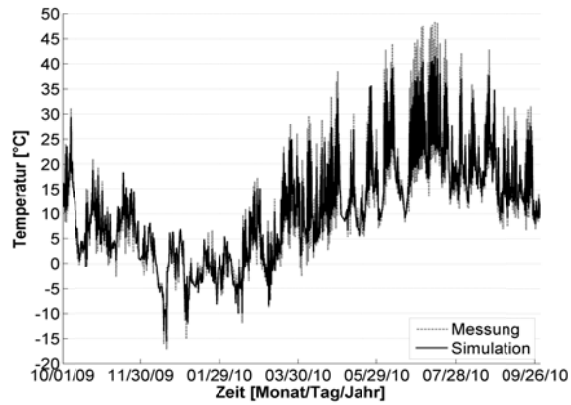


f) Innenoberfläche

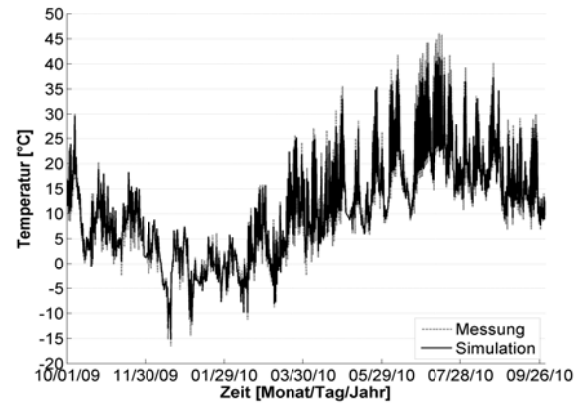


g) Wärmestromdichte an der Innenoberfläche

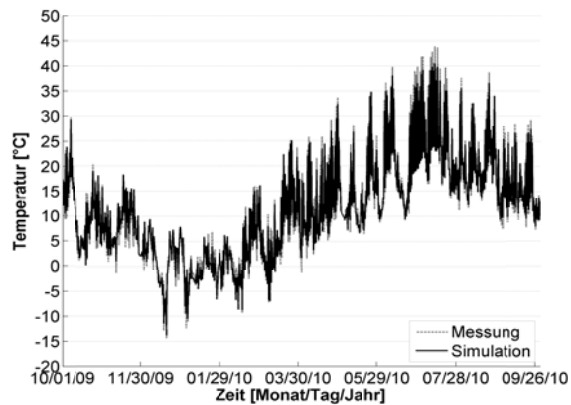
Abb. 47: Vergleich der gemessenen Temperaturen und der Wärmestromdichte mit den Simulationsergebnissen (Delphin) bei der Dämmsteinkonstruktion – Mittelwerte von 12 Stunden.



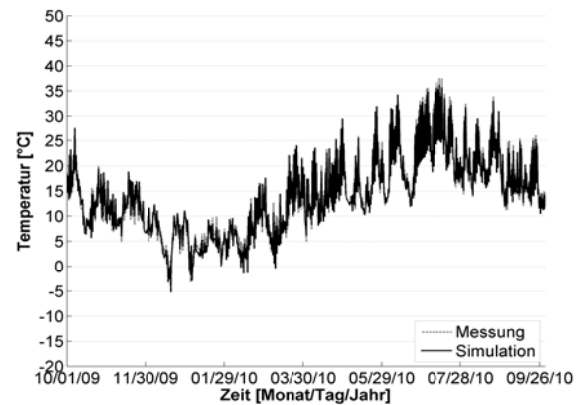
a) Aussenoberfläche



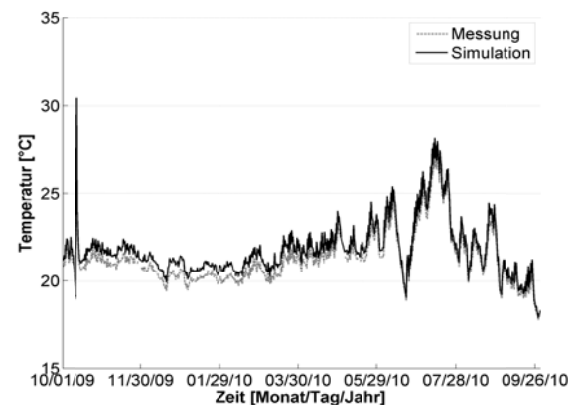
b) Grenzschicht 4 (Tiefe ca. 20 mm)



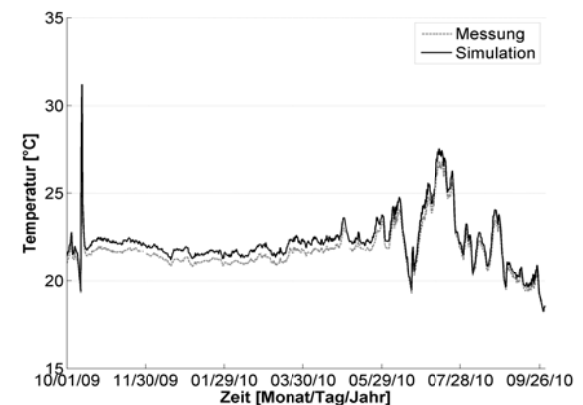
c) Grenzschicht 3 (Tiefe ca. 42 mm)



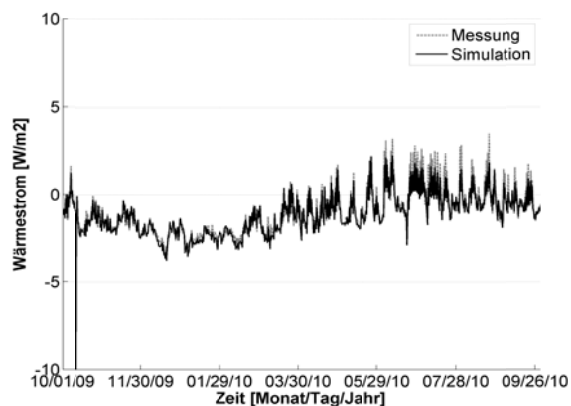
d) Grenzschicht 2 (Tiefe ca. 122 mm)



e) Grenzschicht 1 (Tiefe ca. 362 mm)

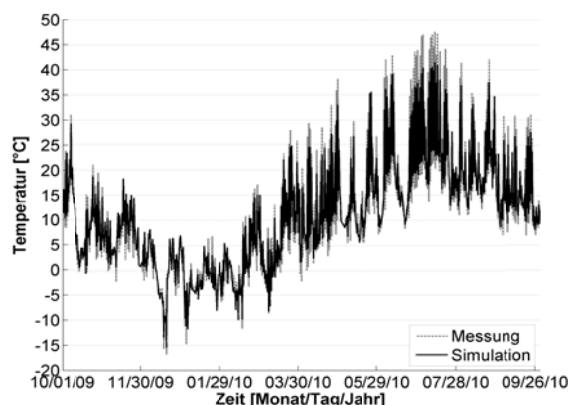


f) Innenoberfläche

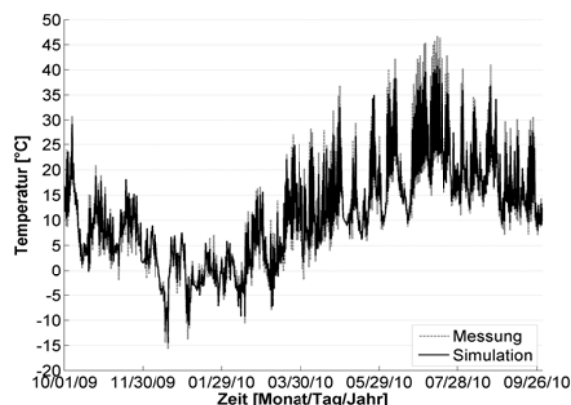


g) Wärmestromdichte an der Innenoberfläche

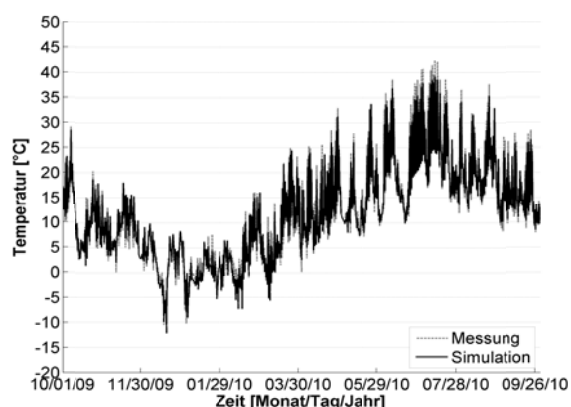
Abb. 48: Vergleich der gemessenen Temperaturen und der Wärmestromdichte mit den Simulationsergebnissen (Delphin) bei der Holzplattenkonstruktion – Mittelwerte von 12 Stunden.



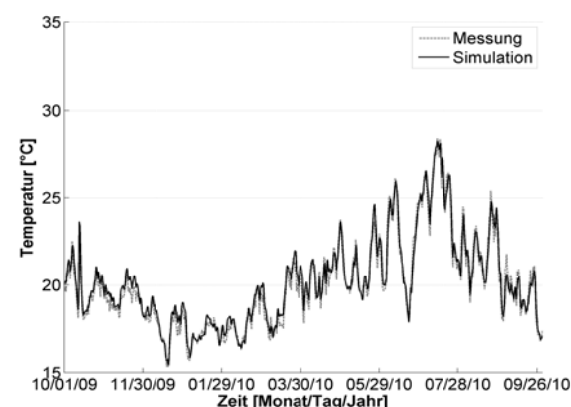
a) Aussenoberfläche



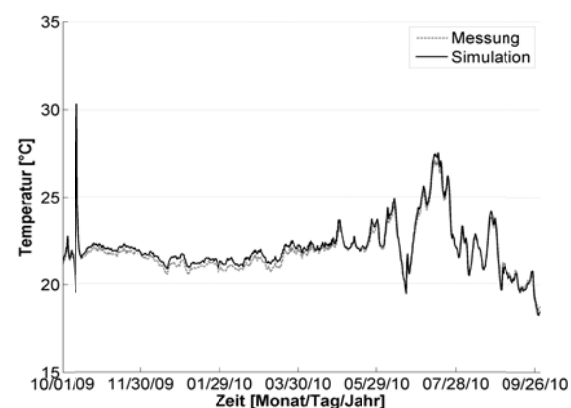
b) Grenzschicht 3 (Tiefe ca. 20 mm)



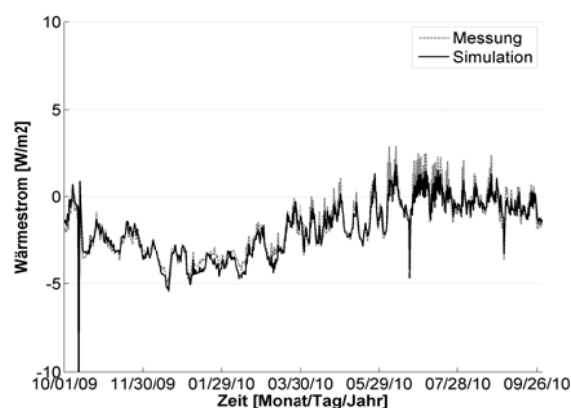
c) Grenzschicht 2 (Tiefe ca. 42 mm)



d) Grenzschicht 1 (Tiefe ca. 242 mm)



e) Innenoberfläche



f) Wärmestromdichte an der Innenoberfläche

Abb. 49: Vergleich der gemessenen Temperaturen und der Wärmestromdichte mit den Simulationsergebnissen (Delphin) bei der Brettstapelkonstruktion – Mittelwerte von 12 Stunden.

7.2.2 Feuchtetransport

In Abb. 50 werden die berechneten rel. Luftfeuchten innerhalb der Konstruktionen mit den gemessenen Daten verglichen. Die berechneten rel. Luftfeuchten in den Vollholzkonstruktionen ergeben den richtigen Trend im Winter sowie im Sommer, jedoch weisen sie einen zu stabilen Verlauf mit sehr geringen Schwankungen auf und unterscheiden sich bei der geschlitzten Holzkonstruktion bis zu 5 % und bei der Massivholkonstruktion bis zu 8 % von den maximal und minimal gemessenen Werten (Abb. 50 a, b).

Bei der Dämmsteinkonstruktion konnte ebenso der Trend simuliert werden. Unterschiede gegenüber den gemessenen Werten zeigen sich hauptsächlich in der Grenzschicht 3 und

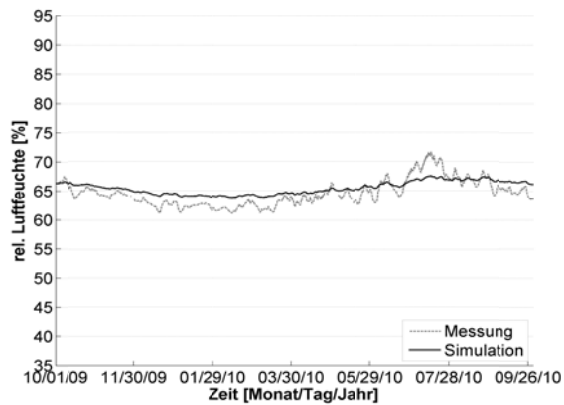
in der Klebschicht im Winter, wobei die berechneten Werte 5 bis 9 % tiefer als die gemessenen Werte liegen (Abb. 50 d, e). In der Grenzschicht⁴ sind die Luftfeuchteschwankungen bei der Berechnung deutlich reduziert (Abb. 50 c).

Die rel. Luftfeuchte in der Holzplattenkonstruktion weist eine deutlich schnellere Erhöhung in der Simulation als bei der Messung auf (Abb. 50 f). Da die gemessenen Werte sehr starke Schwankungen aufweisen, ist eine genaue Aussage der Abweichung schwierig. Jedoch kann man sehen, dass sich die gemessenen Werte gegenüber dem Haupttrend der Simulation in den Monaten März und April 2010 bis zu 15 % unterscheiden. Die Sommerperiode wird demgegenüber sehr gut wiedergegeben. Die hohen Luftfeuchteschwankungen bei den Messdaten konnten allerdings auch hier mit der Simulation nicht berechnet werden.

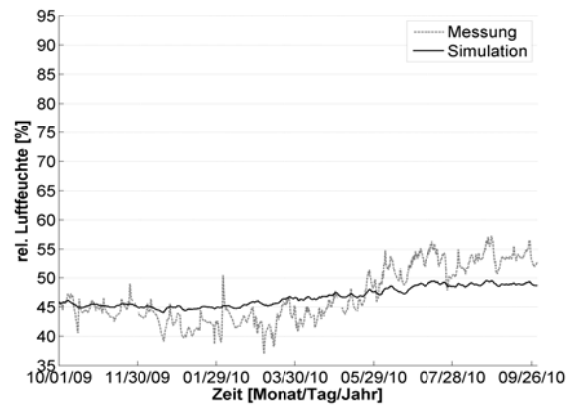
Eine relativ gute Übereinstimmung der simulierten mit den gemessenen Daten ergibt sich für die rel. Luftfeuchte innerhalb der Brettstapelkonstruktion (Abb. 50 g). Trotzdem zeigen sich Unterschiede sowohl in den Wintermonaten, wo die berechneten Werte zu hoch liegen, als auch in den Sommermonaten, wo die Werte im Gegenteil zu tief berechnet wurden. Jedoch konnten bei dieser Konstruktion die Luftfeuchteschwankungen gut simuliert werden.

7.2.3 Holzfeuchte

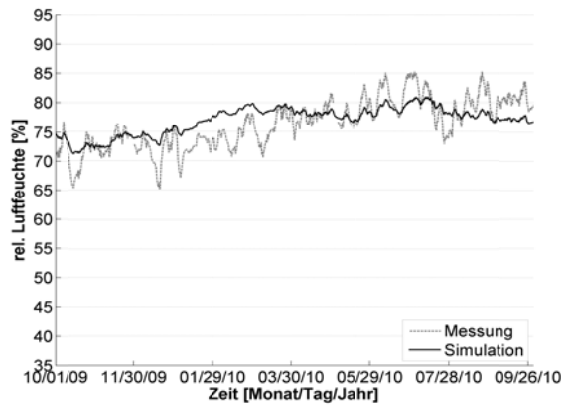
Mittels der Simulation wurde ferner der Wassergehalt des Materials berechnet, jedoch nur für die Positionen, an welchen Holzfeuchte-Sensoren eingesetzt worden waren. Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Holzfeuchten ist in Abb. 51 für die Dämmsteinkonstruktion und in Abb. 52 für die Holzplattenkonstruktion dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Berechnung deutlich höhere Werte aufweist. Beim Ständer der Holzplattenkonstruktion sind die Werte am Anfang der Messung bis zu 8 % zu hoch, was eine relativ hohe Abweichung darstellt. Am Ende der Messung liegt die Berechnung näher an den gemessenen Werten und folgt dem Trend der Anfeuchtung. Zuverlässig wurden die Werte bei der Massivholzplatte, die sich an der Aussenseite der Dämmsteinkonstruktion befindet, berechnet. Hier besteht nur eine Abweichung von ca. 2 % und die mit dem Ersatzsensor gemessenen Werte liegen noch näher (siehe Kapitel 6.4). Eine Abweichung von 2 % entspricht etwa der Messfehler-Toleranz des Holzfeuchtesensors. Eine Auswertung der Holzfeuchte der Massivholzplatte an der Innenseite macht keinen Sinn, da hier der Sensor zu viele Ausfälle aufgewiesen hat. Die Messdaten waren deshalb zu wenig aussagekräftig.



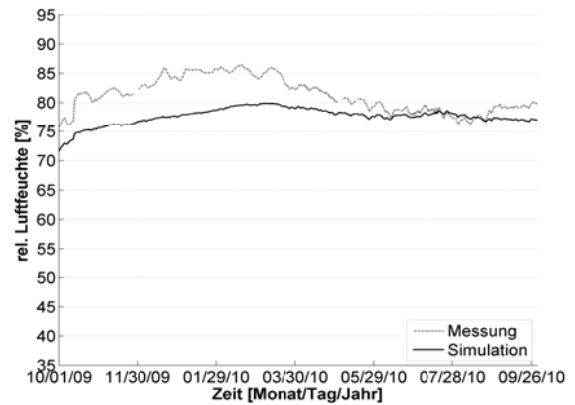
a) Geschlitzte Holzkonstruktion – Grenzschrift 1



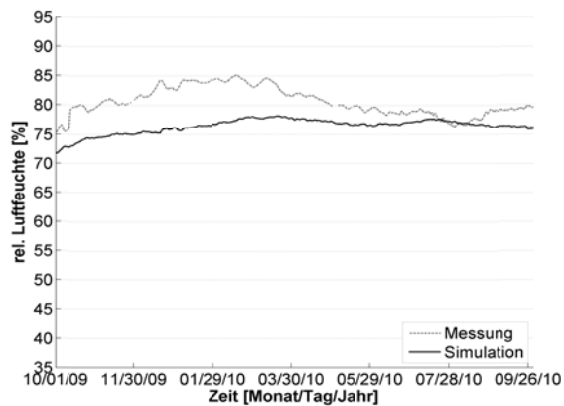
b) Massivholzkonstruktion – Grenzschrift 1



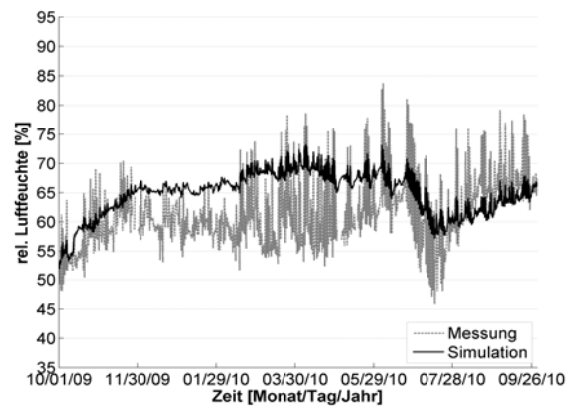
c) Dämmsteinkonstruktion - Grenzschrift 4



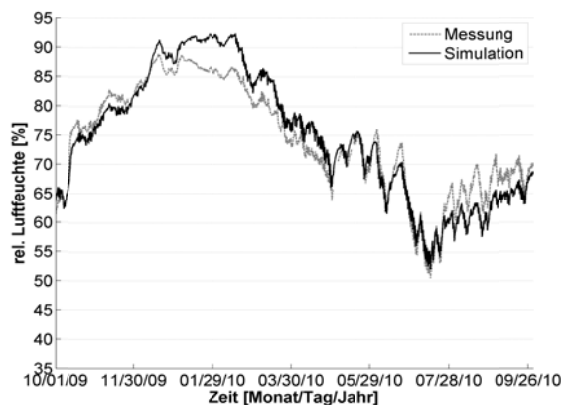
d) Dämmsteinkonstruktion - Grenzschrift 3



e) Dämmsteinkonstruktion – in der Klebschicht

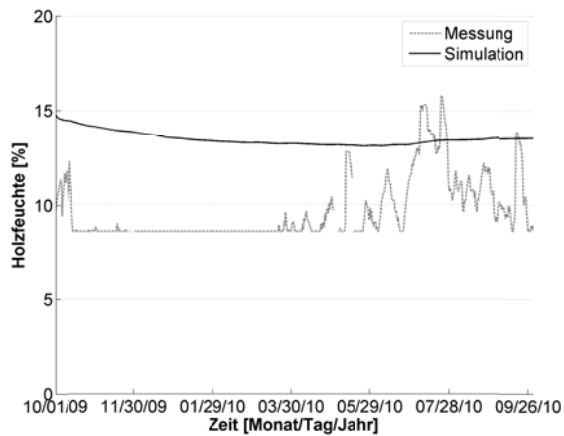


f) Holzplattenkonstruktion – Grenzschrift 2

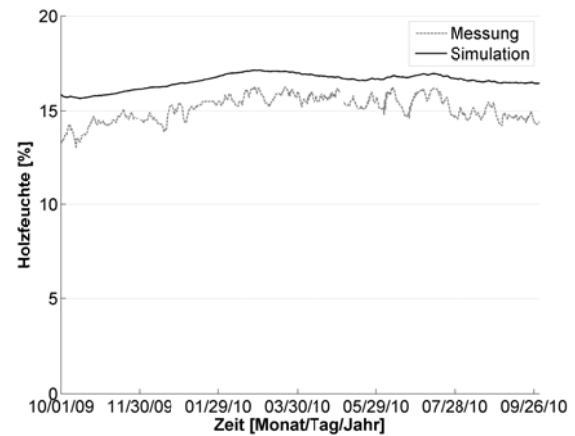


g) Brettstapelkonstruktion – Grenzschrift 2

Abb. 50: Vergleich der gemessenen rel. Luftfeuchten innerhalb der Konstruktionen mit den Simulationsergebnissen (Delphin) – Mittelwerte von 12 Stunden.



a) In der Massivholzplatte an der Innenseite



b) In der Massivholzplatte an der Aussenseite

Abb. 51: Vergleich der gemessenen Holzfeuchten innerhalb der Dämmsteinkonstruktion mit den Simulationsergebnissen (Delphin) – Mittelwerte von 12 Stunden.

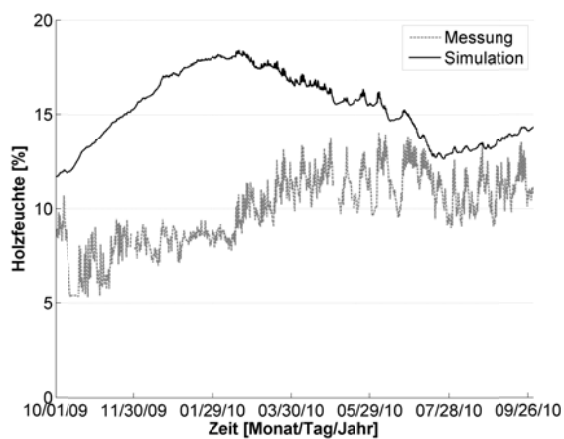


Abb. 52: Vergleich der gemessenen Holzfeuchten im Ständer der Holzplattenkonstruktion mit den Simulationsergebnissen (Delphin) – Mittelwerte von 12 Stunden.

8 Diskussion und Zusammenfassung

Im vorherigen Kapitel wurden die Ergebnisse aus den Messungen an den fünf Holzbauelementen, die in einem Testgebäude des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik in Holzkirchen der freien Bewitterung ausgesetzt waren, präsentiert. Während eines Jahres wurden verschiedene Parameter zum Feuchte- und Wärmeverhalten an diesen Wandaufbauten, welche nach Westen ausgerichtet waren, erfasst und ausgewertet. Im Weiteren wurde eine Validierungsberechnung unter Einbezug der gemessenen Randbedingungen und unter Verwendung von Standard- und gemessenen Kennwerten der einzelnen, eingesetzten Materialien, mittels zweier bauphysikalischer Programme, Delphin und WUFI, durchgeführt.

Über die Temperaturverteilung innerhalb der Konstruktion kann gesagt werden, dass diese auf der einen Seite von den eingesetzten Materialien, ihren Eigenschaften (Lambda-Wert, spezifische Wärmekapazität und Rohdichte) und Abmessungen beeinflusst ist. Auf der anderen Seite spielt auch der Emissionsgrad der Aussenoberfläche (Holzfassade, Putz) eine grosse Rolle beim Wärmegewinn durch Sonnenstrahlung.

Alle gemessenen Innenoberflächentemperaturen lagen im Winter um ca. 1°C unterhalb der konstant gehaltenen Raumlufttemperatur. Zwischen den einzelnen Aufbauten konnten nur geringe Unterschiede der Innenoberflächentemperaturen gemessen werden (bis zu 0.4°C). Die wärmste Oberfläche hat die Holzplattenkonstruktion aufgewiesen. Dabei wurde bei dieser Konstruktion eine Schwankung der Innenoberflächentemperatur von bis zu 1.5°C während des Sommers gemessen. Mit dem Einsatz von Massivholz (Brettstapel) konnten diese Schwankungen bei der Brettstapelkonstruktion reduziert werden.

Es wurde ebenso festgestellt, dass die Aussenoberflächentemperaturen im November 2009 (während der Nacht) sowie in den Sommermonaten 2010 (bei Tagesanbruch) unterhalb der Aussenlufttemperatur lagen, was, wie erwähnt, unter Umständen das Risiko einer Schimmelpilzbildung darstellen könnte. Eine Pilzwachstumswahrscheinlichkeit ist jedoch von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Diese sind in Abb. 53 nach Sedlbauer et al. [41] dargestellt. Obwohl die gemessenen Werte eine gewisse Wahrscheinlichkeit für eine Schimmelpilzbildung darstellen, konnten nach einem Jahr keine optischen Schäden an der Aussenoberfläche beobachtet werden (siehe Anhang).

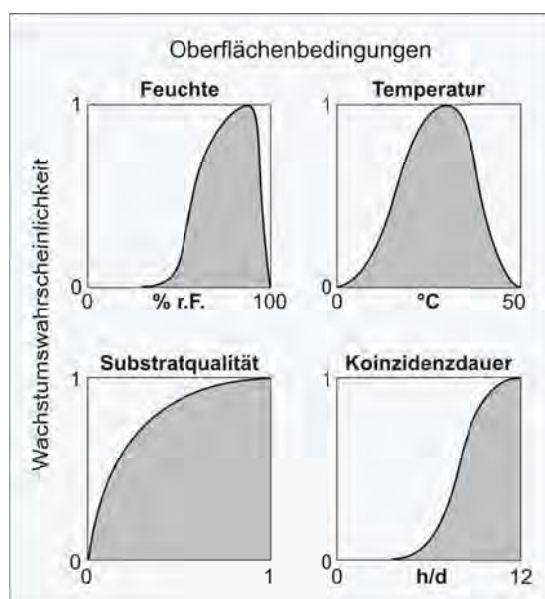


Abb. 53: Einflussfaktoren für Schimmelpilzbildung auf Bauteiloberflächen [41].

Anhand der gemessenen Wärmestromdichten an der Innenseite konnte ein Vergleich der stationär berechneten mit den instationär gemessenen U-Werten gemacht werden. Dieser hat gezeigt, dass die Werte gut übereinstimmen. Die stärkste Abweichung hat sich bei der Massivholzkonstruktion gezeigt, bei welcher für die Berechnung des stationären U-Wertes ein Norm-Wert für die Wärmeleitfähigkeit des Holzes von $0.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ verwendet wurde. Demgegenüber weisen die stationären U-Werte, die anhand der im Labor gemessenen Lambda-Werte für die gesamten Vollholzelemente berechnet wurden, mit den instationären U-Werten eine gute Übereinstimmung auf.

Die gemessenen Lambda-Werte des Vollholzes von ca. $0.093 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei einer Holzfeuchte von 12 % [42] wurden in die Simulation (Delphin) eingesetzt. Die Simulationsergebnisse haben eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten erbracht. Dies deutet darauf hin, dass die Wärmeleitfähigkeitswerte des Holzes in der Norm DIN EN ISO 10456 [8] von $0.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zu hoch angegeben sind und neu bewertet werden sollten.

Auf der anderen Seite konnte kein Einfluss der Wärmespeicherung des Massivholzes auf die Reduzierung der Wärmeverluste während des Winters festgestellt werden. Jedoch weisen die Konstruktionen mit höherer Wärmespeicherung geringere Schwankungen der Wärmestromdichten auf, wodurch ein gewisses Potenzial der Energieeinsparung bei der Klimaregulierungstechnik der Raumluft gegeben ist.

Bei beiden Leichtbaukonstruktionen und der Dämmsteinkonstruktion haben sich die Voraussetzungen für niedrigere Wärmeverluste bestätigt. Allerdings muss bei diesen Konstruktionen mit einem Zuschlag aufgrund der Wärmebrücken, die durch die Ständerkonstruktion bzw. die Klebschichten entstehen, gerechnet werden. Bei den Ständerkonstruktionen können die Wärmeverluste des gesamten Gebäudes dadurch bis zu 30 % erhöht sein [28]. Die Wärmebrücken sind ebenso auf den aufgenommenen Thermographiebildern deutlich erkennbar.

Während den Messungen wurden bei der Massivholzkonstruktion unerwartete, jähe Wärmeverluste in den Wintermonaten beobachtet. Ob das an dem falschen Aufsetzen des gesamten Wandelements oder an der Konstruktion selber liegt, ist schwer zu beurteilen. Eine Erklärung könnte die Schwindung des Holzes während des Winters und die Bildung von undichten Stellen zwischen den einzelnen Lagen und Brettern der Massivholzkonstruktion darstellen. Dies könnte einen konvektiven Wärmeverlust verursachen.

Die Verläufe der relativen Luftfeuchten in den einzelnen Konstruktionen zeigen, dass die Werte trotz einer nicht hinterlüfteten Holzfassade langfristig 80 % nicht überschritten haben. Demgegenüber weist die Dämmsteinkonstruktion auch während des Sommers eine steigende Anfeuchtung auf und erreicht Werte über 80 % bei Temperaturen zwischen 15-30 °C. Eventuell daraus entstandene Schäden sollten beim Abbau der Wandelemente näher beobachtet werden. Die gemessenen Holzfeuchten haben allerdings den kritischen Wert von 20 %, sowohl bei der Holzplattenkonstruktion, als auch bei der Dämmsteinkonstruktion, nicht überschritten.

Mittels zweier verschiedener Simulationsprogramme, Delphin und WUFI, konnten zuverlässige Übereinstimmungen des Wärmetransportes erreicht werden. Jedoch mussten einige Materialkennwerte in beiden Programmen angepasst werden. Bei der Simulation in Delphin wurden meistens die Kennwerte der eigenen Messungen eingesetzt. Diese haben bei den Dämmmaterialien (Steinwolle, Zelluloseflocken und Holzweichfaserplatten) höhere Lambda-Werte gegenüber den Herstellerangaben aufgewiesen. Mit den von den Herstellern eingesetzten Wärmeleitfähigkeitswerten konnte eine bessere Übereinstimmung bei der Berechnung des Wärmetransportes erreicht werden. Wie bereits erwähnt, hat die Berechnung der Vollholzkonstruktionen mit Materialeigenschaften des Holzes, die zu einem grossen Teil in der Holzphysikgruppe der

ETH Zürich [42] gemessen wurden, eine sehr gute Übereinstimmung des Wärmetransportes mit den gemessenen Werten gezeigt. Ebenso hat sich das Model mit Hohlräumen für die geschlitzte Holzkonstruktion in Delphin als sehr zuverlässig gezeigt.

Demgegenüber wurden in der Simulation mittels WUFI Standard-Werte von der WUFI-Materialdatenbank eingesetzt. Beim Einsatz von diesen Werten haben die Dämmstoffe eine gute Übereinstimmung aufgewiesen. Jedoch beim Vollholz musste eine Korrektur (Senkung) der Wärmeleitfähigkeit vorgenommen werden, um eine bessere Übereinstimmung zu erreichen (siehe Bericht des IBP im Anhang).

Beide Programme weisen öfters bei der Berechnung der Wärmegewinne im Sommer Unterschiede gegenüber den gemessenen Werten auf. Die berechneten Werte liegen häufig tiefer als die gemessenen Werte. Da im Sommer häufig niedrigere Windgeschwindigkeiten auftreten, wird bei zukünftigen Erhebungen empfohlen, mit einem von der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung abhängigen Wärmeübergangswiderstand zu rechnen. Dies sollte ein verbessertes Simulationsergebnis bringen.

Bei der Berechnung der rel. Luftfeuchten konnten die Programme den Trend zuverlässig simulieren. Jedoch wurde die Schwankung der rel. Luftfeuchte gegenüber der Messung meistens reduziert. Die Abweichungen zwischen Messung und Berechnung bewegen sich bei vier Aufbauten in einem Bereich von bis zu 10 %. Bei der Holzplattenkonstruktion konnten die Abweichungen, wegen den erhöhten Tagesschwankungen, nicht zuverlässig festgestellt werden. Es ist zu erwähnen, dass unter Annahme einer Undichtheit in WUFI für drei Konstruktionen (Massivholz-, Dämmstein- und Holzrahmenkonstruktion) eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen rel. Luftfeuchten aufgewiesen werden konnte.

Die Holzfeuchten wurden in Delphin anhand der Sorptionsisothermen des Holzes berechnet und weisen im Vergleich zu den gemessenen Werten meistens zu hohe Werte auf. Mit WUFI wurden keine Holzfeuchten berechnet.

Alle untersuchten Holzbauelemente haben das Potenzial für einen Einsatz im Bauwesen. Die geschlitzte Holzkonstruktion zeigt, dass ein U-Wert von $\leq 0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auch mit Vollholz bei einer Wanddicke von leicht über 300 mm zu erreichen ist. Dabei bleiben viele natürliche Vorteile des Holzes bestehen. Die rel. Luftfeuchte innerhalb dieser Konstruktion hat sogar weniger als bei der Massivholzkonstruktion geschwankt, was mit den offenen „Sorptionsflächen“, die durch das Schlitzen entstanden waren, begründet werden könnte. Gleich wie bei der Massivholzkonstruktion weist diese Konstruktion keine Wärmebrücken auf und bildet eine kompakte, opake Gebäudehülle. Die Massivholzkonstruktion hat, dank einem erhöhten Wärme- und Feuchtespeichervermögen, nur gering schwankende Verläufe des Wärme- und Feuchtetransportes gezeigt. Jedoch haben die Messungen einen unerwarteten Wärmeverlust während des Winters aufgezeigt. Es wird deshalb empfohlen, dies in weiteren Untersuchungen näher zu erforschen.

Die geringsten Wärmeverluste wurden, wie erwartet, bei der Holzplattenkonstruktion mit einer Dämmung aus Steinwolle gemessen. Bei der Brettstapelkonstruktion hat einerseits der Einsatz des Massivholzes, was eine Reduktion der Dämmstoffschicht zur Folge hatte, die Dämmfunktion leicht reduziert, andererseits wurden die Temperaturschwankungen aufgrund des Wärmetransports während des Sommers wesentlich reduziert. Da die Energieeinsparung von mehreren Faktoren abhängig ist, ist eine weitere Erforschung der Wirkung der Massivholzelemente auf die Kühlungskosten zu empfehlen.

Die Dämmsteinkonstruktion hat während der Messung ebenso sehr ausgewogene Eigenschaften aufgewiesen. Die Holzweichfaserplatten zeigen eine sehr gute Dämmfunktion und, zusammen mit einem erhöhten Wärmespeichervermögen gegenüber anderen Dämmmaterialien, können diese einen Wärmetransport mit reduzierter Temperaturschwankung innerhalb der Konstruktion erreichen. Jedoch wurden in den Grenzschichten zu hohe rel. Luftfeuchten gemessen und die Kombination mit einer

Massivholzplatte scheint nicht optimal zu sein. Dies sollte in der weiteren Entwicklungsphase dieses neuen Materials angepasst werden.

Der Trend für den Einsatz des Holzes ist allerdings sehr positiv und konnte mit diesen Messungen untermauert werden.

Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass beide bauphysikalischen Programme für die Berechnung der Holzbauelemente geeignet sind. Aus einer gut angepassten Simulation kann ein Bauherr alle notwendigen, bauphysikalischen Kenngrössen erhalten, um eine zuverlässige Beurteilung der hygrothermischen Eigenschaften eines Bauteils vornehmen zu können. Jedoch könnte dies aufgrund von mehreren Einstellungen unsicher werden. Auch bei dieser Validierung mussten einige Parameter, um eine bessere Übereinstimmung zu erhalten, angepasst werden. Selbst die Materialkennwerte gleicher Materialien unterscheiden sich, je nach Herkunft der Daten, deutlich und sind nicht nur von der Auswahl der Proben, sondern auch von der Testmethode abhängig. Eine weitere, wesentliche Rolle neben den notwendigen Materialkennwerten spielen auch die ausgewählten Eingangsgrössen zusammen mit den Anfangsbedingungen. Die Eingangsgrössen sollten die Randbedingungen, die Exposition und die Materialeigenschaften beinhalten. Die Anfangsbedingungen (z.B. bezüglich der Materialfeuchte) sollten möglichst aufgrund von Herstellerangaben erfolgen, jedoch muss berücksichtigt werden, dass sich diese während des Einbaus noch ändern können.

Das Projekt "Vergleichende Untersuchungen zum Feuchte- und Wärmeverhalten in unterschiedlichen Holzwandelementen" hat unter anderem auch eine zuverlässige Verknüpfung zwischen der Praxis und der Forschung gezeigt. Auch kleinere Betriebe ohne Kapazitäten im Bereich Forschung und Entwicklung konnten sich an dem Projekt beteiligen und in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich und dem Fraunhofer-Institut ihre Produkte testen lassen. Eine weitere Zusammenarbeit mit den beteiligten Betrieben und der ETH Zürich (Arbeitsgruppe Holzphysik), um die Kenntnisse im Holzbaubereich zu erweitern, läuft im Rahmen des Projektes „Datenbank für Kennwerte zum Feuchte- und Wärmetransport in Holz und Holzwerkstoffen“, welches durch den Aktionsplan Holz (BAFU) gefördert wird.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Ammann, S.D.: Kennwerte von Thermoholz. Projektarbeit MSc, Institut für Baustoffe, ETH Zürich, (2010).
- [2] Aste, N.; Angelotti, A.; Buzzetti, M.: The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings* 41 (2009), S. 1181-1187.
- [3] Bächle, F.; Sonderegger, W.; Bader, H.; Weber, A.; Foglia, A.; Niemz, P.: Thermo- und feuchtetechnische Balance von Massivholz-Baukörpern. Bericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, (2007).
- [4] Betz, J.: Development of MPB thick laminate wood plate products. University of British Columbia - Faculty of Forestry, (2006).
- [5] Blumer, H.; Niemz, P.: Untersuchungen der Eigenschaften von verdübelten Massivholzplatten als Wand- und Deckelemente. Schlussbericht Nr. 06.01, gefördert vom Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, Bundesamt für Umwelt BAFU, Schweiz, (2005).
- [6] Camathias, U.: Untersuchungen zur Wasseraufnahme von Vollholz und thermisch modifiziertem Holz. Bachelorarbeit, Institut für Baustoffe, ETH Zürich, (2010).
- [7] DIN EN ISO 6946:2003-10: Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren. Beuth Verlag, Berlin (2003).
- [8] DIN EN ISO 10456:2010-05: Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007 + Cor. 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10456:2007 + AC:2009. Beuth Verlag, Berlin (2010).
- [9] Duffin, R.J.; Knowles, G.: A Passive Wall Design to Minimize Building Temperature Swings. *Solar Energy* 33(3-4), (1984), S. 337-342.
- [10] Falk, B.: Wood as a Sustainable Building Material. *Forest Products Journal* 59, Heft 9, (2009), S. 6-12.
- [11] Foglia, A.; Sonderegger, W.; Niemz, P.; Bader, H.; Weber, A.: Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit neuartiger Holzwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Bericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, (2006).
- [12] Fricker J.M.: Computational analysis of reflective air spaces. *AIRAH Journal* 50, October (1997), S. 29-32.
- [13] Gatland, S.D.; Karagiozis, A. N.; Murray, C.; Ueno, K.: The Hygrothermal Performance of Wood-Framed Wall Systems Using a Relative Humidity-Dependent Vapor Retarder in the Pacific Northwest. In: 30 Years of Research Proceedings Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X, ASHRAE, Clearwater Beach, Florida, (2007).
- [14] Gregory, K.E.; Moghtaderi, B.; Sugo, H. O.; Page, A. W.: A thermal performance study of common Australian residential construction systems in hypothetical modules. In: Proceedings of the 14th International Brick & Block Masonry Conference: Sydney, (2008).
- [15] Hameury, S.; Lundstrom, T.: Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign. *Energy and Buildings* 36 (2004), S. 281-292.
- [16] Hameury, S.: Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study. *Building and Environment* 40 (2005), S. 1400-1412.

- [17] Harijaona, Z.; Cantin, R.; Guarracino, G.: Numerical modelling of impact of radiation exchanges between wood and building thermal comfort. In: 2009 International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications, (2009), S. 249-254.
- [18] Häupl, P.: Bauphysik – Klima Wärme Feuchte Schall: Grundlagen, Anwendungen, Beispiele. Ernst & Sohn Verlag, Berlin (2007), ISBN: 978-3-433-01842-2.
- [19] Hering, S.: Interne Messung der Sorptionsisothermen von Buche, Institut für Baustoffe, ETH Zürich, (2010).
- [20] IBP / Software / WUFI [on-line], Fraunhofer-Institut für Bauphysik, (2011) [2011-01-05]. URL: <http://www.wufi.de>
- [21] Joscak, M.: Interne Messung der Lambdawerte – Produkte Fa. Tschopp Holzbau AG. Institut für Baustoffe, ETH Zürich, (2010).
- [22] Joscak, M.; Sonderegger, W.; Niemz, P.: Wärme- und Feuchtetransport in Holzbauelementen unter freier Bewitterung. Bauphysik 32 (5), (2010), S. 308-318.
- [23] Joscak, M.; Bächle, F.; Sonderegger, W.; Niemz, P.; Plagge, R.: Vergleichende Untersuchungen zum optimierten Wärmeschutz in unterschiedlichen Holzbausystemen. Abschlussbericht, Forschungsprojekt Nr. 2-71114-07, gefördert vom Fonds zur Förderung der Wald-und Holzforschung, Bundesamt für Umwelt BAFU, Schweiz, (2008).
- [24] Joscak, M.; Niemz, P.; Bächle, F.; Sonderegger, W.; Sanabria, S.: System Appenzellerholz, Fa. Nägeli AG. Abschlussbericht, gefördert vom Verein Urholz im Rahmen eines Regio Plus Projektes, (2010).
- [25] Kalamees, T.; Vinha, J.: Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures. Building and Environment 38(5), (2003), S. 689-697.
- [26] Kawasaki, T.; Kawai S.: Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors. Journal of Wood Science 52 (2006), S. 75-83.
- [27] Kontoleon, K.J.; Bikas, D.K.: Thermal mass vs. thermal responsefactors: determining optimal geometrical properties and envelope assemblies of building materials. In: Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment. Santorini, Greece. (2005).
- [28] Kosny, J.; Yarbrough, D.; Childs, P.; Mohiuddin, S. A.: How the same wall can have several different R-values: Relations between amount of framing and overall thermal performance in wood and steel-framed walls. In: 30 Years of Research Proceedings Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X, ASHRAE, Clearwater Beach, Florida, (2007).
- [29] Kránitz, K.; Niemz, P.: Untersuchungen zum Verhalten von Kulturgut aus Holz bei Klimawechsel. Interner Bericht Nr. 56, Institut für Baustoffe, ETH Zürich, (2010).
- [30] Kratz, W.: Das feuchtigkeitstechnische Verhalten hölzerner Außenbauteile in Theorie und Praxis. Teil 2: Untersuchungsergebnisse von in Testhäusern geprüften Aussenwandelementen. Holz als Roh- und Werkstoff 41 (1983), S. 95-100.
- [31] Kruger, E.L.; Adiazola, M.: Thermal analysis of wood-based test cells. Construction and Building Materials 24, (2010), S. 999-1007.
- [32] Marquardt, H.; Mainka, G.W.: Wood-based panelling as a replacement for breathable membranes in timber-framed housing. Innovative Wooden Structures and Bridges, (2001), S. 307-312
- [33] Meissner, F.; Plagge, R.; Zhao, J.: Interne Messungen der hydrothermischen Materialeigenschaften, Interne Berechnung der Materialeigenschaften, Institut für Bauklimatik, TU Dresden, (2008-2010).

- [34] Merz, K.; Fisher, J.; Strahm, T.; Schuler, B.: Produits bois utilisés en structure. 3eme partie Eléments de parois, planchers et toitures, Lignatec 9/2001, Lignum, Zürich, (2001), ISSN 142-0312.
- [35] Moser, J.; Tremli, E.; Gütler, H.: Warenkunde für Holzkaufleute. Kapitel 13: Holzlagenwerkstoffe. [on-line], 3. überarbeitete Auflage, (2003). URL: <http://portal.wko.at/wk/dok_detail_html.wk?AnglID=1&DocID=312327&StID=164059>.
- [36] Mukhopadhyaya, P.; Van Reenen, D.; Kumaran, K.; Copeland, C.; Newman, P.J.; El Khanagry, R.; Zalok, E.: Moisture Performance Assessment of Wood-frame Exterior Building Envelope Construction in China and Taiwan. In: 8th Nordic Symposium on Building Physics: Copenhagen, (2008), S. 1-8.
- [37] Murray, C.: Comparing the Moisture Performance of Wood Framed Wall Systems in the Pacific Northwest. Prepared for the Roof Consultant Institute/Building Envelope Institute, 2005 Symposium on Building Envelope Technology, (2005).
- [38] Nicolai A.; Grunewald J.: Interne Materialdatenbank der Software Delphin [Software], Version 5.6.4, TU Dresden, (2004-2008).
- [39] Reiterer, E. M.; Ferk, H.: Prüfung des Wärmedurchgangskoeffizienten U eines Prüfgegenstandes im Labor. Prüfbericht Nr. Bo2.858.033.410, Technische Universität Graz, (2004).
- [40] Schnider, T.: Interne Messung der Lambdawerte – Produkte Fa. Gisler. Institut für Baustoffe, ETH Zürich. (2008).
- [41] Sedlbauer, K.; Oswald, D.; König, N.: Schimmelgefahr bei offenen Luftkreisläufen. Vorstellung einer Prognosemethode auf der Basis von Fuzzy-Algorithmen. Gesundheits-Ingenieur 119 (5), (1998), S. 240 - 247.
- [42] Sonderegger, W.; Hering, S.; Niemz, P.: Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions. Holzforschung (2011), *accepted*.
- [43] Sonderegger, W.; Niemz, P.: Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials. European Journal of Wood and Wood Products 67 (3), (2009), S. 313-321,
- [44] Sonderegger, W.; Niemz, P.: Combined bound water and water vapour diffusion of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions. Holzforschung, *submitted*.
- [45] Sonderegger, W.; Schnider, T.: Interne Messung der Lambdawerte – Produkte Fa. Nägeli AG. Institut für Baustoffe, ETH Zürich, (2007-2008).
- [46] Sugo, H.O.; Moghtaderi, B.; Page, A.W.: The Study of Heat Flows in Masonry Walls in a Thermal Test Building. In: Proceeding 10th Canadian Masonry Symposium: Banff, (2005), S. 191-201.
- [47] Sugo, H.O.; Page, A.W.; Moghtaderi, B.: A Comparative Study of the Thermal Performance of Cavity and Brick Veneer Construction. In: Proceeding 13th IBMAC: Amsterdam, (2004), S. 767-776.
- [48] Teasdale-St-Hilaire, A.; Derome, D.: Comparison of experimental and numerical results of wood-frame wall assemblies wetted by simulated wind-driven rain infiltration. Energy and Buildings 39 (2007), S. 1131-1139.
- [49] TUD – Software – Delphin / CHAMPS-BES [on-line], Uwe Mainhold, Institut für Bauklimatik, TU Dresden, (2011) [2008-08-06]. URL: <http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_architektur/ibk/software/delphin/document_view?set_language=de>.

- [50] Ulgen, K.: Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings* 34 (2002), S. 273-278.
- [51] Winter, S.; Schopbach, H.: Flächige Holzbausysteme – Massivholzbau. In: die neue quadriga – Das Fachmagazin für den Holzhausbau. Ausgabe 5, (2003).
- [52] Winter, W.: Bausysteme Holzbau [on-line - Vorlesung], Technische Universität Wien - Fakultät für Architektur, (2004). URL: http://www.iti.tuwien.ac.at/download/archiv/wso405/pflicht/BSHB_28_10_2004.pdf.
- [53] Yilmaz, Z.: Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: Comparison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate. *Energy and Buildings* 39 (2007), S. 306-316.
- [54] Zhao, J.; Plagge, R.: Interne Berechnung der hydrothermischen Materialeigenschaften, Institut für Bauklimatik, TU Dresden, (2010).

Anhang: Zustand der Wandelemente nach einem Jahr

Abb. A-1: Stand der Aussenseite (Putz, Holzfassade) nach einem Jahr; gesamte Testfläche (oben), Frontansicht (unten)

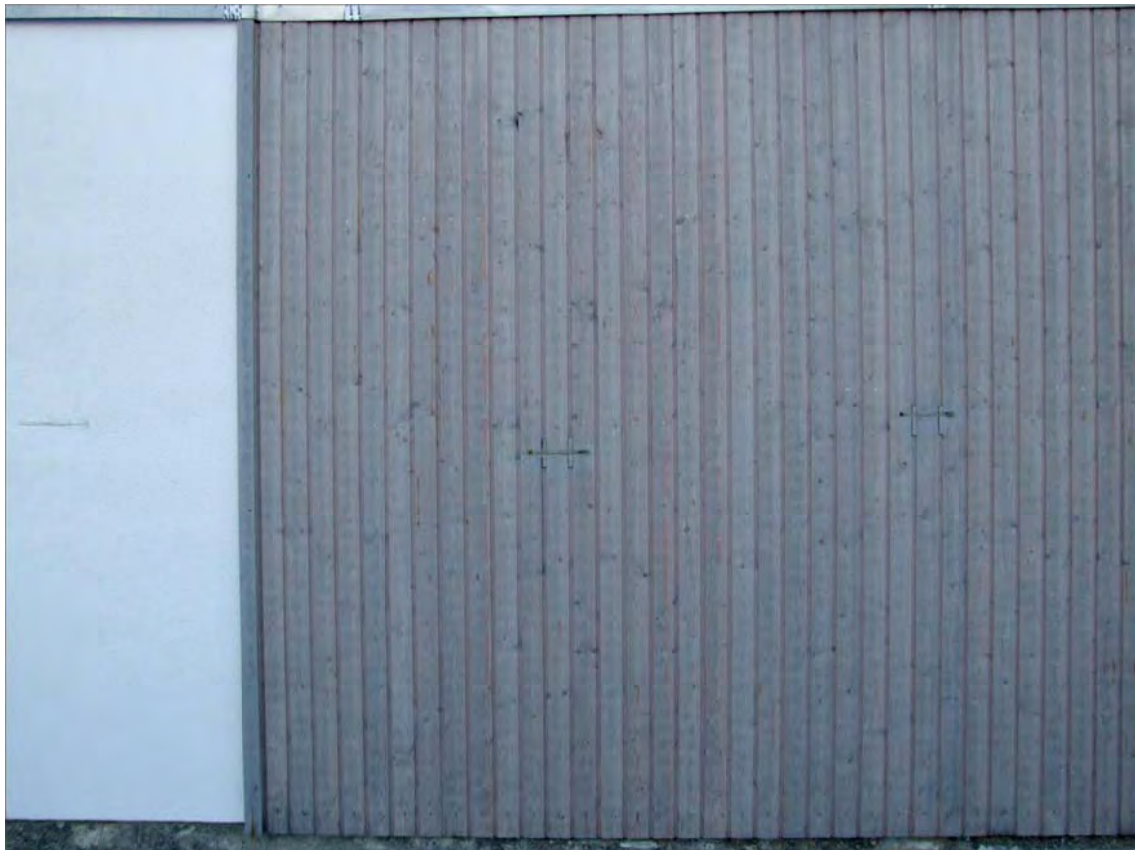


Abb. A-2: Stand des Aussenputzes der Dämmsteinkonstruktion nach einem Jahr; Frontansicht (oben), Detail mit Temperatursensor PT100 an der Aussenoberfläche (unten)



Abb. A-3: Stand der Holzfassade nach einem Jahr; Frontansicht (oben), Detail mit Temperatursensor PT100 an der Aussenoberfläche (unten)

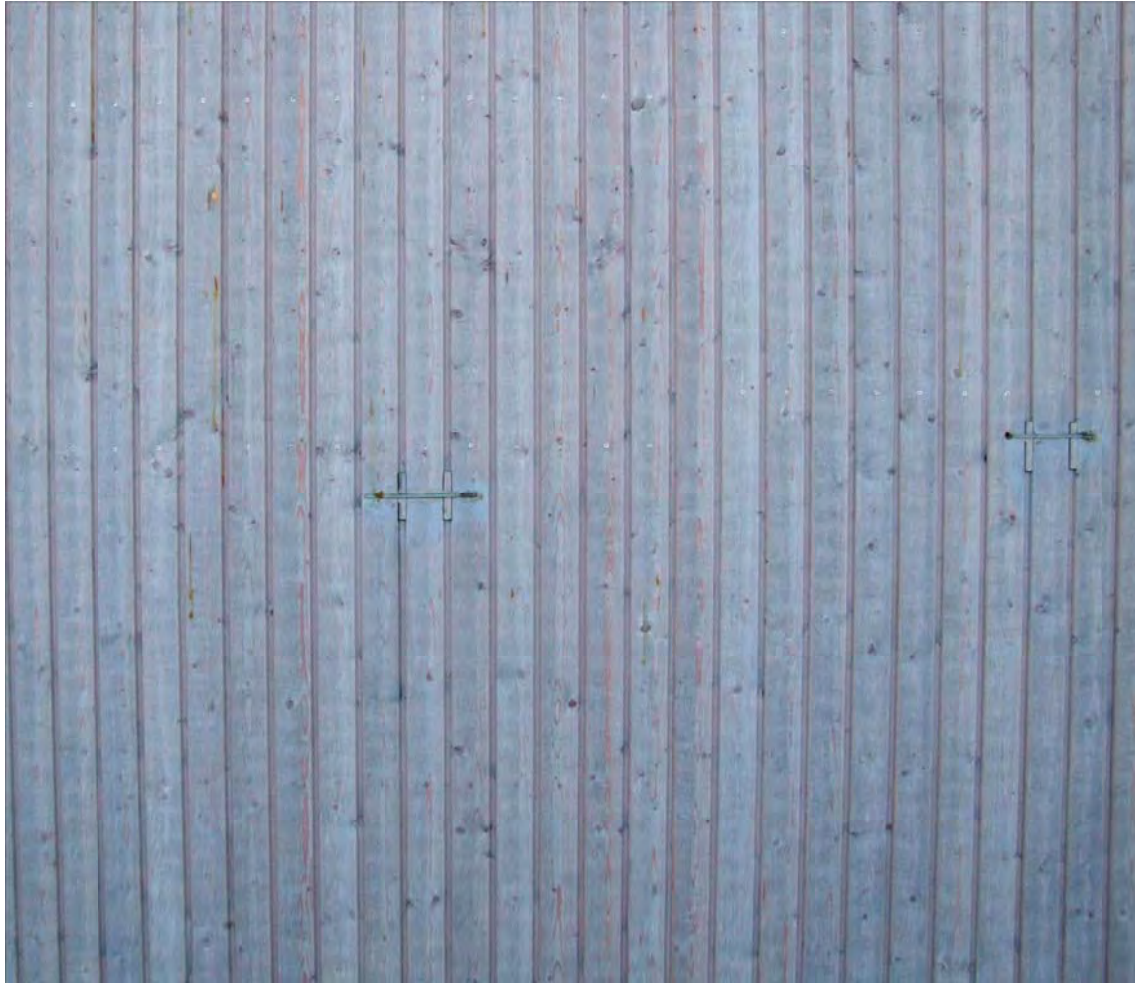


Abb. A-4: Stand der Innenoberfläche (Massivholz-Lage) bei der Massivholzkonstruktion nach einem Jahr; Spalten zwischen den Brettern (oben), Detail mit Verdübelung eines Brettes (unten)



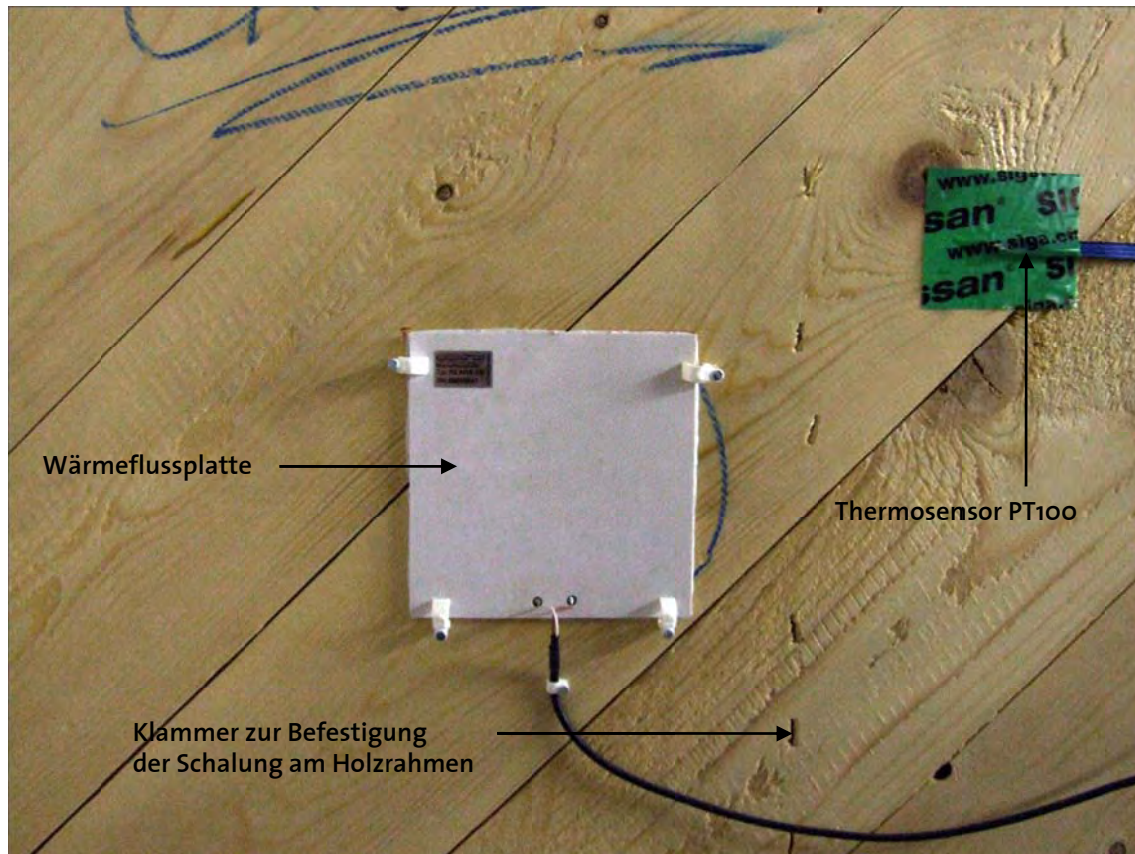
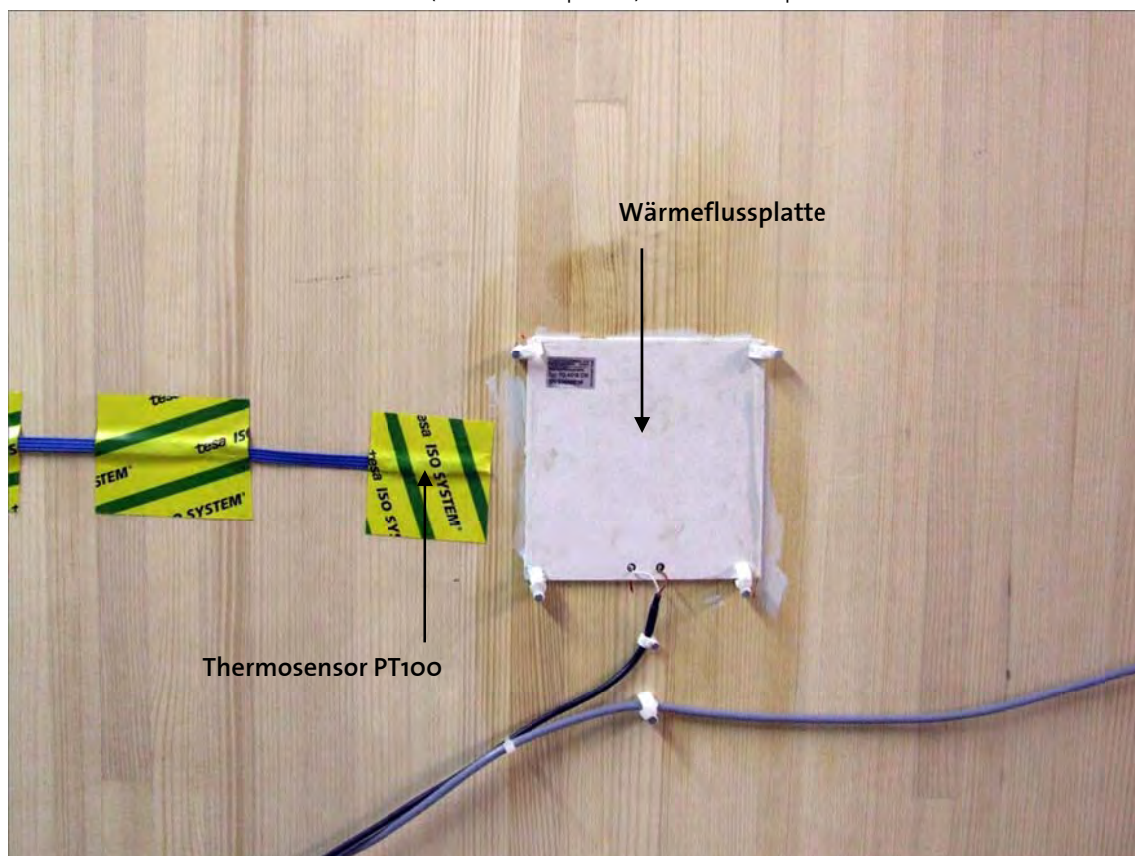
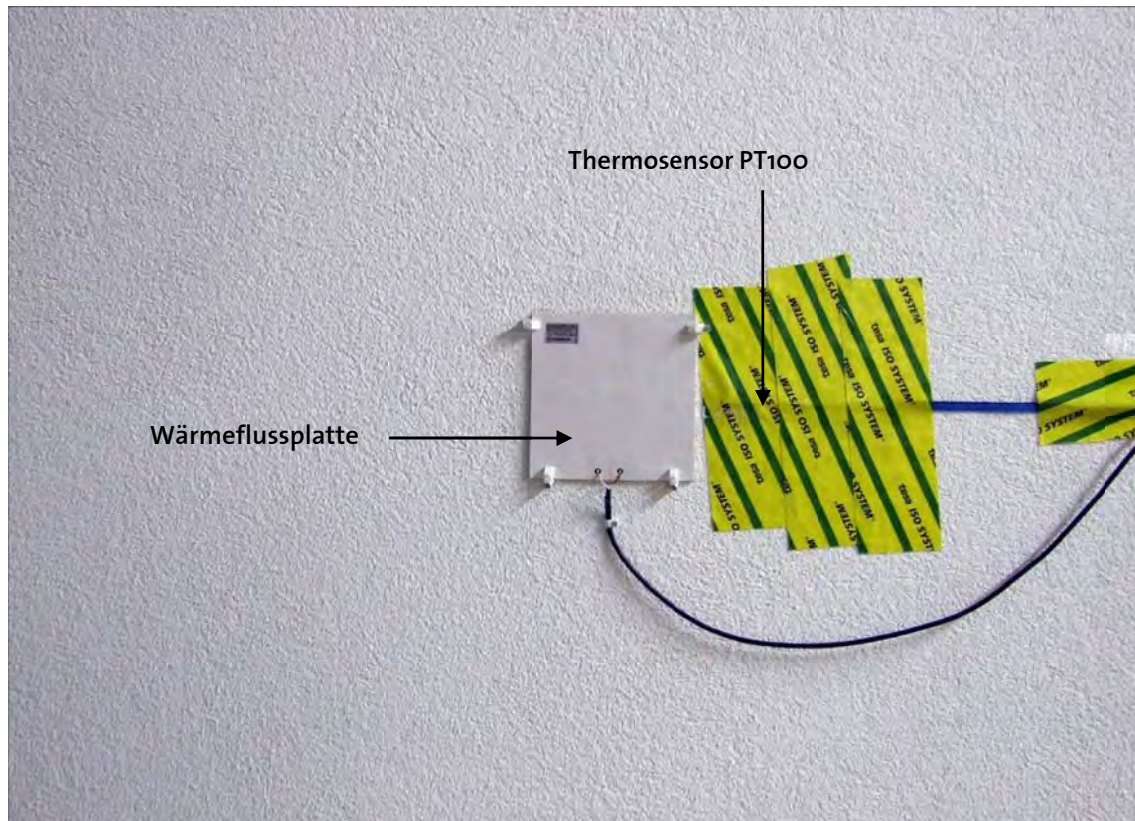
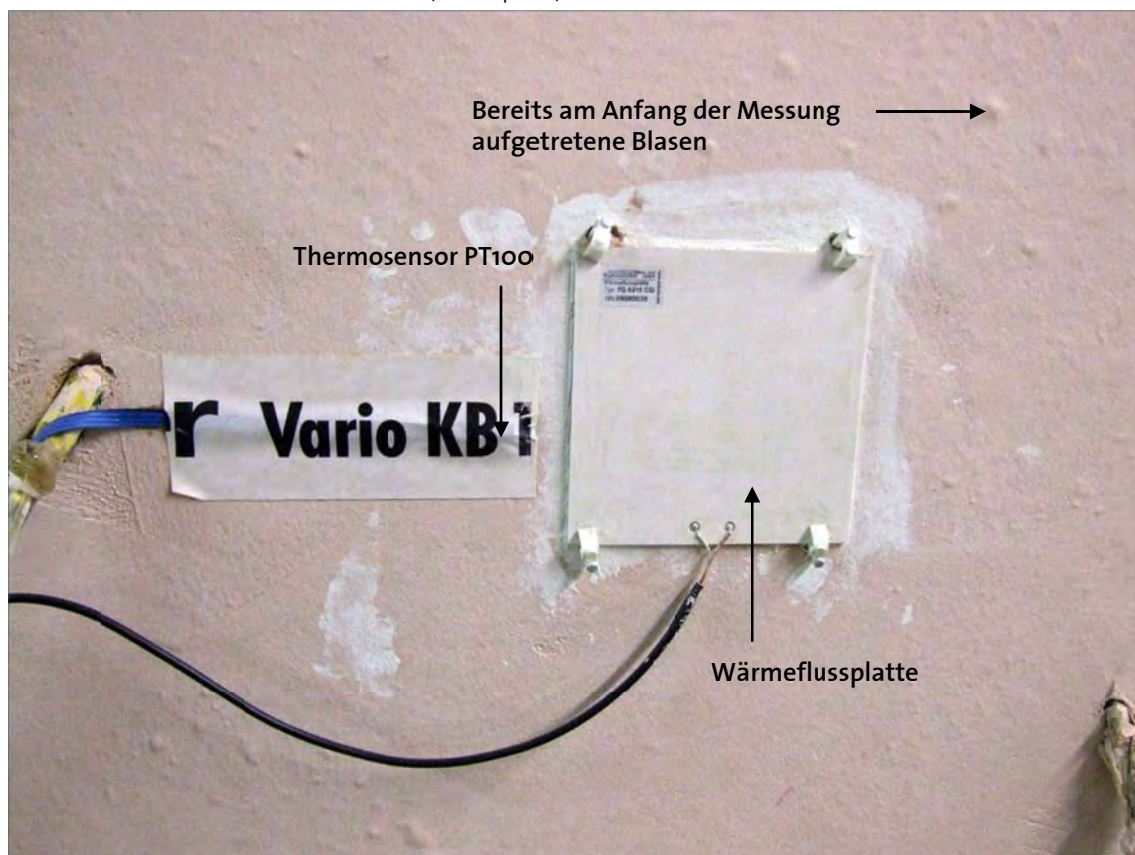
Abb. A-5: Stand der Innenoberfläche (Schalung) bei der geschlitzten Holzkonstruktion nach einem Jahr**Abb. A-6:** Stand der Innenoberfläche (Massivholzplatte) bei der Holzplattenkonstruktion nach einem Jahr

Abb. A-7: Stand der Innenoberfläche (Gipskarton) bei der Brettstapelkonstruktion nach einem Jahr**Abb. A-8:** Stand der Innenoberfläche (Innenputz) bei der Dämmsteinkonstruktion nach einem Jahr

Anhang

Erweiterter Anhang

IBP-Bericht
RKB 001/2011/292
(30 Seiten)

**Dokument des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik
in Holzkirchen**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht RKB 001/2011/292

Hygrothermische Untersuchungen und Berechnungen verschiedener Holzbauelemente

Durchgeführt im Auftrag
ETH Zürich
Institut für Baustoffe, Holzphysik
Schafmattstrasse 6
CH-8093 Zürich

Der Bericht umfasst
37 Seiten Text
48 Abbildungen

Dr.-Ing. Martin Krus
Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld
Dipl.-Ing. (FH) Theo Großkinsky

Valley, 26. Januar 2011

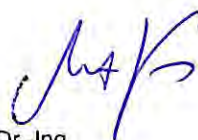
Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

Abteilungsleiter



Prof. Dr.-Ing.
Andreas Holm

Gruppenleiter



Dr.-Ing.
Martin Krus

Bearbeiter



Dipl.-Ing. (FH)
Theo Großkinsky

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Vorgehensweise	3
2.1	Freilandversuche	3
2.1.1	Untersuchte Konstruktionen	3
2.2	Validierungs- und Langzeitberechnungen	8
3	Ergebnisse der Validierungsberechnungen	9
3.1	Tschopp/Isofloc	9
3.2	Gisler	12
3.3	Nägeli Konstruktion	16
3.4	Schuler/Flumroc	18
3.5	Pavatex	21
4	Langzeitbetrachtung	24
4.1	Tschopp/Isofloc	24
4.2	Gisler	26
4.3	Nägeli	27
4.4	Schuler/Flumroc	28
4.5	Pavatex	29
5	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung	30

1 Einleitung

Im Holzbaubereich gibt es ganz unterschiedliche Konstruktionen, die im Hausbau verwendet werden. Anhand von Freilandversuchen soll das hygrothermische Verhalten von Wandelementen messtechnisch untersucht und rechnerisch nachvollzogen werden. Die ermittelten Messdaten dienen des Weiteren für Validierungsberechnungen. Das Ziel der Untersuchungen liegt darin, die Temperatur-, Feuchte- und Wärmestromverläufe von fünf untersuchten Wandkonstruktionen rechnerisch abzubilden, um weiterführend eine Langzeitprognose abzugeben und damit das energetische Verhalten besser beurteilen zu können und andererseits gegebenenfalls Feuchteprobleme aufzudecken.

2 Vorgehensweise

2.1 Freilandversuche

Auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen werden in ein Versuchsgebäude fünf verschiedene Holzbaukonstruktionen auf der Westseite aufgebaut. Die Wandelemente haben eine Geschoßhöhe von 2,8 m und eine Breite von 1,5 m. In den Wandelementen sind an ausgewählten Stellen zwischen den Grenzschichten der Materialien Messsensoren zur Temperatur- und teilweise auch zur Feuchtemessung eingebaut. Innenseitig sind zusätzlich Wärmeflussensoren auf den Oberflächen der Wände aufgebracht. Die Messdaten werden kontinuierlich mithilfe des am IBP entwickelten Messdatenerfassungssystem IMEDAS® aufgezeichnet. Die Außenklimarandbedingungen werden ebenfalls kontinuierlich über die vorhandene Wetterstation am IBP erfasst. Während der Heizperiode wird das Versuchsgebäude auf ca. 23 °C und 50 % relative Feuchte klimatisiert.

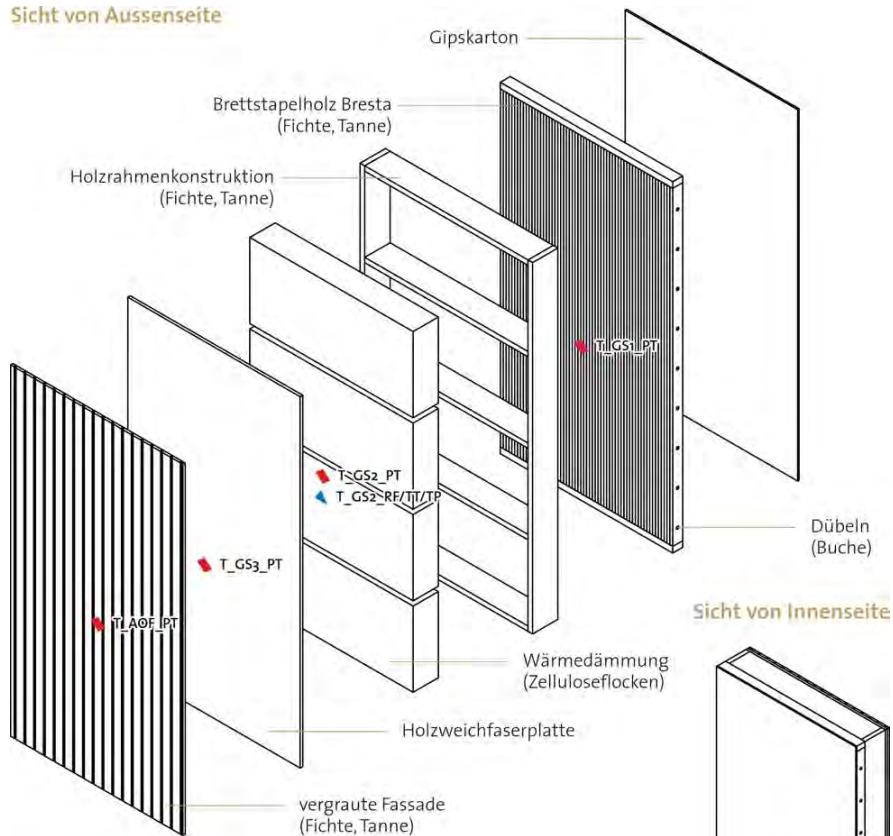
2.1.1 Untersuchte Konstruktionen

Nachfolgend werden die fünf untersuchten Konstruktionen mit Hilfe von Konstruktionszeichnungen, die uns zur Verfügung gestellt wurden, dargestellt. Die Lage der Messsensoren in den Grenzschichten und an den Oberflächen ist in den Zeichnungen mit eingetragen. Für die Darstellung der Mess- und Berechnungsergebnisse werden die Abkürzungen der Sensoren wie in den nachfolgenden Grafiken verwendet.

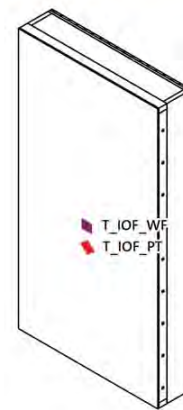
Tschopp/Isofloc

Dieser Wandaufbau besteht aus einem Brettstapelholz BRESTA mit einem außen liegenden Holzrahmen, in den eine Zellulosedämmung eingebracht ist. Innenseitig wird die Konstruktion mit einer Gipskartonplatte und außenseitig mit einer Holzweichfaserplatte und einer gestrichenen Nut-Feder-Schalung abgeschlossen. Bei dieser Konstruktion wird die relative Feuchte in den Grenzschichten zwischen der Zellulosedämmung und der Holzweichfaserplatte gemessen.

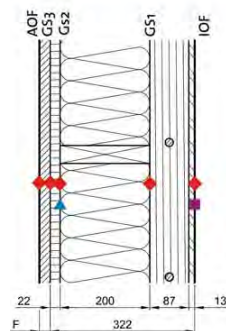
Sicht von Aussenseite



Sicht von Innenseite



Horizontaler Schnitt



Legende

- ◆ Temperaturfühler PT100
- ▲ Feuchte- und Temperaturfühler
- Wärmeflussensor

Bild 1:
Explosionszeichnung und horizontaler Schnitt der Wand von der Firma Tschopp/Isofloc, mit Kennzeichnung der Messsensoren.

Gisler

Bei dieser Konstruktion handelt es sich um eine Holzrahmenkonstruktion in die geschlitzte Holzelemente ohne zusätzliche Dämmung eingebaut sind. Innen- und außenseitig ist jeweils noch eine Lage mit Schalungsbrettern aufgebracht. Als Fassadenabschluss wird eine gestrichene Nut-Feder-Schalung direkt aufgeschraubt. Die relative Feuchte wird zwischen den zwei Lagen der geschlitzten Holzelemente gemessen.

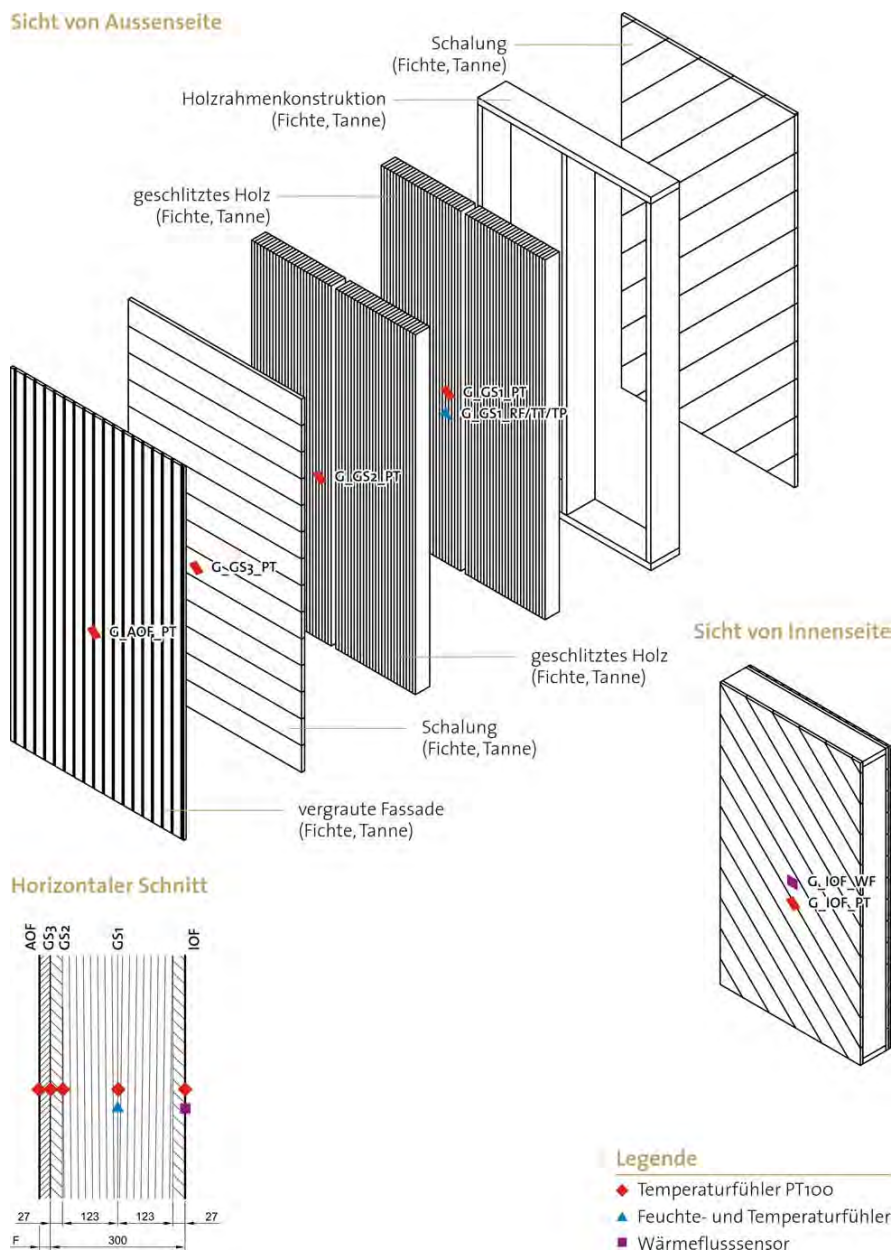


Bild 2:
Explosionszeichnung und horizontaler Schnitt der Wand von der Firma Gisler, mit Kennzeichnung der Messsensoren.

Nägeli

Hierbei handelt es sich um eine Massivholzkonstruktion, die nur verdübelt und nicht verleimt ist. Der Wandaufbau besteht aus zwei 18 cm dicken Massivholzwandelementen, in denen kreuzweise die Bretter verlegt und gedübelt sind. Außenseitig ist noch eine Winddichtungsfolie und eine Nut-Feder-Schalung aufgebracht. Innenseitig ist die massive Konstruktion zu sehen. Die relative Feuchte wird zwischen zwei Massivholzwandelementen gemessen.

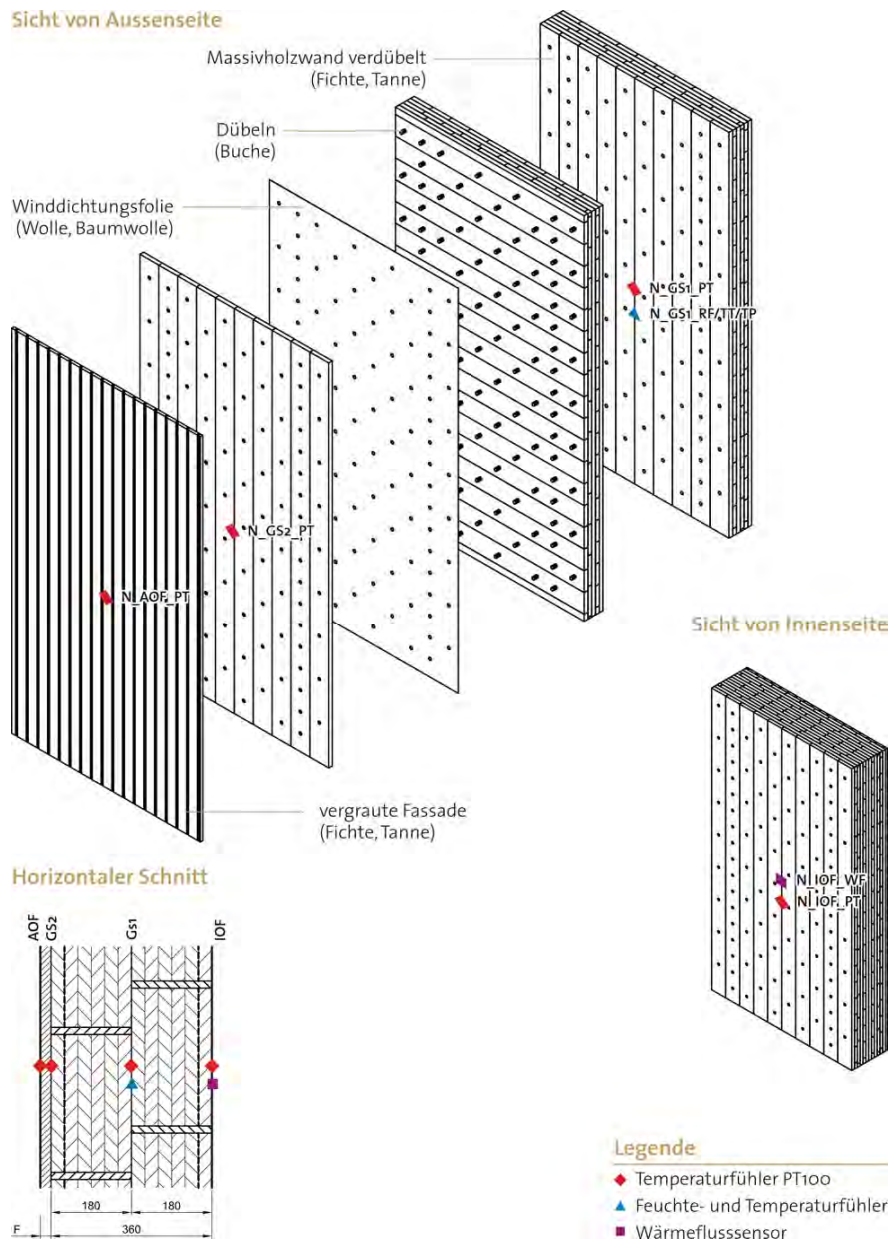
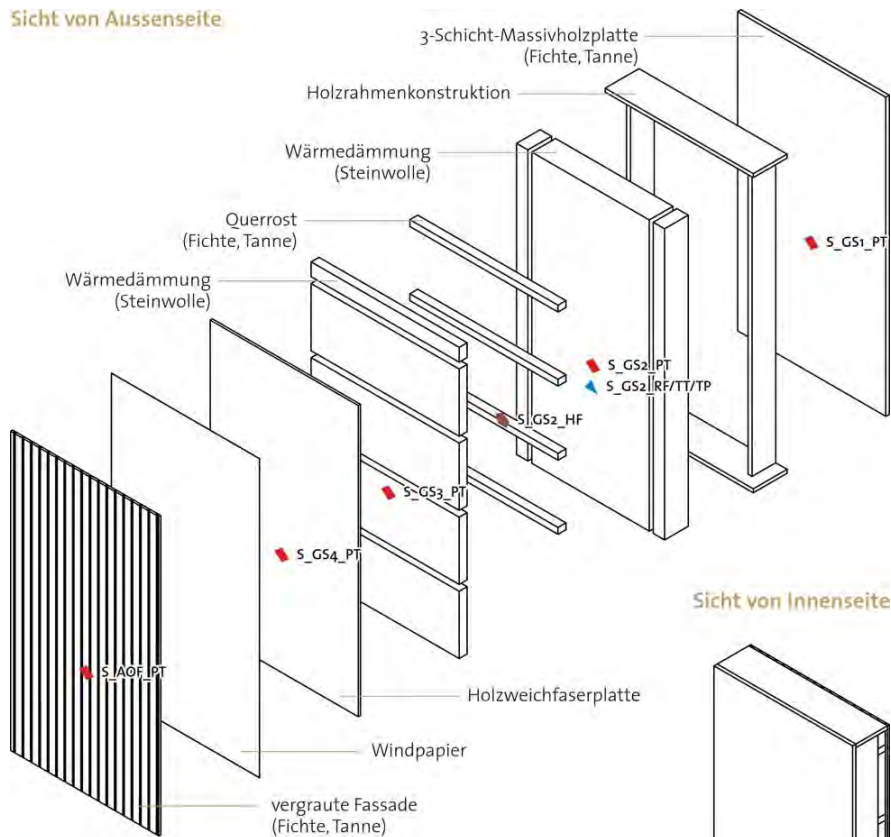


Bild 3:
Explosionszeichnung und horizontaler Schnitt der Wand von der Firma Nägeli, mit Kennzeichnung der Messsensoren.

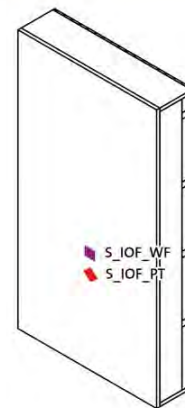
Schuler/Flumroc

Hierbei handelt es sich um eine Ständerkonstruktion mit innenseitiger Massivholzplatte. Als Dämmstoff wird in der Rahmenkonstruktion 240 mm Steinwolle eingesetzt. Darauf kommt als zusätzliche Dämmung eine 80 mm dicke Holzweichfaserplatte. Die relative Feuchte wird in der Grenzschicht zwischen den zwei Dämmstoffmaterialien gemessen.

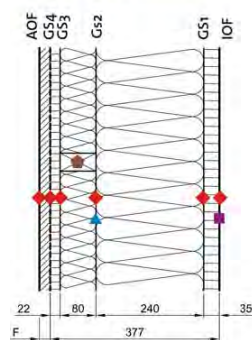
Sicht von Aussenseite



Sicht von Innenseite



Horizontaler Schnitt



Legende

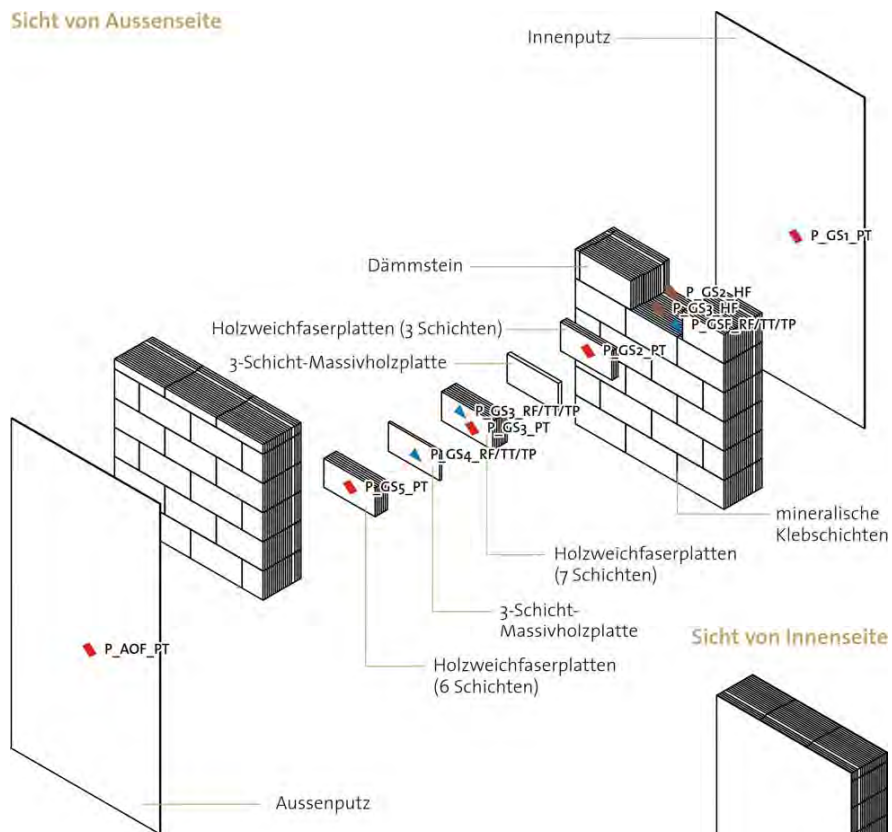
- ◆ Temperaturfühler PT100
- ▲ Feuchte- und Temperaturfühler
- Wärmeflussensor
- Holzfeuchtesensor

Bild 4:
Explosionszeichnung und horizontaler Schnitt der Wand von der Firma Schuler/Flumroc, mit Kennzeichnung der Messsensoren.

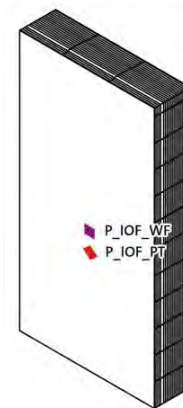
Pavatex

Hierbei handelt es sich um eine völlig andere Konstruktion, bei der Dämmsteine aus Holzweichfaserplatten wie bei einem Mauerwerk mit einem mineralischen Kleber verklebt werden. Nahe der Innen- und der Außenseite ist zur Versteifung jeweils eine 3-Schicht-Massivholzplatte zwischen die Faserplatten eingeklebt. Die Wandkonstruktion wird innenseitig verputzt und ist im Gegensatz zu den anderen Konstruktionen außen nicht mit einer Nut-Feder-Schalung versehen, sondern mit einem Außenputz. Die relative Feuchte wird an den Grenzschichten der außen liegenden Massivholzplatte gemessen.

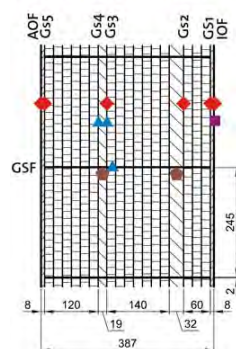
Sicht von Aussenseite



Sicht von Innenseite



Horizontaler Schnitt



Legende

- ◆ Temperaturfühler PT100
- ▲ Feuchte- und Temperaturfühler
- Wärmeflussensor
- Holzfeuchtesensor

Bild 5:
Explosionszeichnung und horizontaler Schnitt der Wand von der Firma Pavatex, mit Kennzeichnung der Messsensoren.

2.2 Validierungs- und Langzeitberechnungen

Für die Berechnung des Feuchte- und Temperaturhaushalts der Wandaufbauten steht ein am IBP entwickeltes vielfach validiertes Programm zur instationären Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports WUFI® zur Verfügung. Mithilfe dieses Programms werden die gemessenen Temperatur-, Feuchte- und Wärmestromverläufe abgebildet. Des Weiteren soll nach erfolgreicher Validierung der Ergebnisse eine Langzeitprognose der fünf untersuchten Wandkonstruktionen über einen Zeitraum von zehn Jahren dargestellt werden.

Für die Validierungsberechnungen werden die Messstellen in den Wänden als Monitorpositionen in den Bauteilaufbau des Programms implementiert. Für die Berechnungen werden die während der Versuchsdauer gemessenen Innen- und Außenklimabedingungen verwendet. Als Materialdaten werden zunächst die Standardmaterialkennwerte aus der WUFI®-Materialdatenbank angesetzt. Durch Variation der relevanten hygrothermischen Materialkennwerte und der Übergangsbedingungen in bauphysikalisch und materialtechnisch sinnvollen Grenzen und gegebenenfalls Implementierung zusätzlicher Effekte wird versucht, eine möglichst gute Übereinstimmung der Rechenergebnisse mit den Messergebnissen zu erzielen. Für die Langzeitberechnungen des hygrothermischen Verhaltens der Konstruktionen werden die Parameter, die die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erzielen, zugrunde gelegt.

3 Ergebnisse der Validierungsberechnungen

3.1 Tschopp/Isofloc

Bild 6 oben zeigt den Vergleich des mit den Standardmaterialkennwerten berechneten Temperaturverlaufs an der Grenzschicht 1 (rote Linie) mit dem gemessenen Verlauf (schwarze Linie). Man erkennt, dass die Berechnung in den Wintermonaten etwas zu hohe Temperaturen ergibt. Durch eine Absenkung der Wärmeleitfähigkeit des Brettstapels von 0,09 auf 0,07 W/mK wird eine deutlich bessere Übereinstimmung erreicht, wie durch den Vergleich im unteren Bild erkennbar. Bei den in WUFI angesetzten Wärmeleitfähigkeiten handelt es sich um Werte für den absolut trockenen Baustoff! Während der Berechnungen wird der Einfluss der Stofffeuchte, durch die die Wärmeleitfähigkeit erhöht wird, miteinbezogen.

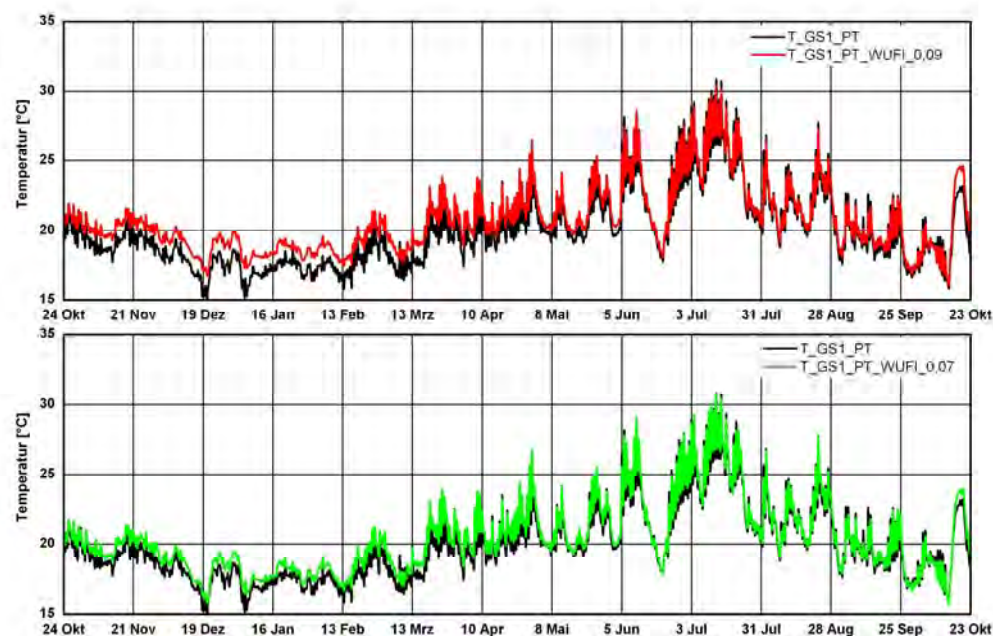


Bild 6:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Grenzschicht 1 der Konstruktion der Firma Tschopp/Isofloc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

Für die weiter außen liegende Grenzschicht ergeben sich sowohl vor der Anpassung als auch nach der Anpassung kaum unterschiedliche mit der Messung gut übereinstimmende Temperaturverläufe (siehe Bild 7). Das Gleiche gilt für die Bild 8 dargestellten Ergebnisse an der Grenzschicht 3 und der Innenoberflächentemperatur (Bild 9).

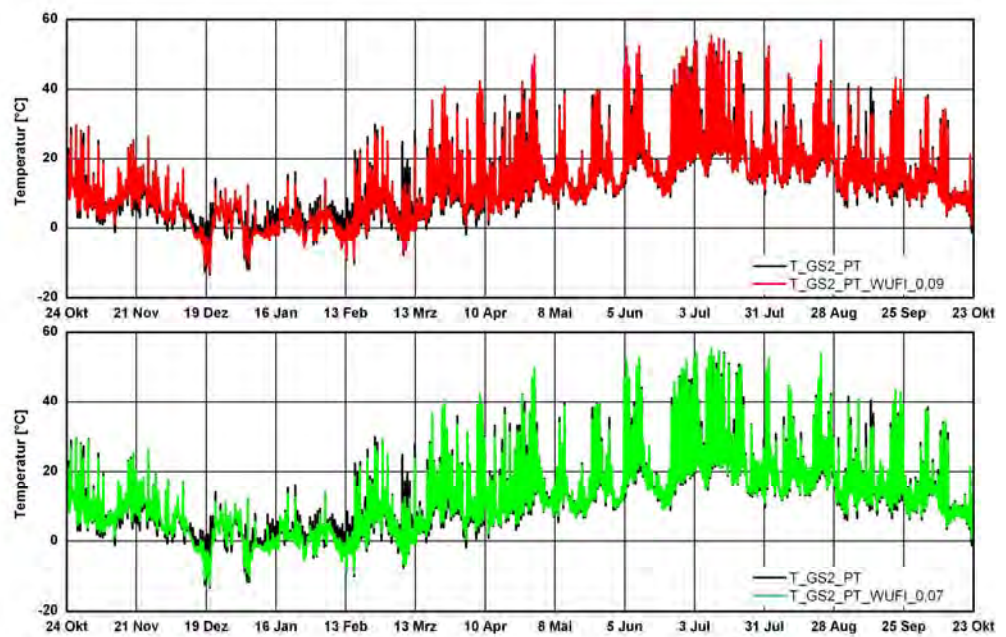


Bild 7:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Grenzschicht 2 der Konstruktion der Firma Tschopp/Isofloc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

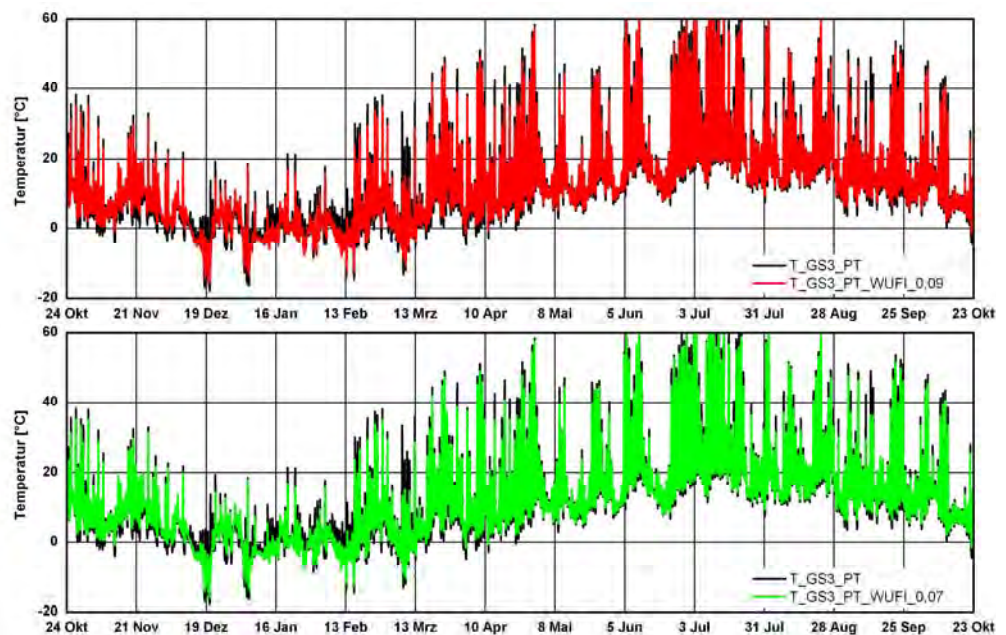


Bild 8:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Grenzschicht 3 der Konstruktion der Firma Tschopp/Isofloc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

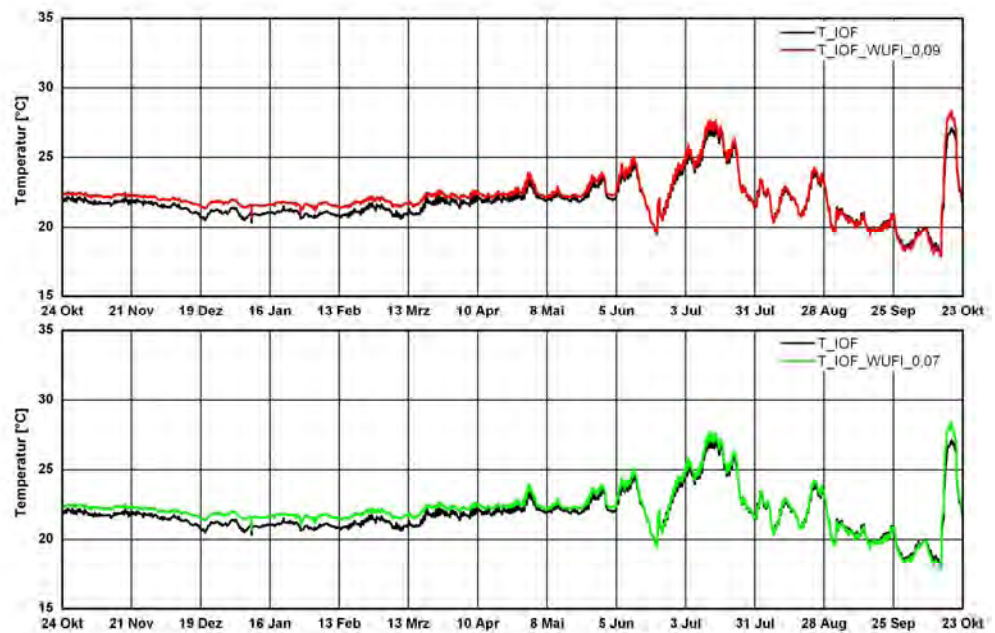


Bild 9:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der Konstruktion der Firma Tschopp/Isofloc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

In Bild 10 ist der zeitliche Verlauf der relativen Luftfeuchte an der Grenzschicht 2 dargestellt. Insgesamt ergibt sich eine ganz gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung, wobei auch hier das Ergebnis nahezu unbeeinflusst von der Absenkung der Wärmeleitfähigkeit des Brettstapels ist.

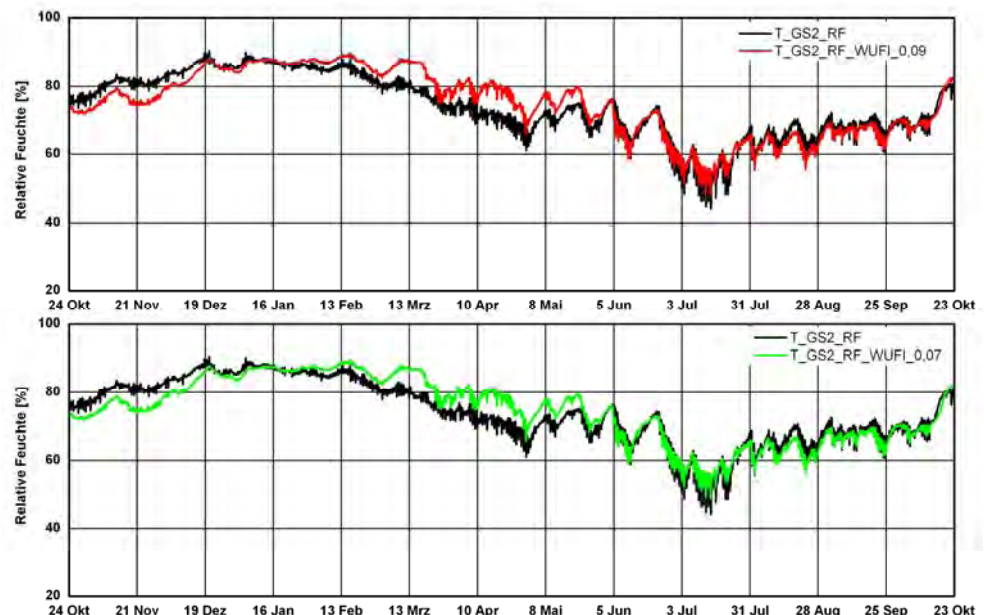


Bild 10:
Vergleich der berechneten und gemessenen Feuchteverläufe an der Grenzschicht 2 der Konstruktion der Firma Tschopp/Isofloc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

Auch die berechneten Wärmeströme stimmen in beiden Fällen gut mit den Messergebnissen überein, wie aus Bild 11 ersichtlich.

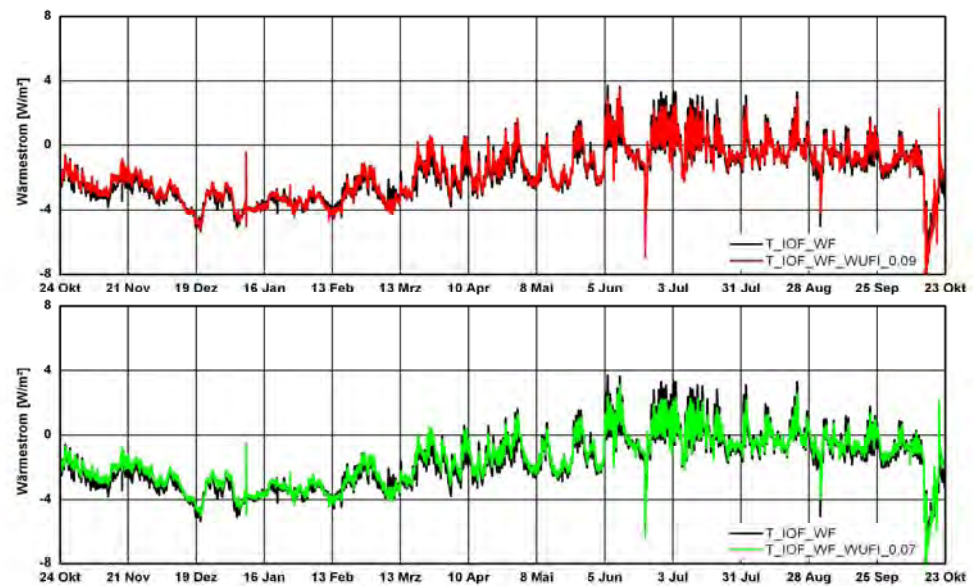


Bild 11:
Vergleich der berechneten und gemessenen Wärmeströme an der Innenoberfläche der Konstruktion der Firma Tschopp/Isofloc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

3.2 Gisler

Bild 12 oben zeigt den Verlauf der gemessenen Wärmeströme (schwarze Linie) im Vergleich zu dem mit den Standardmaterialkennwerten berechneten (rote Linie). Man erkennt deutlich, dass sich rechnerisch in der Heizperiode wesentlich höhere Wärmeströme ergeben. Dies ist darin begründet, dass das geschlitzte Holz eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzen dürfte als Vollholz. Reduziert man die Wärmeleitfähigkeit des Holzes auf einen Trockenwert von 0,06 W/mK erhält man eine deutlich bessere Übereinstimmung, wie aus dem unteren Bild erkennbar (grüne bzw. blaue Linie).

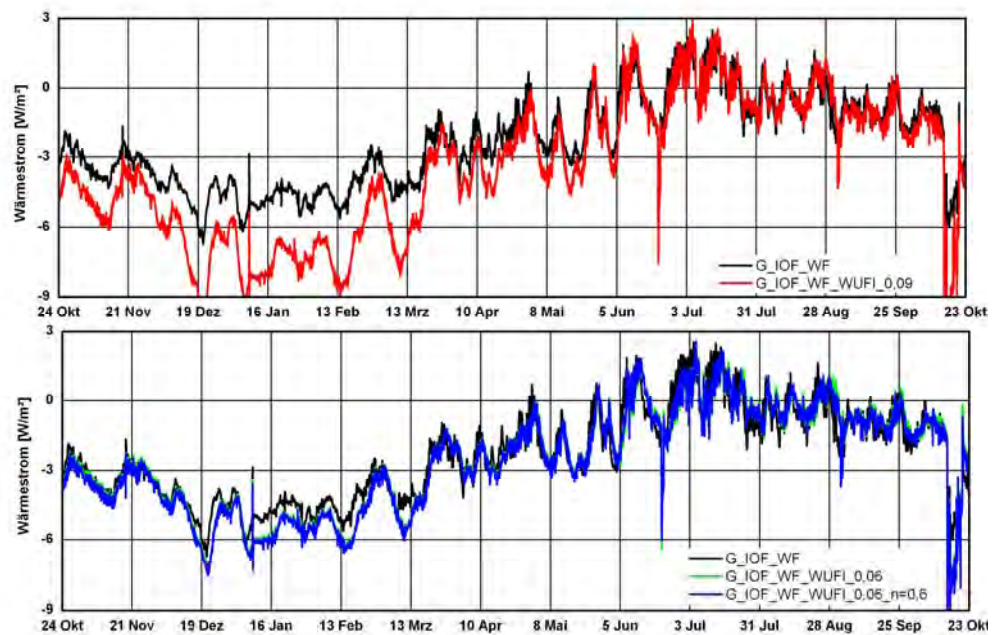


Bild 12:

Vergleich der berechneten und gemessenen Wärmeströme an der Innenoberfläche der Konstruktion der Firma Gisler bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

Der an der Grenzschicht 1 gemessene Verlauf der relativen Feuchte (schwarze Linie in Bild 13) zeigt geringfügige kurzzeitige Schwankungen und einen leichten Jahresgang. Diese geringen Schwankungen sind in der sehr hohen Feuchtepufferwirkung des Holzes begründet. Der berechnete Verlauf weist nahezu konstante Werte auf. Der Unterschied in den kurzzeitigen Schwankungen könnte darin begründet sein, dass als Feuchtespeicherfunktion die reine Adsorptionsisotherme ohne Hysterese angesetzt wird. Die durchgeführte Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Holzes beeinflusst das Ergebnis nicht (grüne Linie). Nur durch Ansetzen einer Undichtheit (hier mit einem Volumenstrom von $0,07 \text{ m}^3/\text{h}$ angenommen) kann rechnerisch ein leichter Jahresgang erreicht werden. Diese geringe Undichtheit beeinflusst aber nicht merklich den Wärmedurchgang der Konstruktion (siehe blaue Linie in Bild 12).

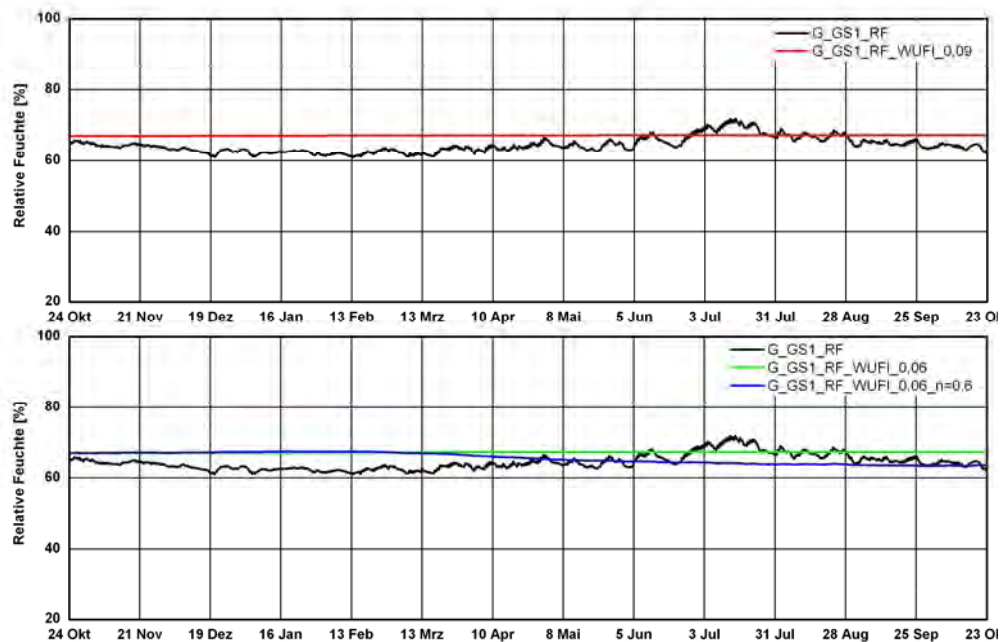


Bild 13:
Vergleich der berechneten und gemessenen Feuchten an der Grenzschicht 1 der Konstruktion der Firma Gisler bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

Die Temperaturverläufe werden an allen drei Grenzschichten und an der Innenoberfläche bei der Berechnung mit sehr guter Übereinstimmung zur Messung wiedergegeben (Bild 15 bis Bild 17). Die durchgeführten Anpassungen haben darauf nur einen sehr untergeordneten Einfluss.

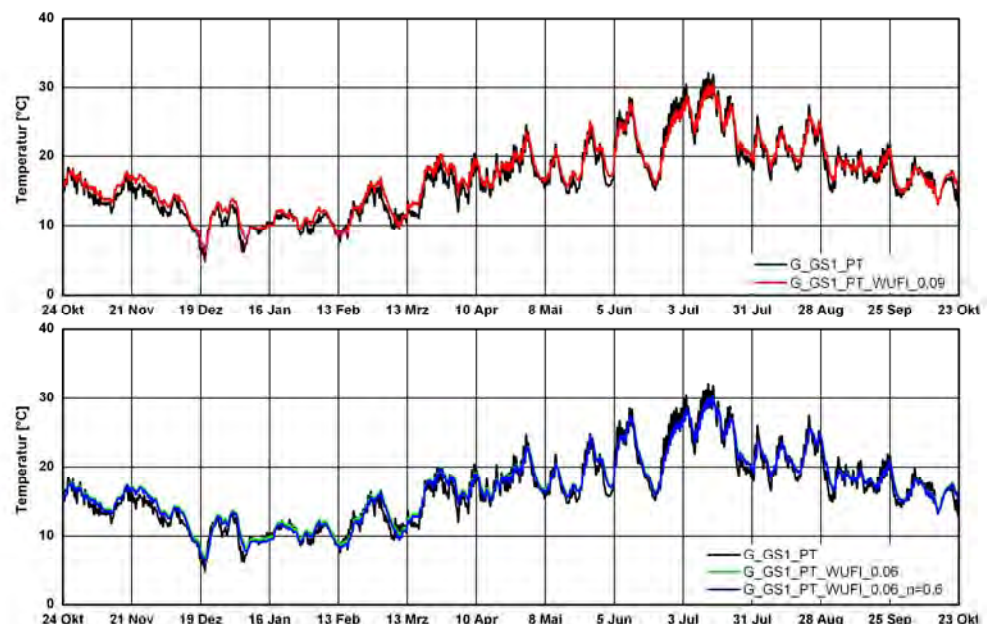


Bild 14:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Grenzschicht 1 der Konstruktion der Firma Gisler bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

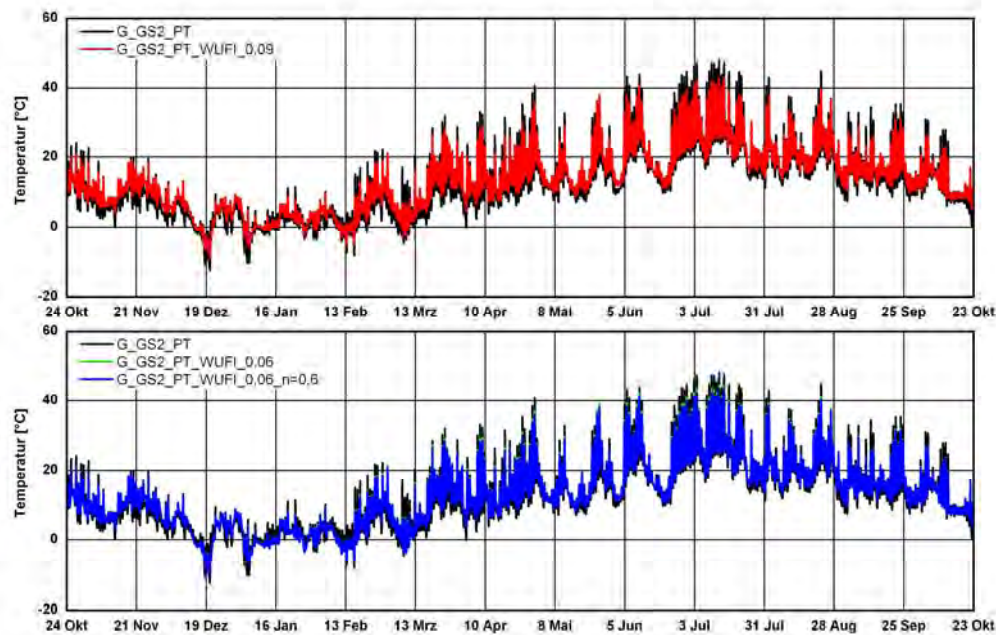


Bild 15:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Grenzschicht 2 der Konstruktion der Firma Gisler bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

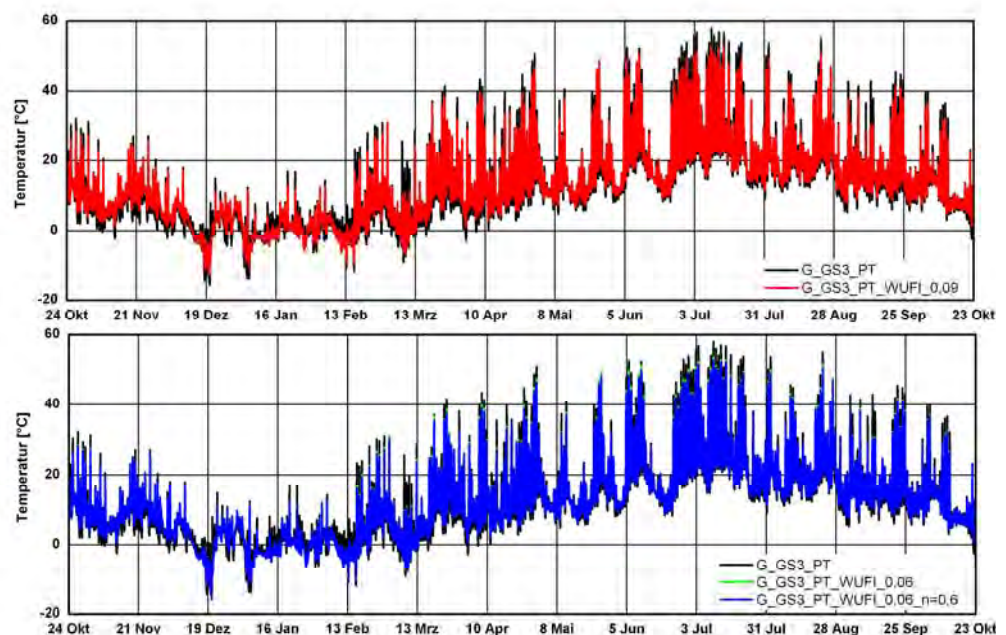


Bild 16:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Grenzschicht 3 der Konstruktion der Firma Gisler bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

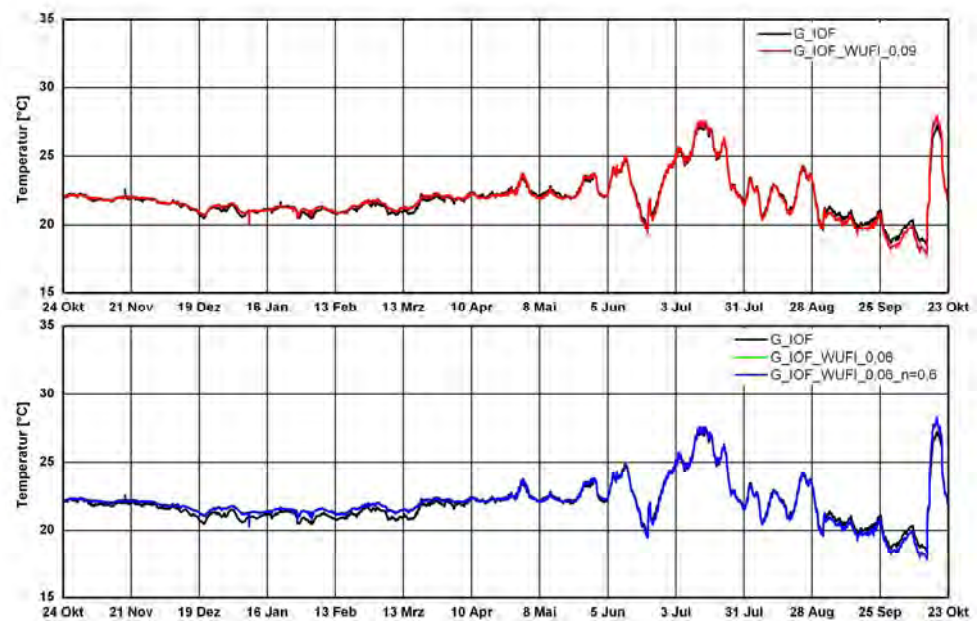


Bild 17:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der Konstruktion der Firma Gisler bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (oberes Bild) und mit angepassten Werten (unteres Bild).

3.3 Nägeli Konstruktion

In Bild 18 ist der zeitliche Verlauf der mit Standardkennwerten berechneten Luftfeuchte (rote Linie) und der Messung (schwarze Linie) dargestellt. Auch hier ergibt sich rechnerisch ein nahezu konstanter Verlauf, während die Messung neben kurzzeitigen Schwankungen einen merklichen Jahresgang aufweist. Durch eine Reduktion des Diffusionswiderstandes der Massivholzwand, die darin begründet ist, dass es sich um nicht verleimte Lagen von Holzbrettern handelt, und durch Annahme einer Undichtheit von außen mit einem mittleren Volumenstrom von $0,09 \text{ m}^3/\text{h}$ kann dieser Jahresgang in guter Übereinstimmung zu den Messungen rechnerisch nachvollzogen werden.

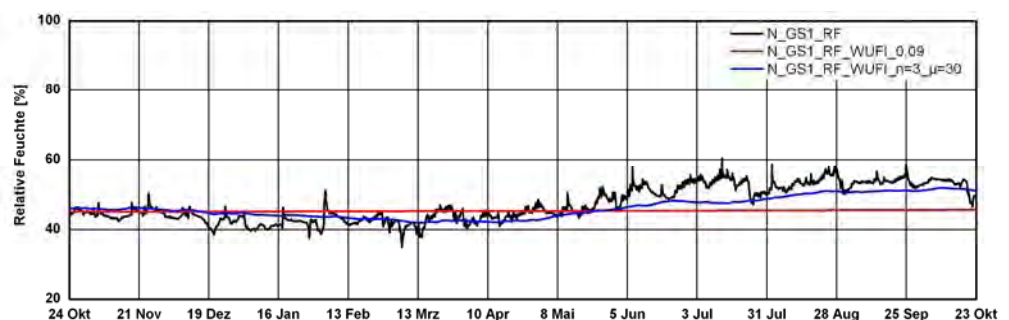


Bild 18:

Vergleich der berechneten und gemessenen Feuchteverläufe an der Grenzschicht 1 der Konstruktion der Firma Nägeli bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

Die Temperaturverläufe werden an allen zwei Grenzschichten und an der Innenoberfläche bei der Berechnung mit sehr guter Übereinstimmung zur Messung wiedergegeben (Bild 19 bis Bild 21). Die durchgeführten Anpassungen haben darauf nur einen sehr untergeordneten Einfluss.

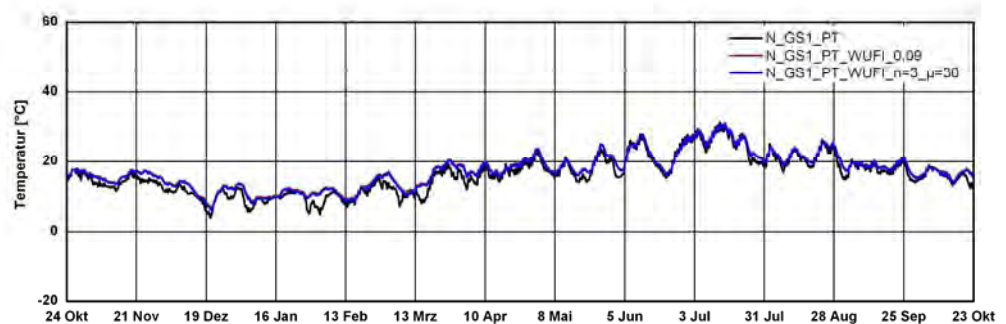


Bild 19:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Grenzschicht 1 der Konstruktion der Firma Nägeli bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

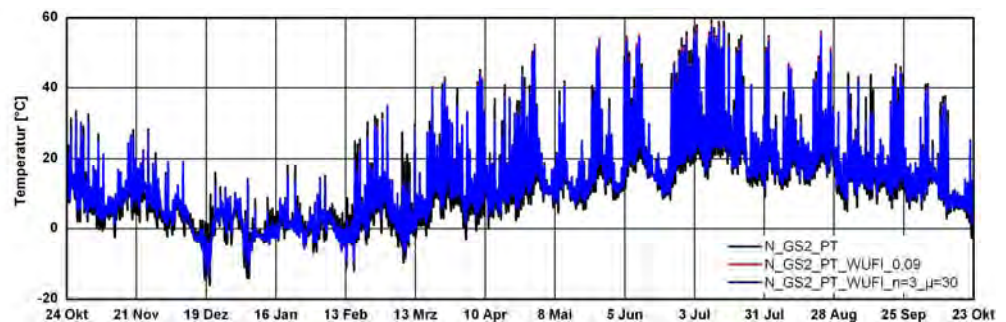


Bild 20:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Grenzschicht 2 der Konstruktion der Firma Nägeli bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

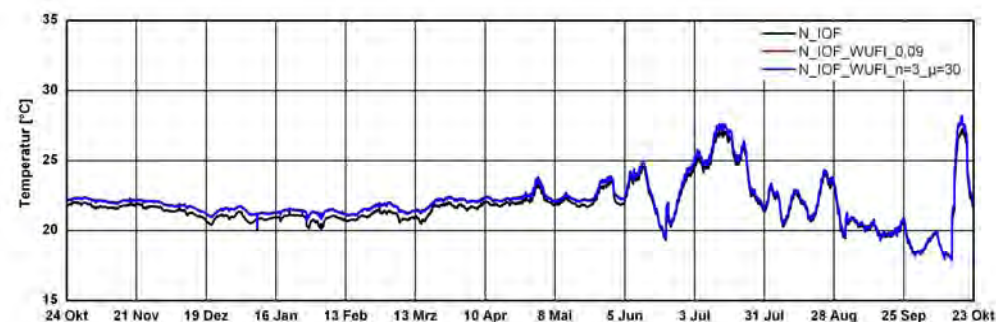


Bild 21:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der Konstruktion der Firma Nägeli bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

Auch bei den Wärmeströmen ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung, nahezu unabhängig von den durchgeführten Anpassungen (Bild 22).

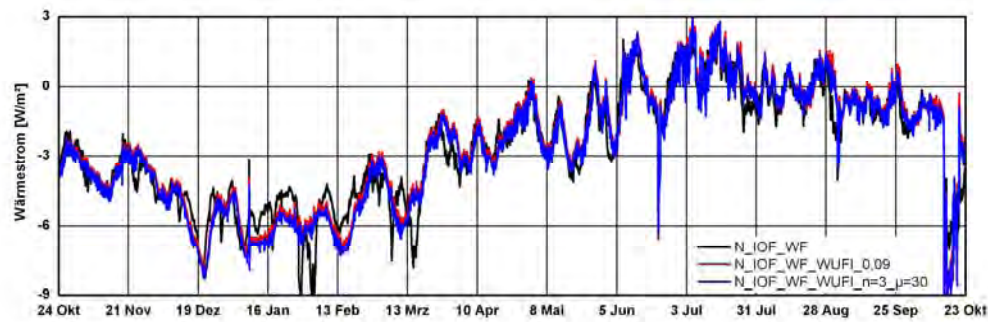


Bild 22:
Vergleich der berechneten und gemessenen Wärmeströme der Konstruktion an der Innenoberfläche der Firma Nägeli bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

3.4 Schuler/Flumroc

In Bild 23 ist der zeitliche Verlauf der mit Standardkennwerten berechneten Luftfeuchte (rote Linie) und der Messung (schwarze Linie) dargestellt. Die Messungen zeigen wesentlich größere kurzzeitige Schwankungen, was ähnlich begründet sein dürfte, wie bei den Ergebnissen der Wände der Firma Gisler. Allerdings ergibt sich rechnerisch vor allem im Frühjahr und Anfang des Sommers eine deutlich höhere Luftfeuchte als bei der Messung. Durch Annahme einer Undichtigkeit von außen mit einem mittleren Volumenstrom von $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$ kann dieser Jahresgang über die ganze Periode in guter Übereinstimmung zu den Messungen rechnerisch nachvollzogen werden.

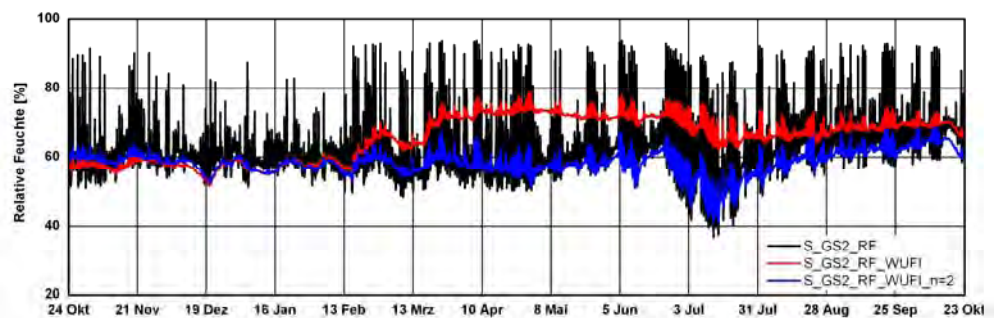


Bild 23:
Vergleich der berechneten und gemessenen Feuchteverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 2 der Firma Schuler/Flumroc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

Die Temperaturverläufe werden an allen vier Grenzschichten und an der Innenoberfläche bei der Berechnung mit sehr guter Übereinstimmung zur Messung wiedergegeben (Bild 24 bis Bild 28). Die durchgeführten Anpassungen haben darauf nur einen sehr untergeordneten Einfluss.

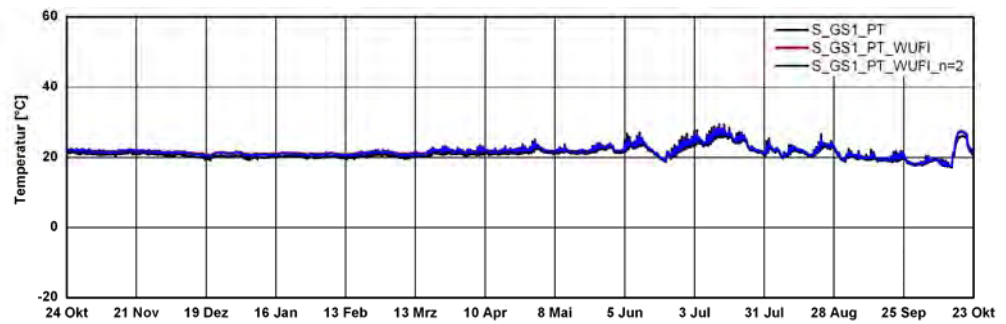


Bild 24:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 1 der Firma Schuler/Flumroc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

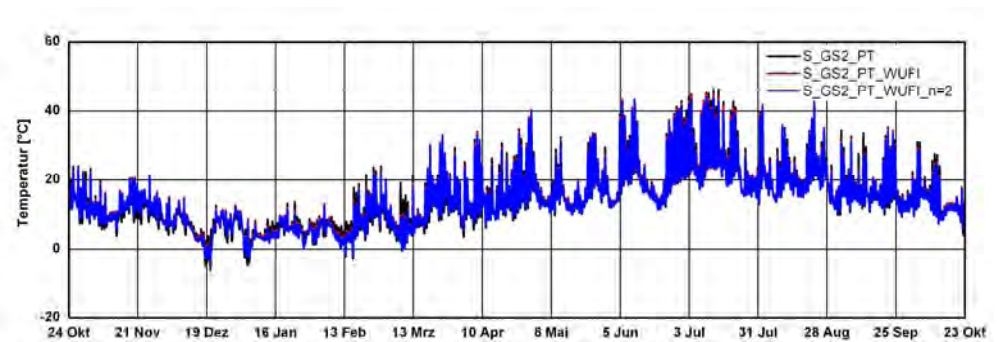


Bild 25:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 2 der Firma Schuler/Flumroc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

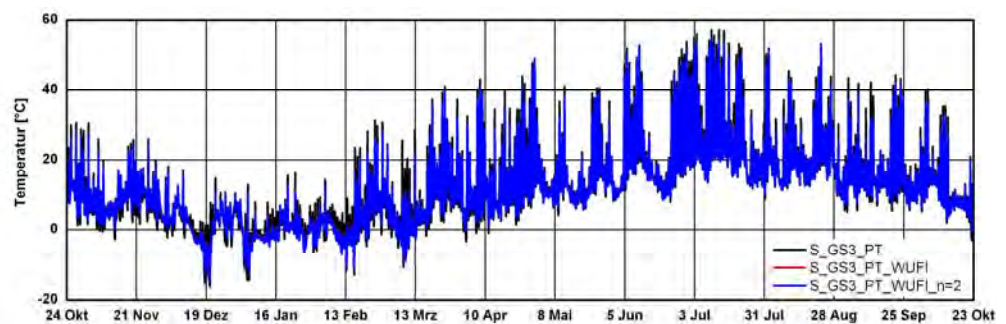


Bild 26:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 3 der Firma Schuler/Flumroc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

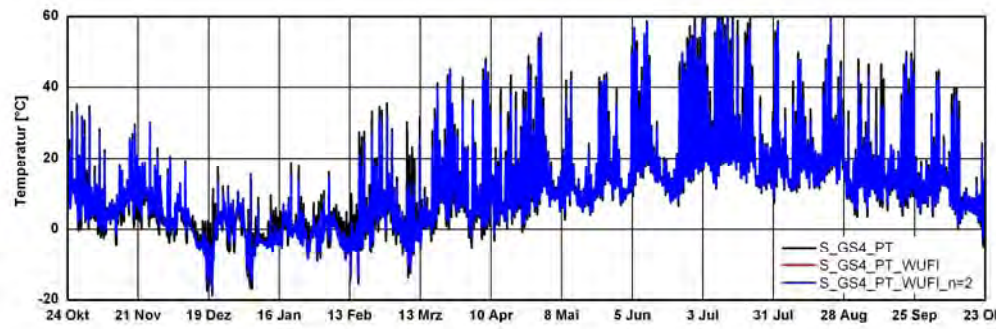


Bild 27:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 4 der Firma Schuler/Flumroc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

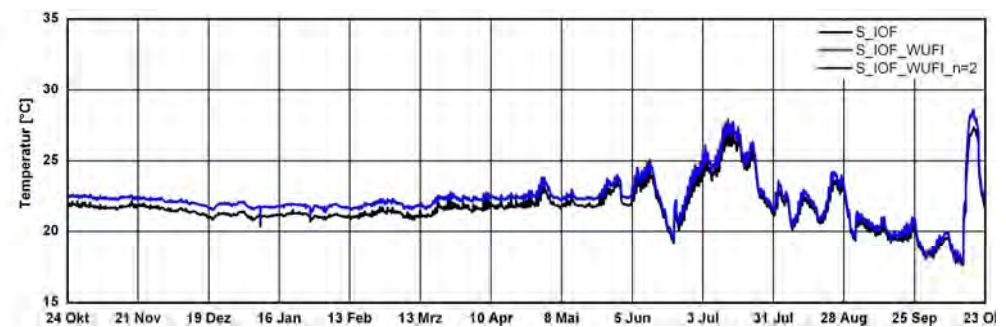


Bild 28:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Innenoberfläche der Firma Schuler/Flumroc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

Auch bei den Wärmeströmen ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung, nahezu unabhängig von den durchgeführten Anpassungen (Bild 29).

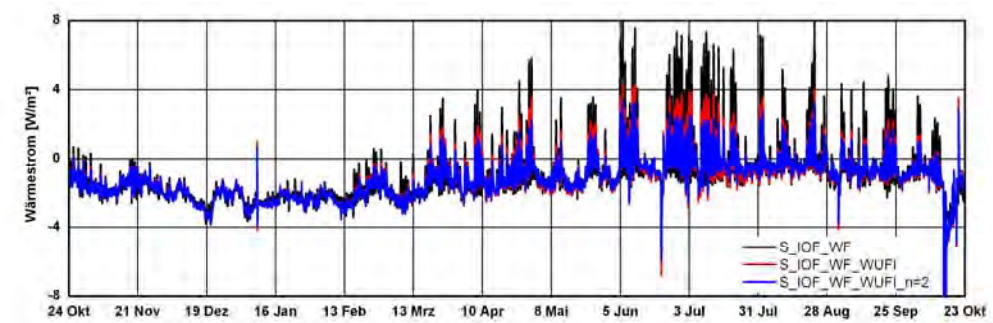


Bild 29:
Vergleich der berechneten und gemessenen Wärmeströme der Konstruktion an der Innenoberfläche der Firma Schuler/Flumroc bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

3.5 Pavatex

In Bild 30 ist der zeitliche Verlauf der mit Standardkennwerten berechneten Luftfeuchte (rote Linie) und der Messung (schwarze Linie) an der Grenzschicht 3 und 4 dargestellt. Sowohl die gemessenen Feuchte- und Temperaturverläufe als auch die Berechnungen zeigen, dass bei der Zuordnung der Messfühler die Grenzschichten 3 und 4 vertauscht wurden. Dies wurde im Folgenden entsprechend berücksichtigt. Die Berechnungen mit den Standardkennwerten (rote Linien) ergeben an beiden Stellen durchgängig etwas geringere Luftfeuchten als die Messungen. Dies dürfte darin begründet sein, dass durch das Verkleben der Holzweichfaserplatten zusätzliche Diffusionswiderstände hervorgerufen werden. Erhöht man den Diffusionswiderstand, ergibt sich vor allem im Winter eine wesentlich bessere Übereinstimmung. Nur in den Sommermonaten ist trotzdem weiterhin eine Abweichung mit zu niedrigen Werten im Vergleich zur Messung gegeben.

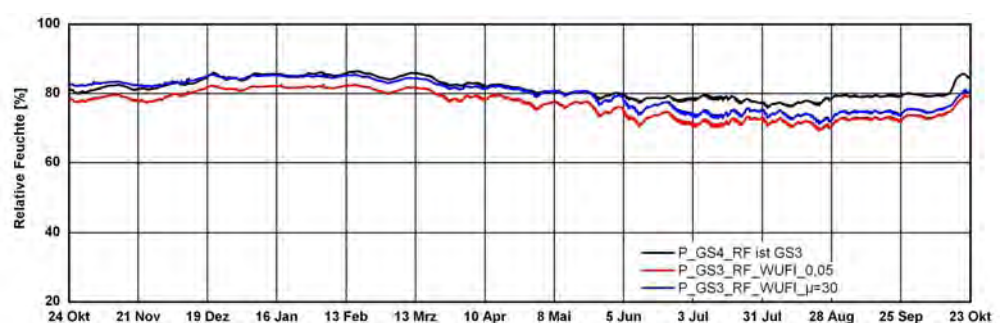


Bild 30:
Vergleich der berechneten und gemessenen Feuchteverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 3 der Firma Pavatex bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

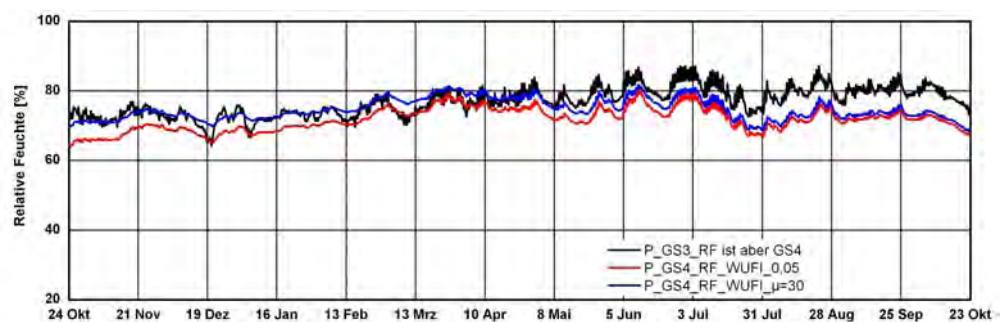


Bild 31:
Vergleich der berechneten und gemessenen Feuchteverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 4 der Firma Pavatex bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

Die Temperaturverläufe werden an allen fünf Grenzschichten bei der Berechnung mit sehr guter Übereinstimmung zur Messung wiedergegeben (Bild 32bis Bild 36). Die durchgeführten Anpassungen haben darauf nur einen sehr untergeordneten Einfluss.

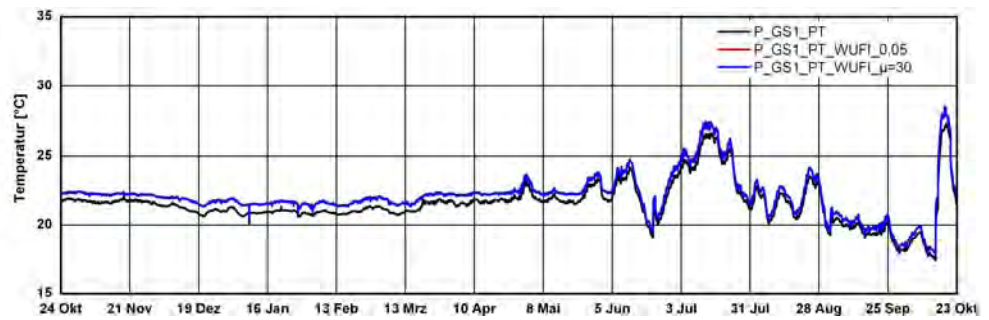


Bild 32:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 1 der Firma Pavatex bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

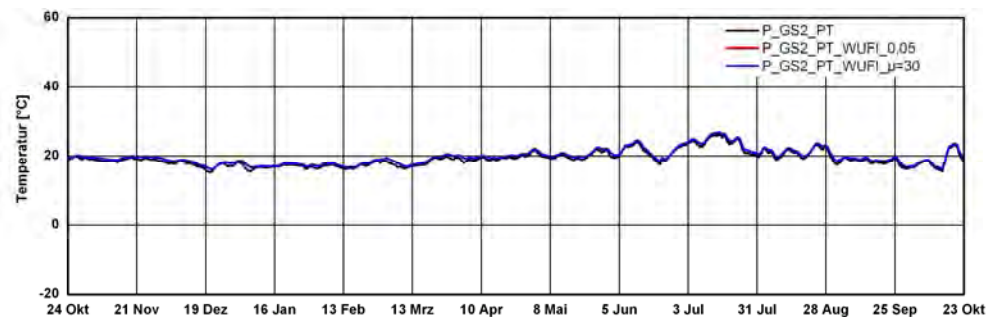


Bild 33:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 2 der Firma Pavatex bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

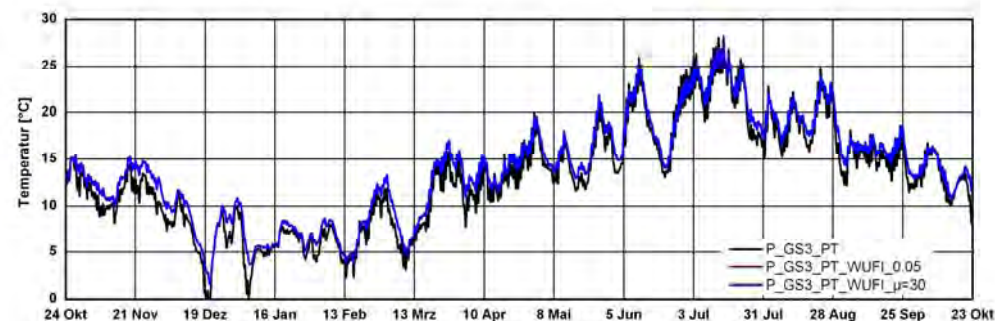


Bild 34:
Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 3 der Firma Pavatex bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

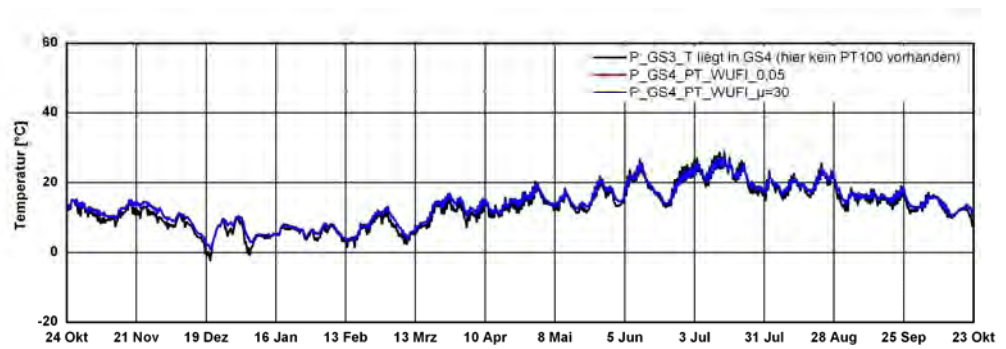


Bild 35:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 4 der Firma Pavatex bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

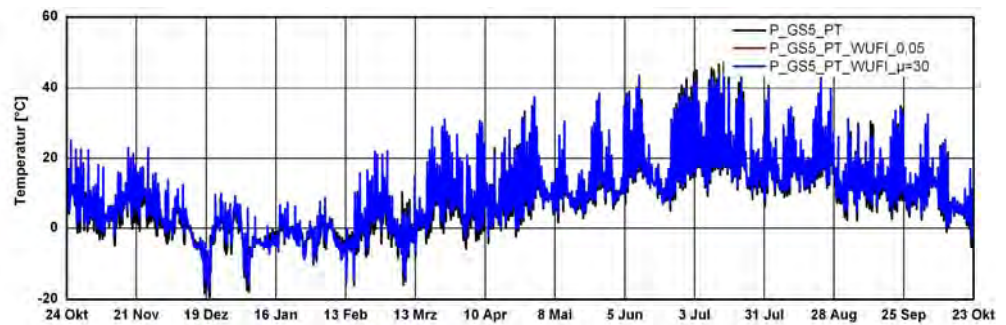


Bild 36:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe der Konstruktion an der Grenzschicht 5 der Firma Pavatex bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

Der berechnete Temperaturverlauf an der Innenoberfläche wird ebenfalls mit guter Übereinstimmung zur Messung wiedergegeben, lediglich in den Wintermonaten liegt er geringfügig höher (Bild 37). Die durchgeführten Anpassungen haben auch darauf nur einen sehr untergeordneten Einfluss.



Bild 37:

Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der Konstruktion der Firma Pavatex bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

Auch bei den Wärmeströmen ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung, nahezu unabhängig von den durchgeführten Anpassungen (Bild 38).

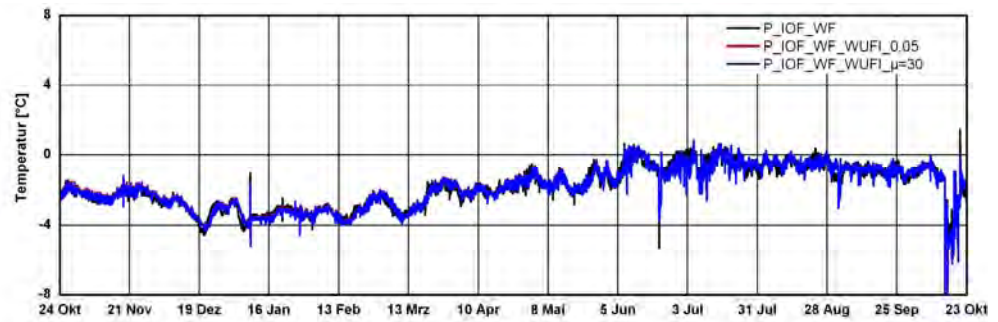


Bild 38:

Vergleich der berechneten und gemessenen Wärmeströme an der Innenoberfläche der Konstruktion der Firma Pavatex bei Berechnung mit Standardmaterialkennwerten (rote Linie) und mit angepassten Werten (blaue Linie).

4 Langzeitbetrachtung

Die Berechnungen für die Langzeitberechnungen basieren auf den Materialdateneingaben für die Validierungsberechnung und sind über einen Zeitraum von 10 Jahren durchgeführt worden. Als Außenklima wurde bei den Berechnungen das Klimajahr 1991 von Holzkirchen angesetzt, das als ein durchschnittliches Jahr gilt.

4.1 Tschopp/Isofloc

Bild 39 zeigt den langfristigen Verlauf der Temperatur (oben) und der Feuchte (unten) an der Grenzschicht 2. Während die Luftfeuchte geringfügig mit der Zeit abnimmt, ist beim Temperaturverlauf keine Zeitabhängigkeit erkennbar. Auch beim Wärmestrom (Bild 40) ist keine Zeitabhängigkeit erkennbar.

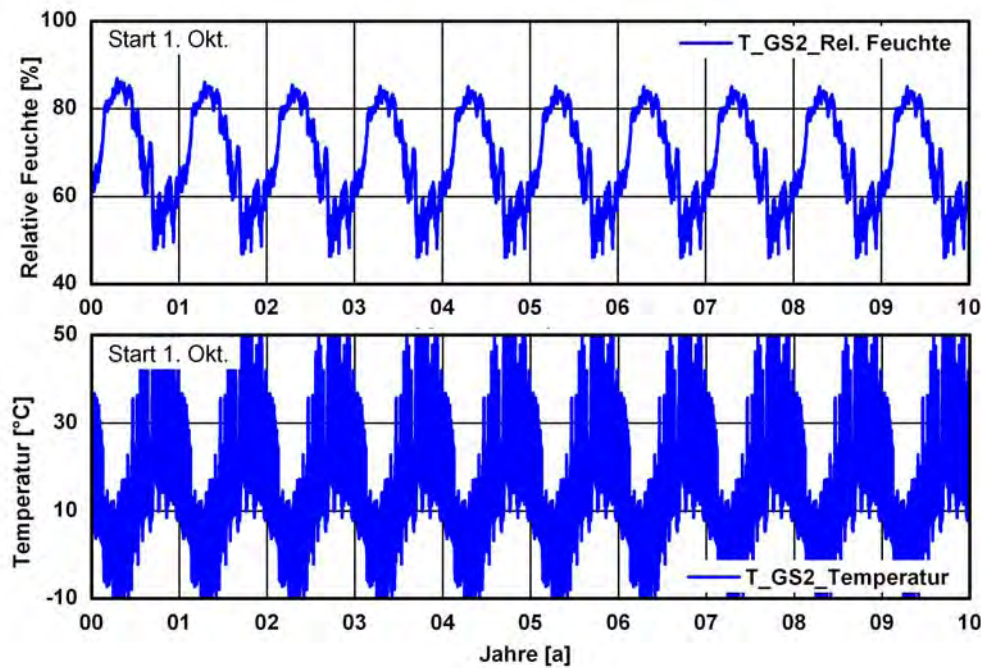


Bild 39:
Langzeitbetrachtung der Temperatur und Feuchte in Grenzschicht 2 über 10 Jahre beim Wand-
aufbau der Firma Tschopp/Isofloc.

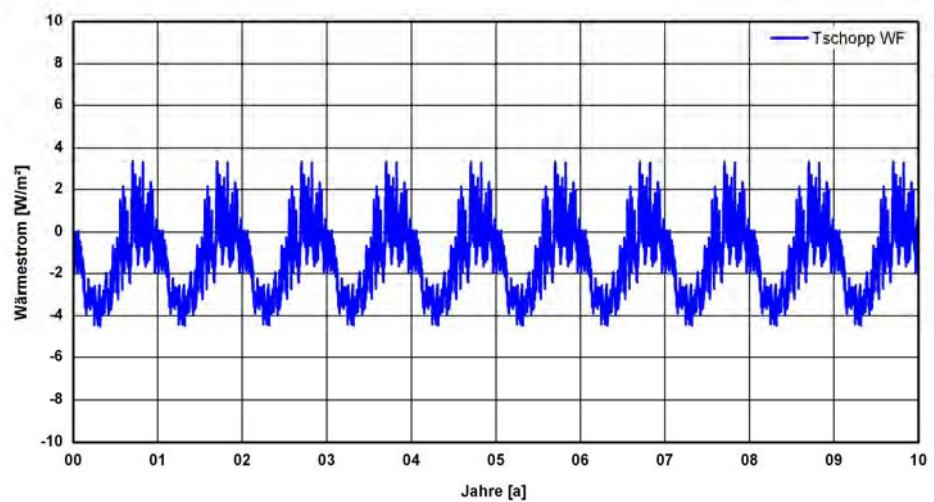


Bild 40:
Langzeitbetrachtung des Wärmestroms über 10 Jahre beim Wandaufbau der Firma
Tschopp/Isofloc.

4.2 Gisler

Bild 41 zeigt den langfristigen Verlauf der Temperatur (oben) und der Feuchte (unten) an der Grenzschicht 1. Hier ist eine deutliche Abnahme der Luftfeuchte in den ersten 3 Jahren erkennbar. Der Temperaturverlauf ändert sich dagegen kaum über die Jahre. Auch hier ist beim Wärmestrom (Bild 42) keine Zeitabhängigkeit erkennbar.

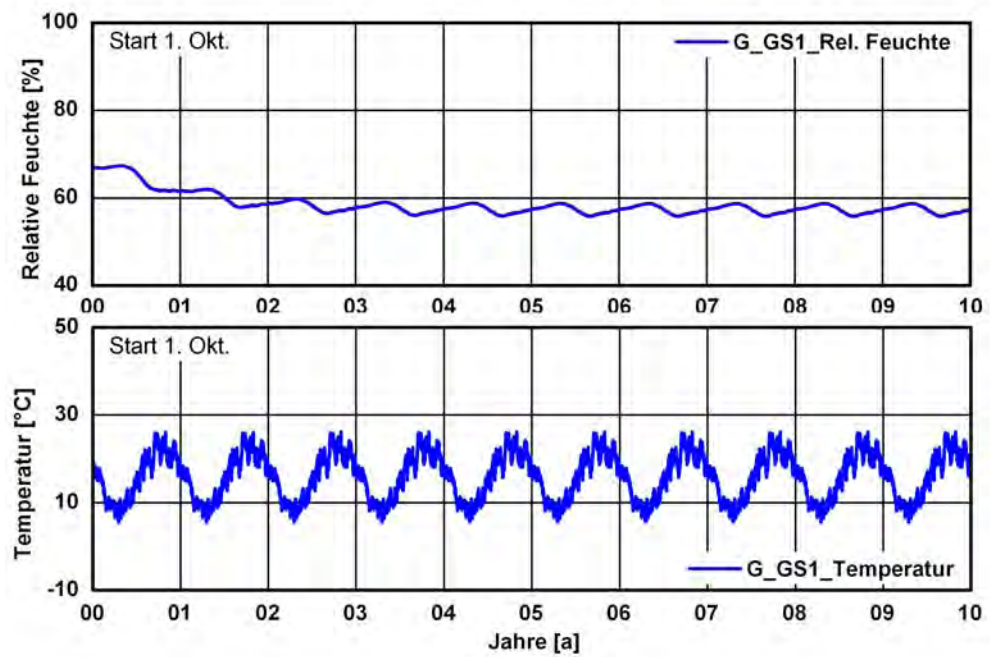


Bild 41:
Langzeitbetrachtung der Temperatur und Feuchte in Grenzschicht 1 über 10 Jahre beim Wandaufbau der Firma Gisler.

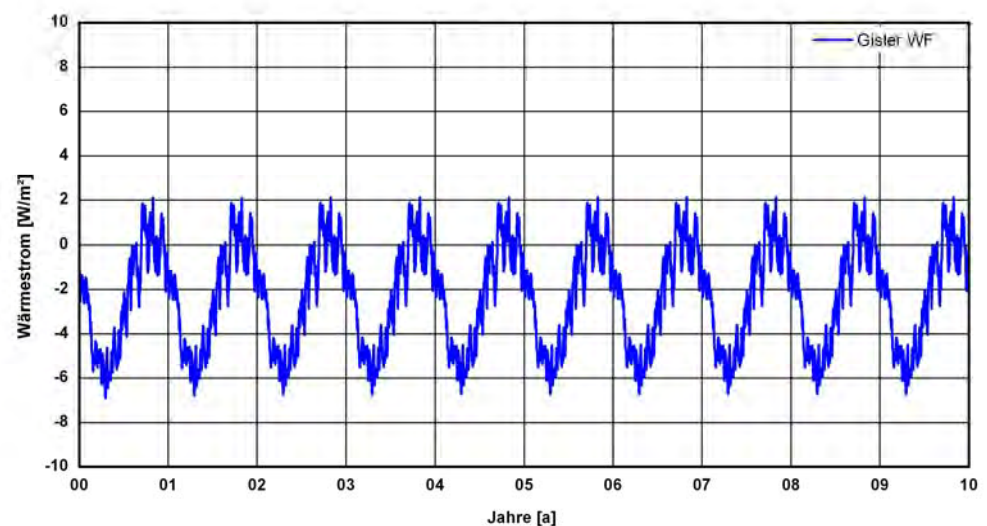


Bild 42:
Langzeitbetrachtung des Wärmestroms über 10 Jahre beim Wandaufbau der Firma Gisler.

4.3 Nägeli

Bild 43 zeigt den langfristigen Verlauf der Temperatur (oben) und der Feuchte (unten) an der Grenzschicht 1. Hier ist eine geringe und unkritische Zunahme der Luftfeuchte in den ersten 3 Jahren erkennbar. Der Temperaturverlauf ändert sich dagegen kaum, über die Jahre ist eine geringfügige Abnahme erkennbar. Auch hier ist beim Wärmestrom (Bild 44) keine Zeitabhängigkeit erkennbar.

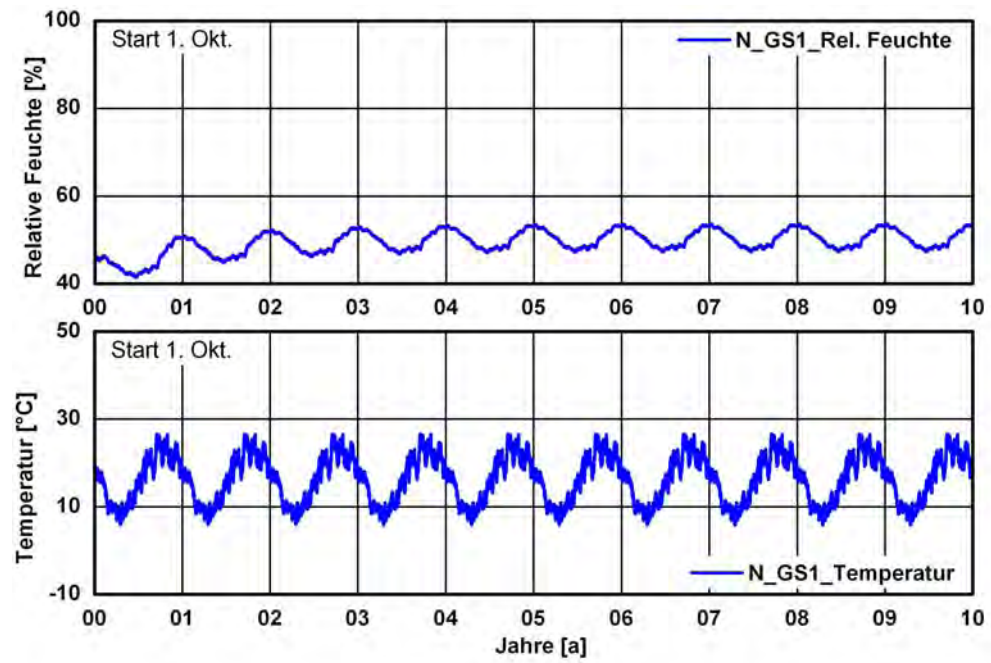


Bild 43:
Langzeitbetrachtung der Temperatur und Feuchte in Grenzschicht 1 über 10 Jahre beim Wandaufbau der Firma Nägeli.

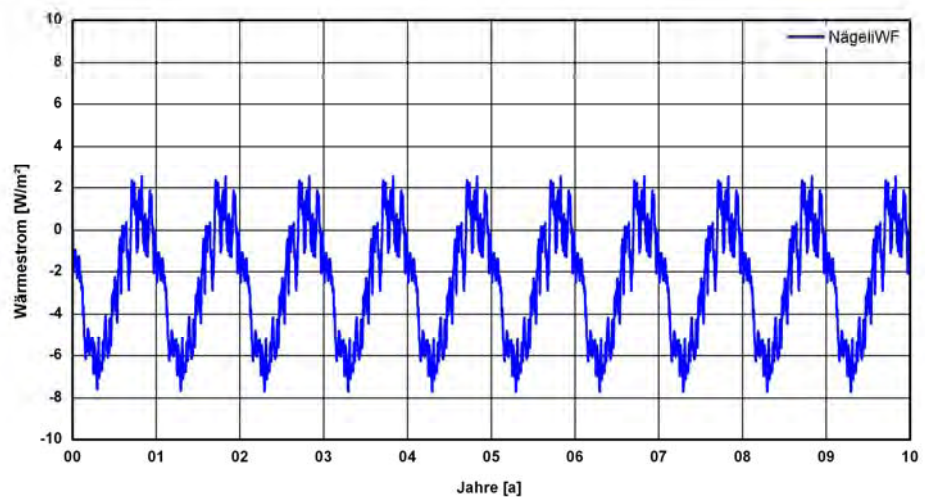


Bild 44:
Langzeitbetrachtung des Wärmestroms über 10 Jahre beim Wandaufbau der Firma Nägeli.

4.4 Schuler/Flumroc

Bild 45 zeigt den langfristigen Verlauf der Temperatur (oben) und der Feuchte (unten) an der Grenzschicht 2. Hier ist weder bei der Luftfeuchte noch bei der eine Zeitabhängigkeit zu beobachten. Auch beim Wärmestrom (Bild 46) ist keine Zeitabhängigkeit erkennbar.

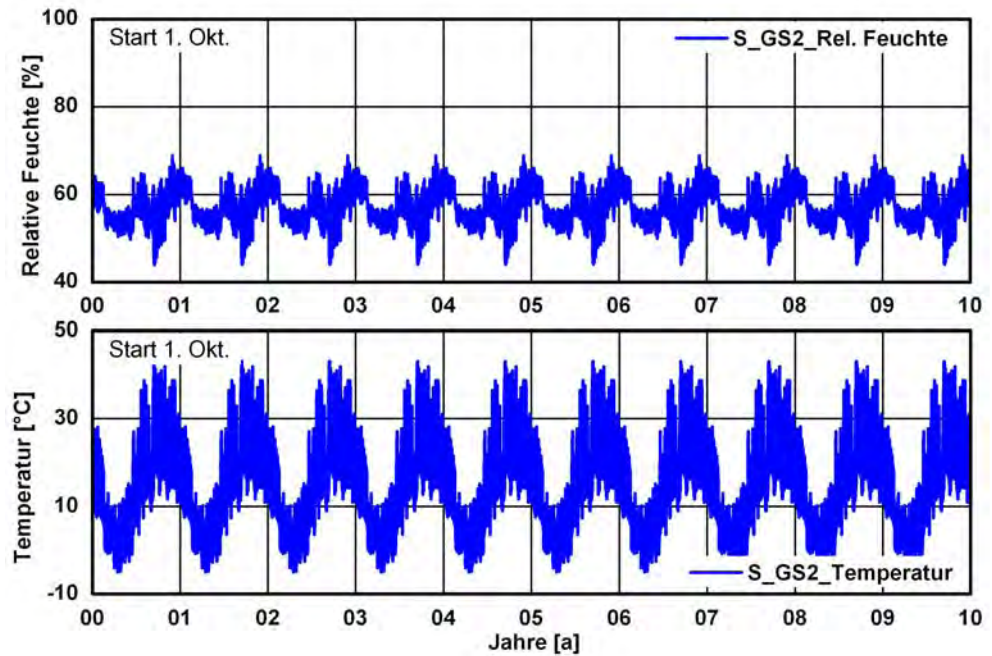


Bild 45:
Langzeitbetrachtung der Temperatur und Feuchte in Grenzschicht 2 über 10 Jahre beim Wandaufbau der Firma Schuler/Flumroc.

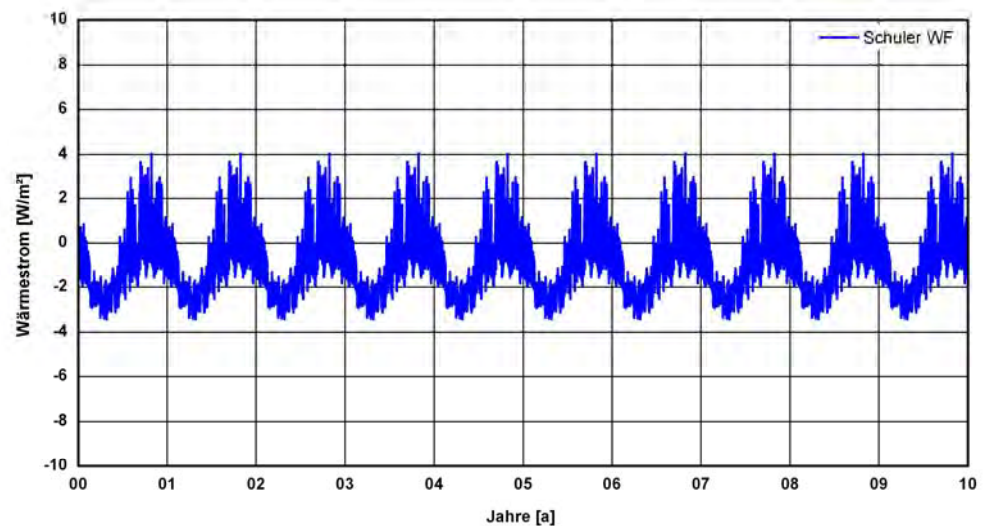


Bild 46:
Langzeitbetrachtung des Wärmestroms über 10 Jahre beim Wandaufbau der Firma Schuler/Flumroc.

4.5 Pavatex

Bild 47 zeigt den langfristigen Verlauf der Temperatur (oben) und der Feuchte (unten) an den Grenzschichten 3 und 4. Die Temperaturen verlaufen an beiden Grenzschichten nahezu deckungsgleich mit keinerlei Zeitabhängigkeit. Ganz anders sieht es bei den Feuchten aus. Die Feuchten beider Grenzschichten sind deutlich zeitverschoben und weisen beide in den ersten zwei Jahren eine leichte Abnahme auf, wobei dieser Effekt an Grenzschicht 3 etwas ausgeprägter ist. Aber auch hier ist beim Wärmestrom (Bild 48) keine Zeitabhängigkeit erkennbar.

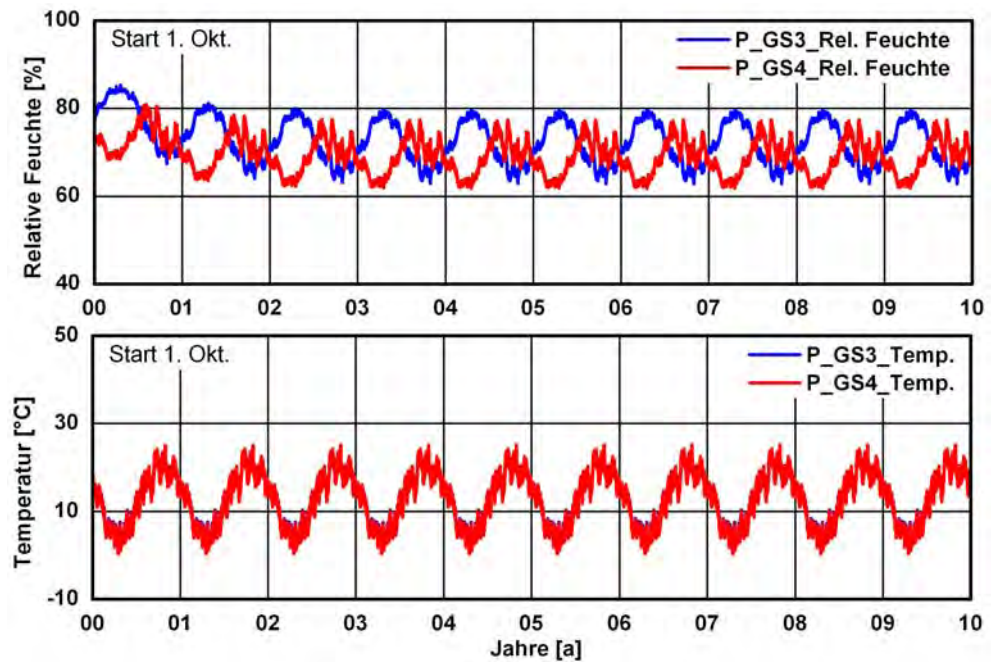


Bild 47:
Langzeitbetrachtung der Temperaturen und Feuchten in den Grenzschichten 3 und 4 über 10 Jahre beim Wandaufbau der Firma Pavatex.

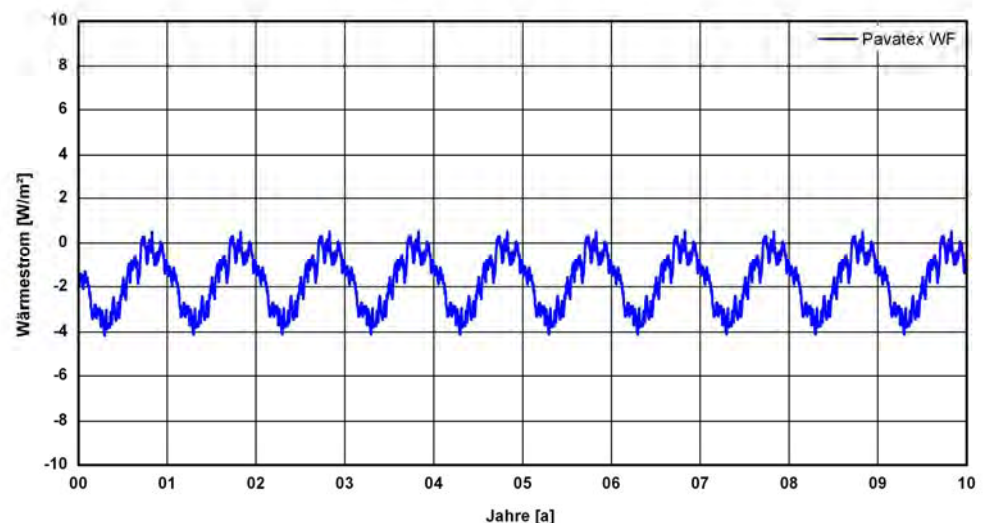


Bild 48:
Langzeitbetrachtung des Wärmestroms über 10 Jahre beim Wandaufbau der Firma Pavatex.

5 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Validierungsberechnungen mit dem Programm WUFI zeigen, dass es durch geringe Variationen der relevanten Materialkennwerte und durch die Implementierung zusätzlicher Luftströmungseffekte, die durch Undichtheiten der Konstruktionen auftreten können, im Wesentlichen zu einer guten Übereinstimmung zwischen Berechnungs- und Messergebnissen kommt. Eine Ausnahme bildet hier die Nachrechnung des Feuchteverlaufs der Konstruktion der Firma Gisler, bei der aber nur geringfügige Feuchteschwankungen bei insgesamt niedrigen Feuchten auftreten.

Aufgrund dieser guten Übereinstimmungen zwischen Messung und Rechnung ist zu erwarten, dass längerfristige Berechnungen das Verhalten der Konstruktionen korrekt wiedergeben. Deshalb werden auch Langzeitbetrachtungen der untersuchten Wandkonstruktionen durchgeführt, um das hygrothermische Verhalten über Jahre hinweg zu beurteilen. Bei diesen Berechnungen werden die gleichen Material- und Randbedingungen wie bei den Validierungsberechnungen zugrunde gelegt. Der betrachtete Zeitraum von 10 Jahren mit einem sich wiederholenden typischen Außenklima von Holzkirchen zeigt das bauphysikalische Verhalten der Konstruktionen über einen langen Zeitraum auf. Die Berechnungen ergeben beim Wandaufbau der Firma Tschopp/Isofloc eine leichte Abnahme der Feuchtigkeit bis nach ca. 2 Jahren ein eingeschwungener Zustand mit sich jahreszeitlich wiederholenden Feuchteschwankungen einstellt. Der Aufbau der Firma Gisler zeigt dagegen eine etwas deutliche Abnahme, wobei hier erst nach 3 bis 4 Jahren der eingeschwungene Zustand erreicht ist. Im Gegensatz dazu findet beim Wandaufbau der Firma Nägeli eine leichte Zunahme mit einem Erreichen des eingeschwungenen Zustandes nach ca. 3 Jahren statt. Bei der Ständerkonstruktion der Firma Schuler/Flumroc ist bereits sehr kurzfristig ein eingeschwungener Zustand erreicht, sodass hier keine Unterschiede zwischen den einzelnen berechneten Jahren zu beobachten sind. Das System Pavatex mit seinen auf Holzweichefaserplatten basierenden Dämmsteinen verhält sich diesbezüglich ganz ähnlich wie das System der Firma Tschopp/Isofloc.

In Bezug auf den Wärmestrom ergibt sich dagegen bei allen untersuchten Konstruktionen keine merkliche Änderung über die Jahre. Es ergeben sich weder bei den Messungen kritische Wassergehalte oder stetig ansteigende Feuchten noch lassen die langfristigen Berechnungen derartiges erwarten. Sofern die Konstruktionen so aufgeführt werden, wie sie den Messungen oder Berechnungen zugrunde liegen, sind diese aus feuchtetechnischer Sicht als unkritisch und funktionsfähig zu bewerten.

Anhang

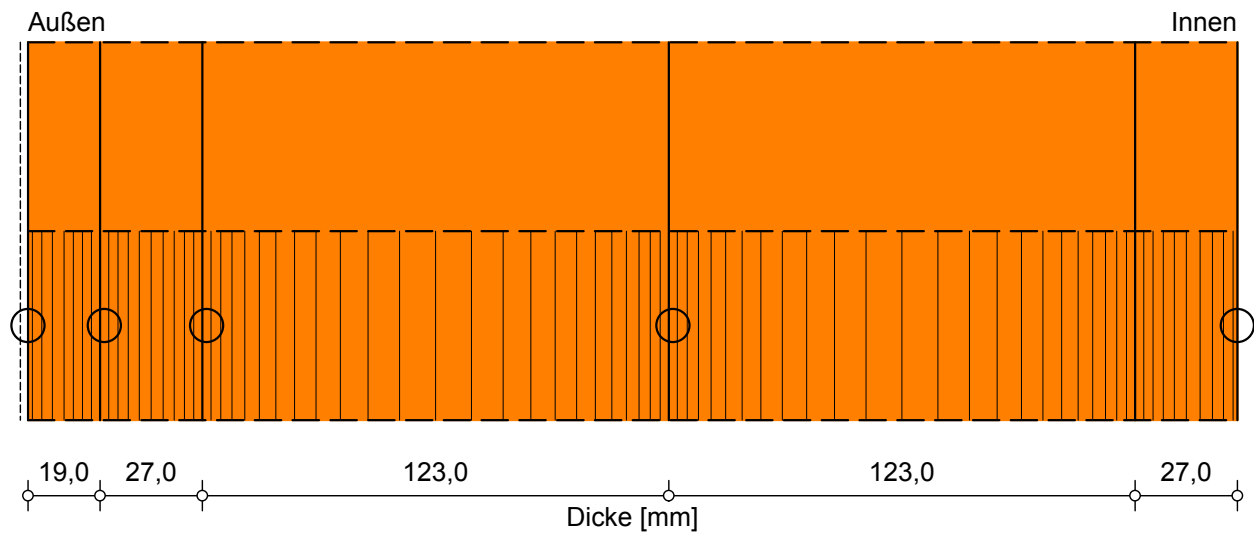
Erweiterter Anhang

Protokolle der WUFI-Berechnungen (29 Seiten)

Dokumente des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik
in Holzkirchen

Bauteilaufbau

Variante: Gisler TOLU-System



○ - Monitorpositionen

Materialien :



- Fichte radial



- Fichte radial



- *Fichte radial (entriegelt)



- *Fichte radial (entriegelt)



- Fichte radial

Sd-Wert außen [m]: 0,05

Gesamtdicke: 0,32 m

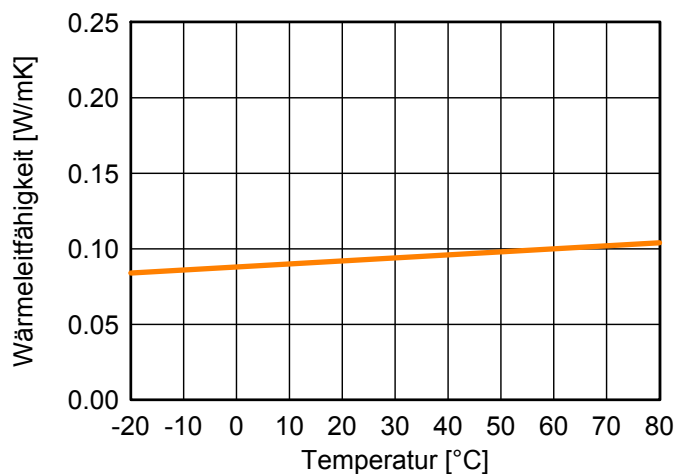
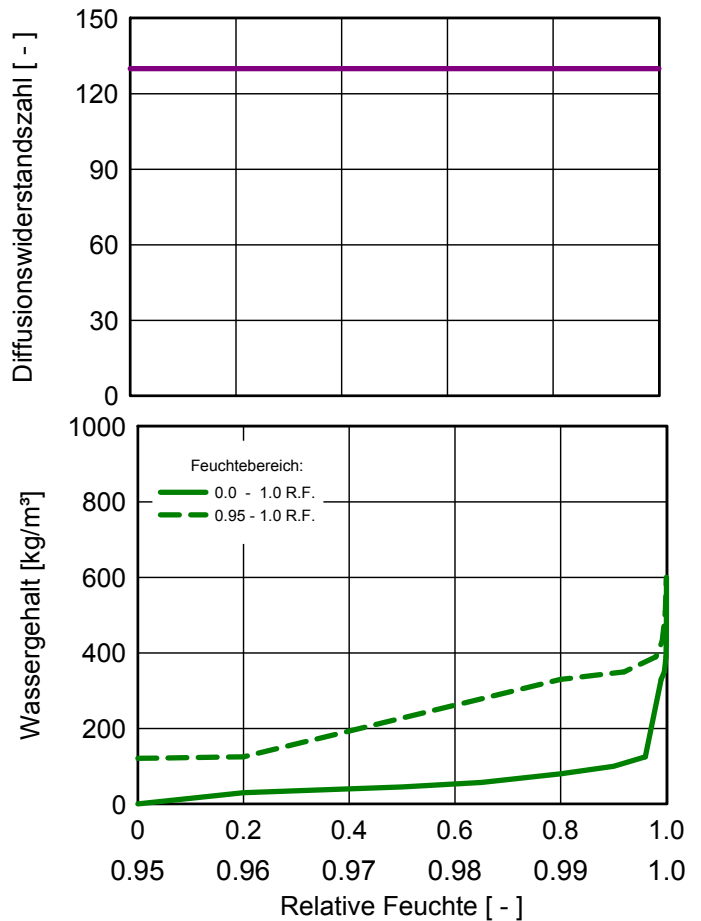
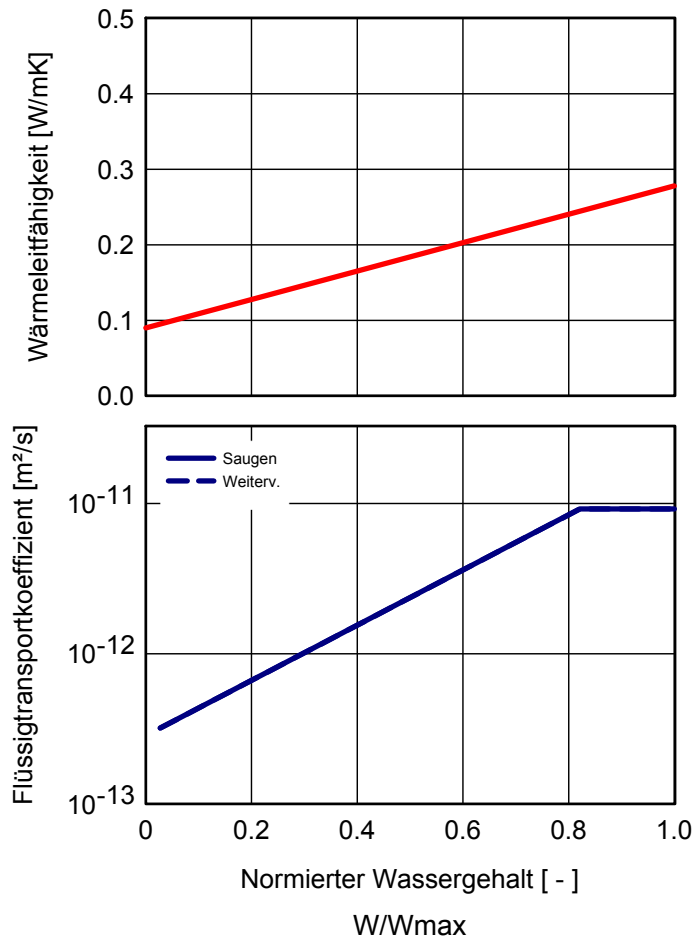
Wärmedurchlasswiderstand: 2,88 m²K/W

U-Wert: 0,323 W/m²K

Material : Fichte radial

Zusammenstellung der Rechengrößen

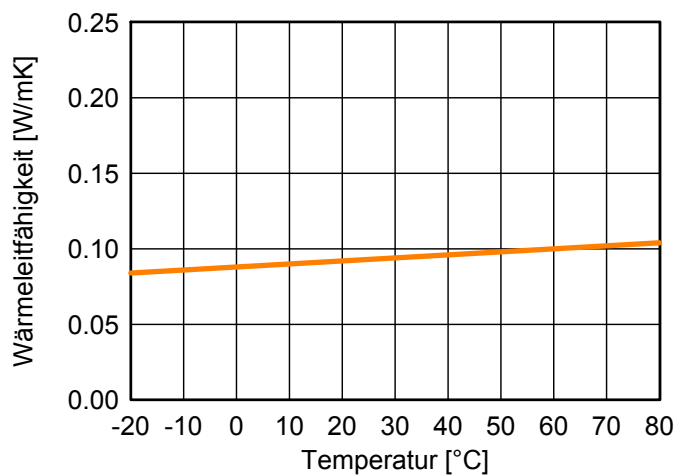
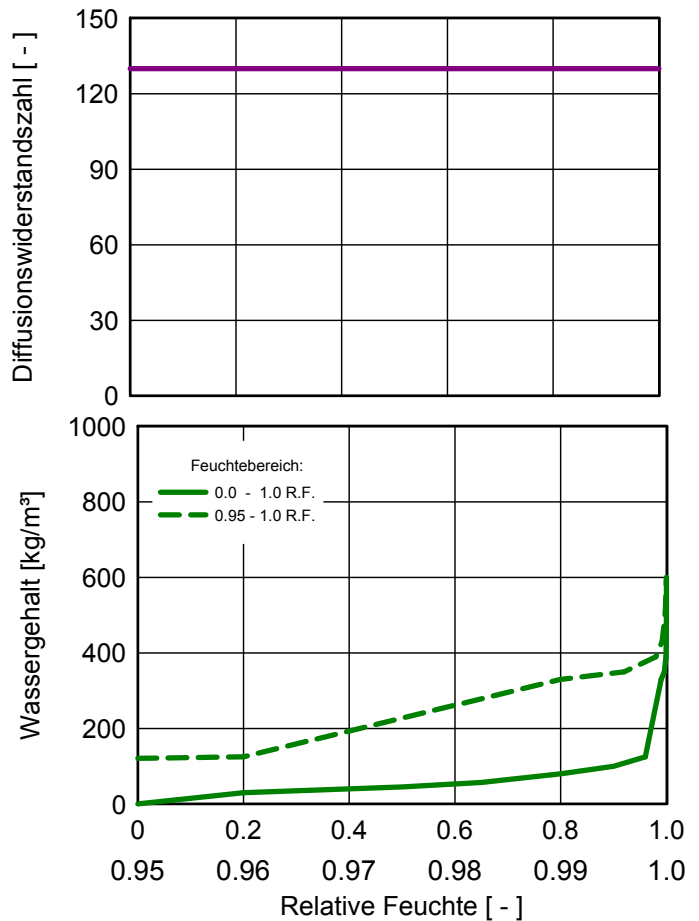
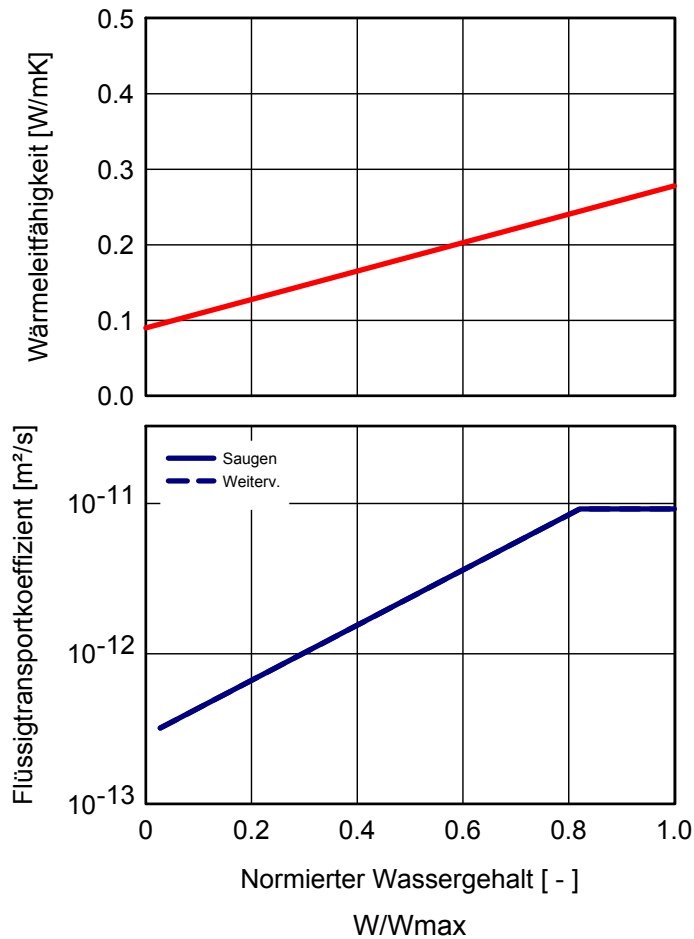
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	455,0
Porosität	[m³/m³]	0,73
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0,09
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	130,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	1,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : *Fichte radial (entriegelt)

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	455,0
Porosität	[m³/m³]	0,73
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0,09
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	130,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	1,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: IBP_Jan2009-Nov2010.WAC
Orientierung / Neigung: West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Klimaort: Innenklima-F8-Halle_ab260909.kli

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,09	
Sd-Wert	[m]	0,05	
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	[-]	0,7	Holz (Fichte) verwittert (silbergrau)
Langwellige Strahlungsemissionszahl	[-]	0,9	Holz (Fichte) verwittert (silbergrau)
Anhaftender Anteil des Regens	[-]	0,7	Gemäß Bauteiltyp/Neigung

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,125	
Sd-Wert	[m]	----	Keine Beschichtung

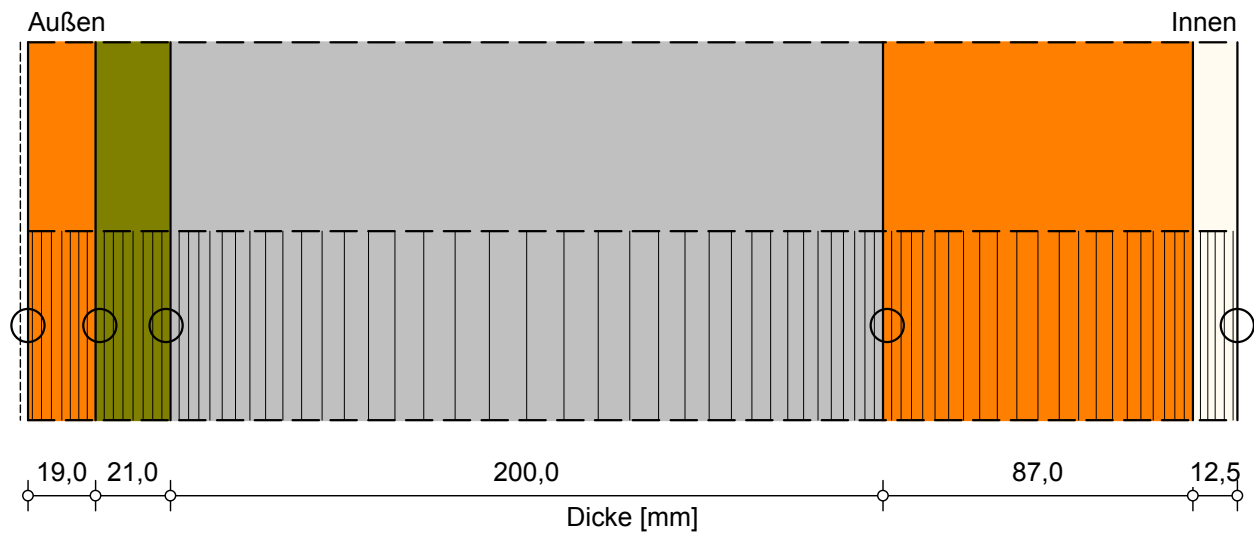
Explizite Strahlungsbilanz

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Wert
Eingeschaltet	nein

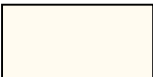
Bauteilaufbau

Variante: Tschopp Brettstapelholz



○ - Monitorpositionen

Materialien :

-  - Fichte radial
-  - Holzfaserdämmplatte (WLK 040)
-  - isofloc L
-  - *Fichte radial (entriegelt)
-  - Gipskartonplatte

Sd-Wert außen [m]: 0,05

Gesamtdicke: 0,34 m

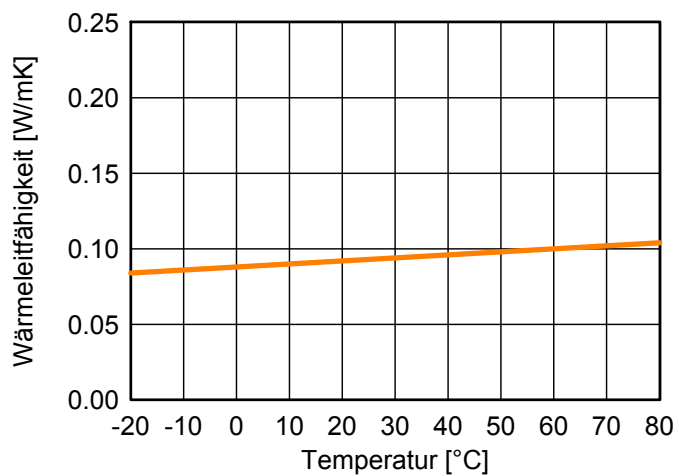
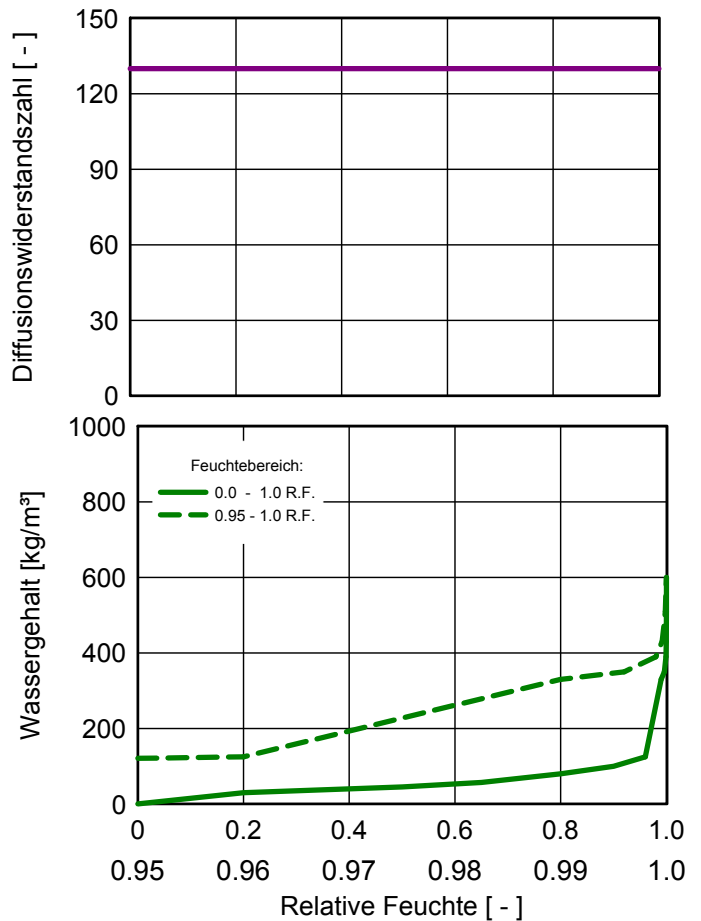
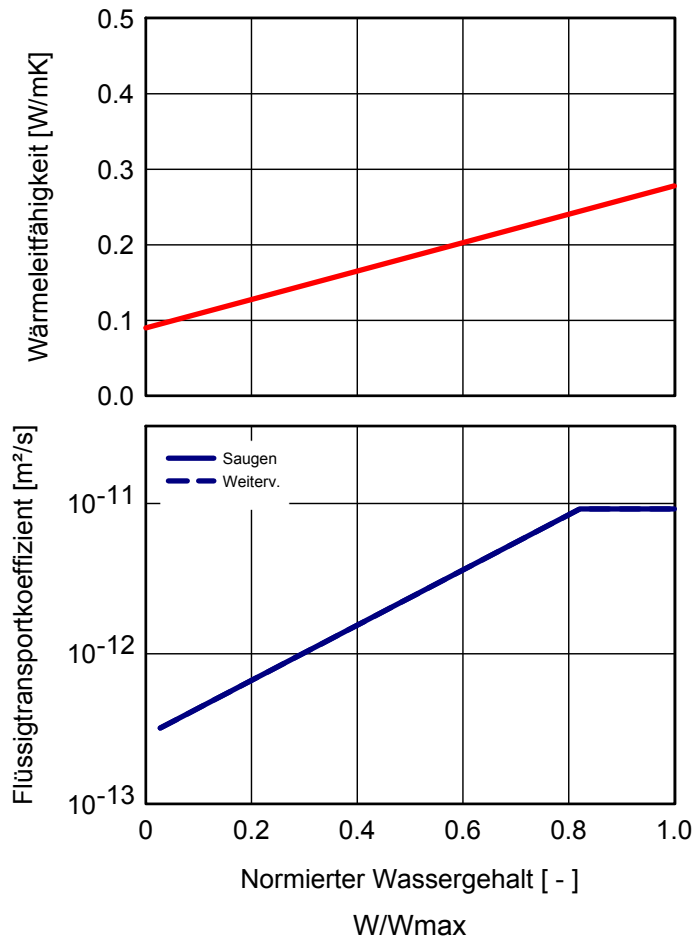
Wärmedurchlasswiderstand: 6,71 m²K/W

U-Wert: 0,145 W/m²K

Material : Fichte radial

Zusammenstellung der Rechengrößen

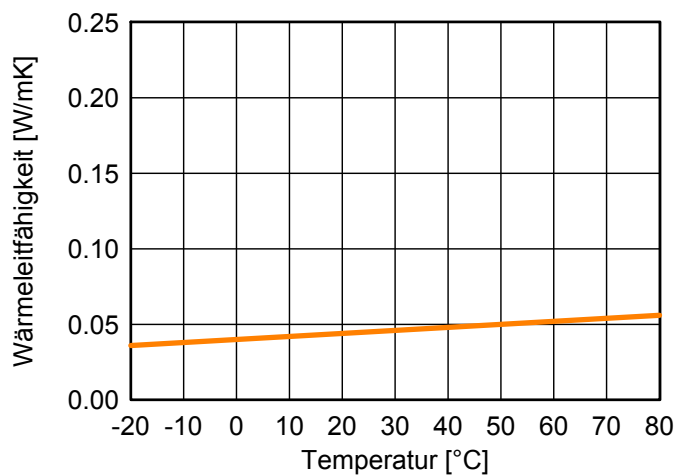
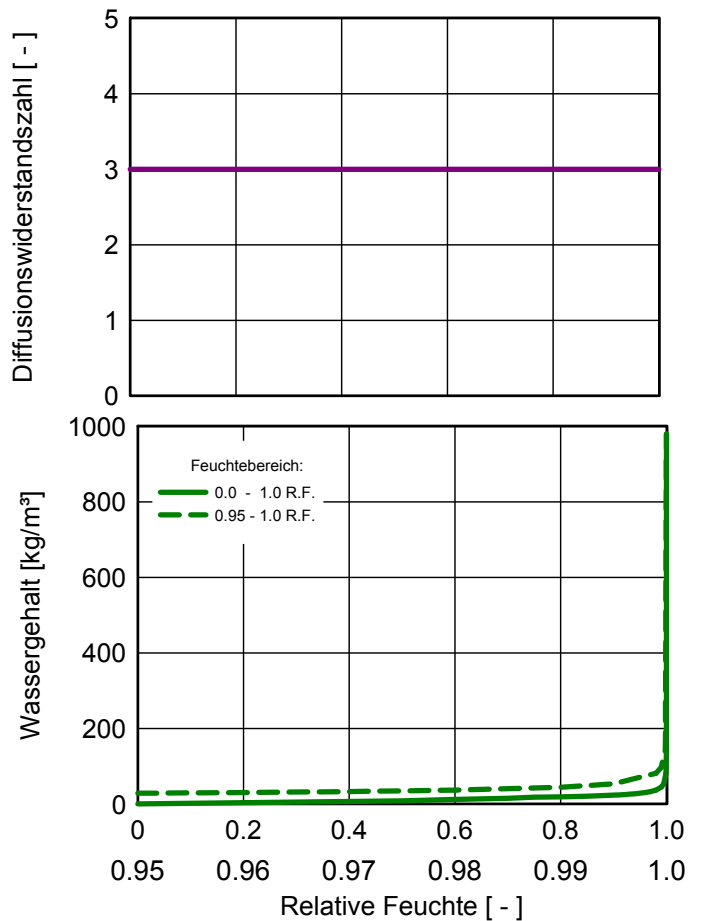
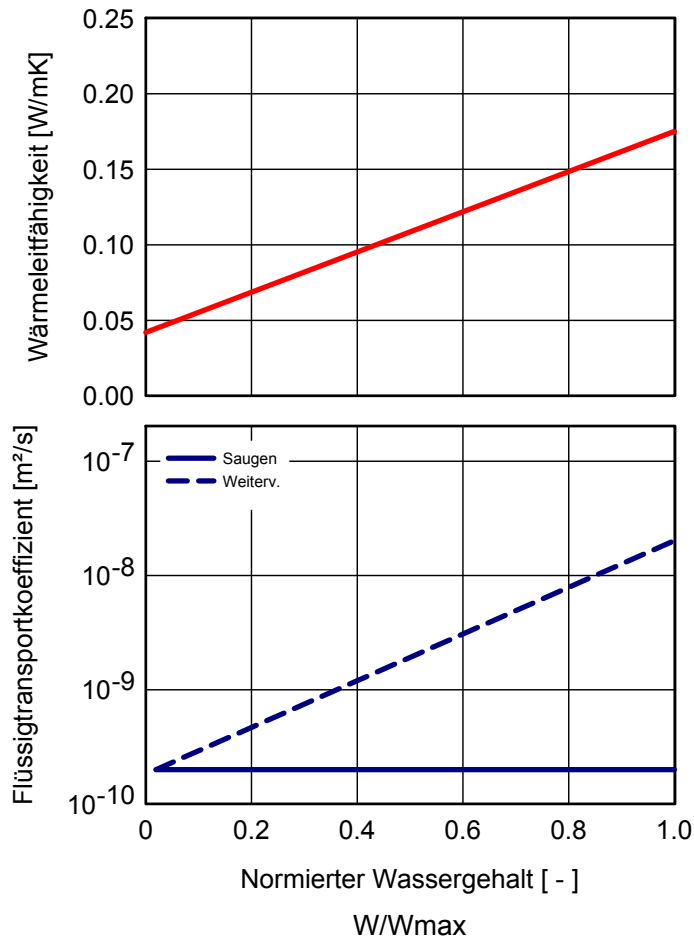
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	455,0
Porosität	[m³/m³]	0,73
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0,09
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	130,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	1,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : Holzfaserdämmplatte (WLG 040)

Zusammenstellung der Rechengrößen

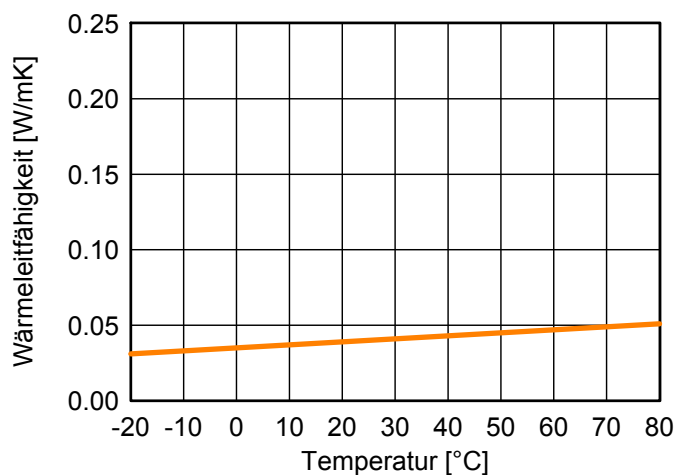
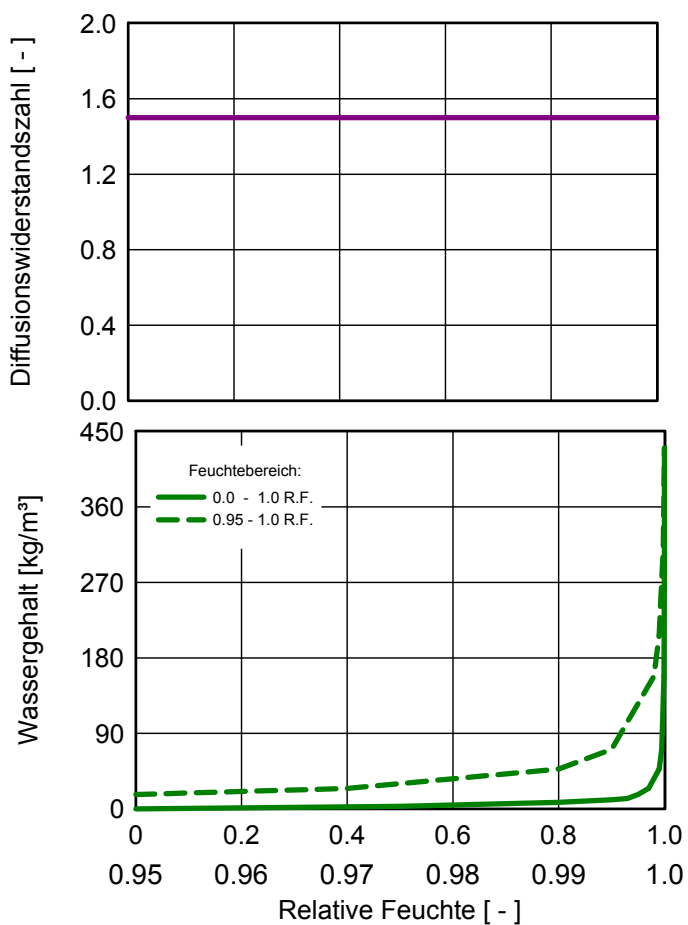
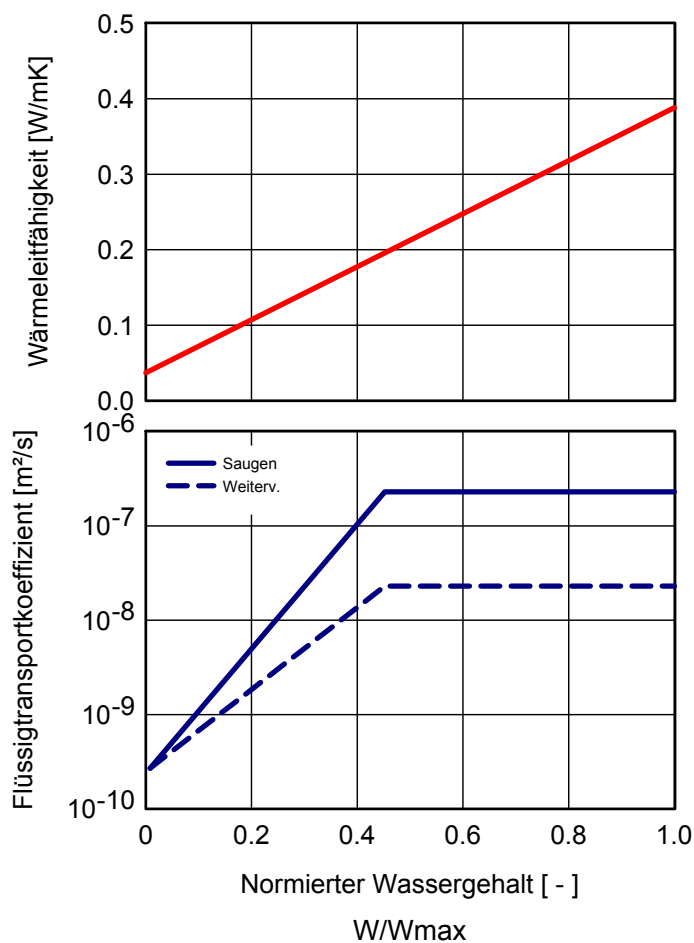
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	155,0
Porosität	[m³/m³]	0,981
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2000,0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0,042
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	3,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	0,5
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : isofloc L

Zusammenstellung der Rechengrößen

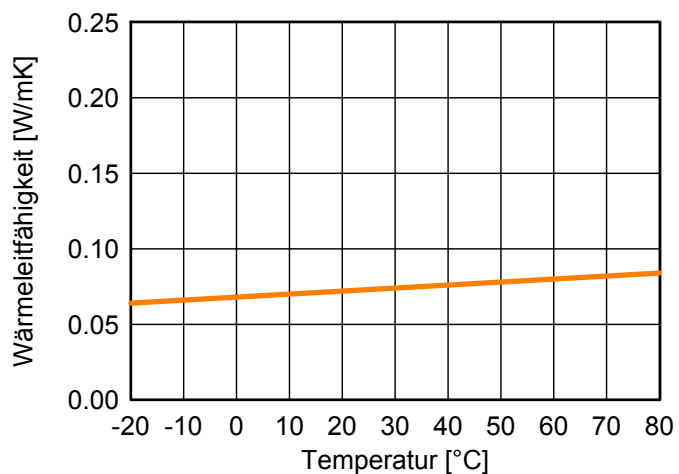
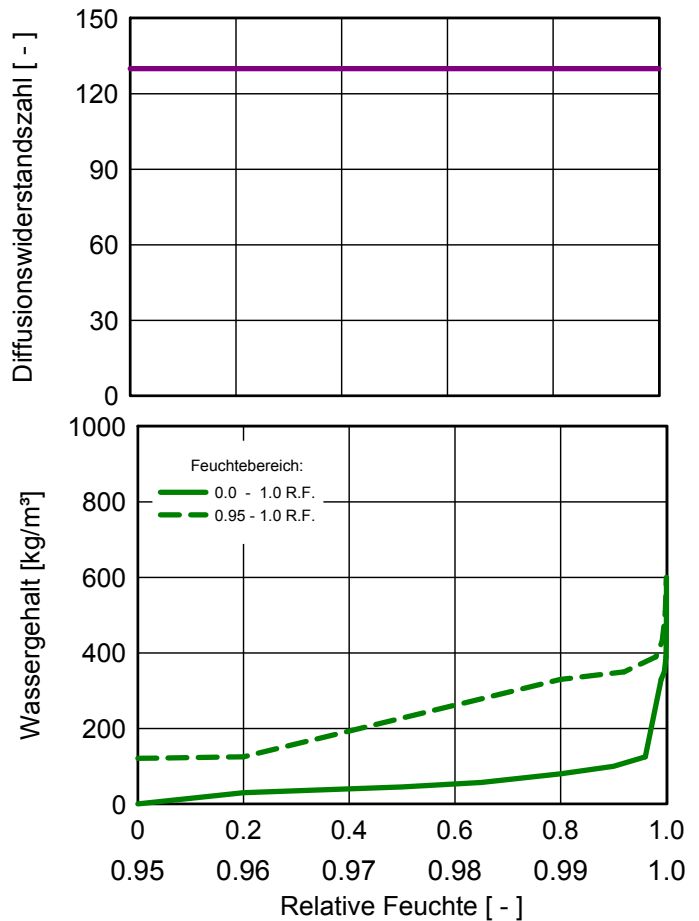
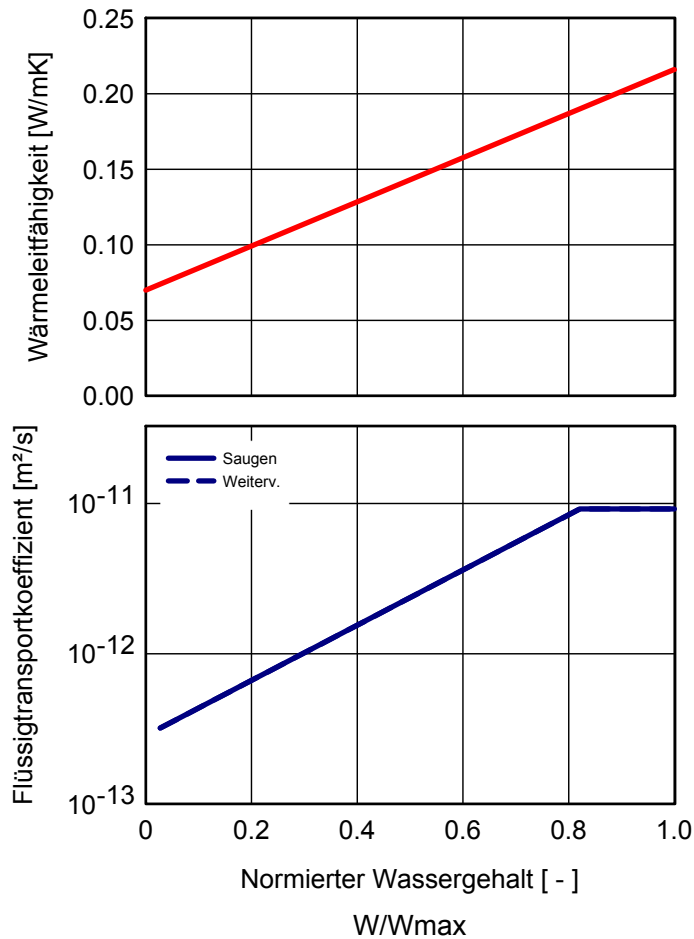
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	50,0
Porosität	[m³/m³]	0,95
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2150,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,037
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1,5
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m³]	7,8
Freie Wassersättigung	[kg/m³]	430,0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m²s ^{0.5}]	0,1067
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	0,5
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,04



Material : *Fichte radial (entriegelt)

Zusammenstellung der Rechengrößen

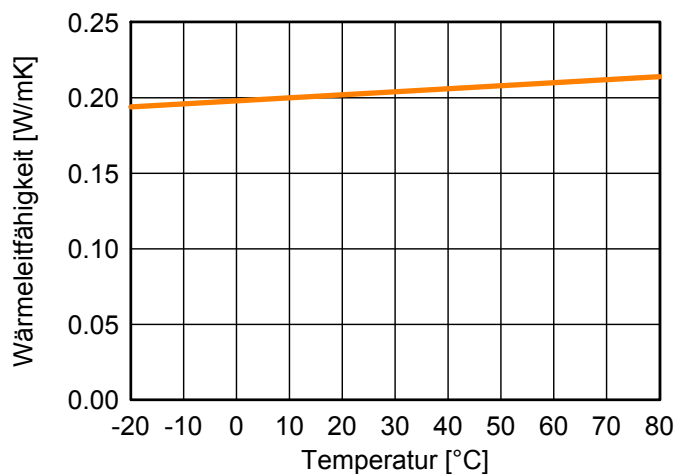
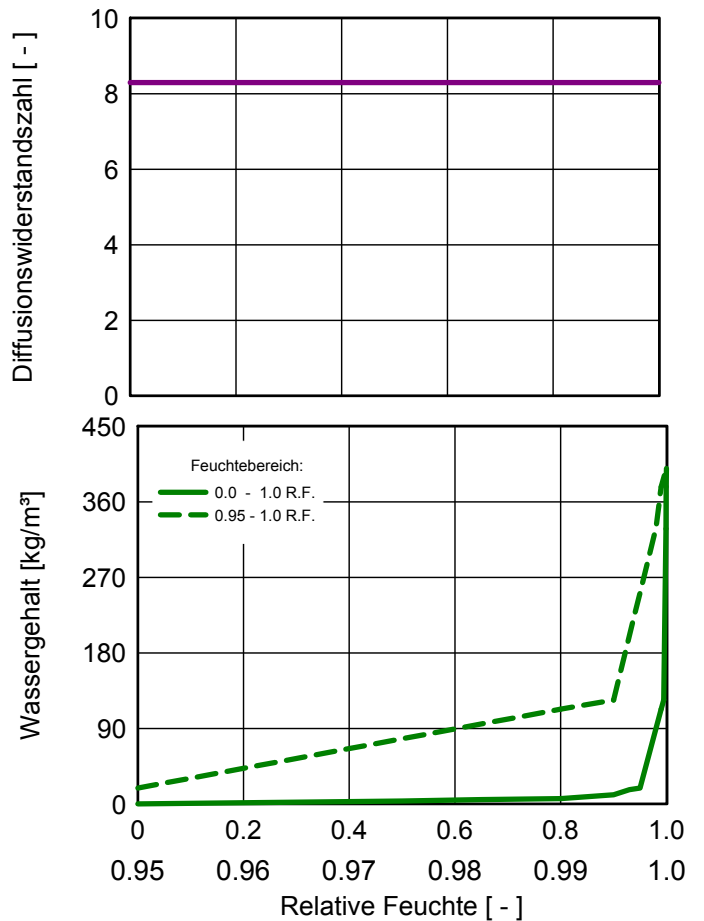
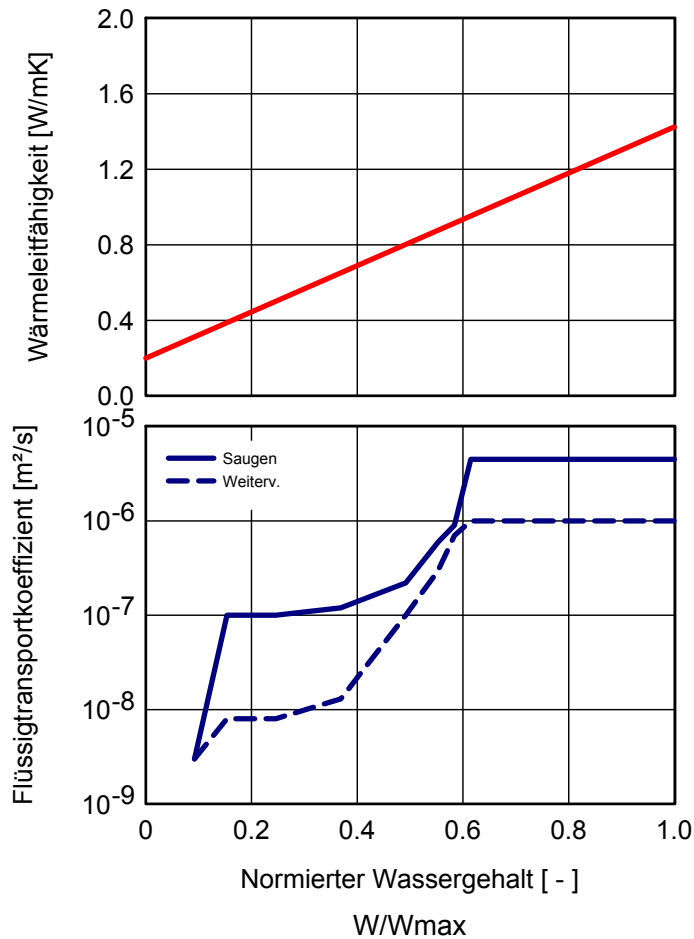
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	455,0
Porosität	[m³/m³]	0,73
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,07
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	130,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	1,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : Gipskartonplatte

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	850,0
Porosität	[m³/m³]	0,65
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850,0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0,2
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	8,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	8,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: IBP01012009-31122010.WAC

Orientierung / Neigung: West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Klimaort: Innenklima-F8-Halle_ab260909.kli

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,0588	Außenwand
Sd-Wert	[m]	0,05	
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	[-]	0,8	Holz (Fichte) braun gestrichen
Langwellige Strahlungsemissionszahl	[-]	0,9	Holz (Fichte) braun gestrichen
Anhaftender Anteil des Regens	[-]	0,7	Gemäß Bauteiltyp/Neigung

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,125	Außenwand
Sd-Wert	[m]	----	Keine Beschichtung

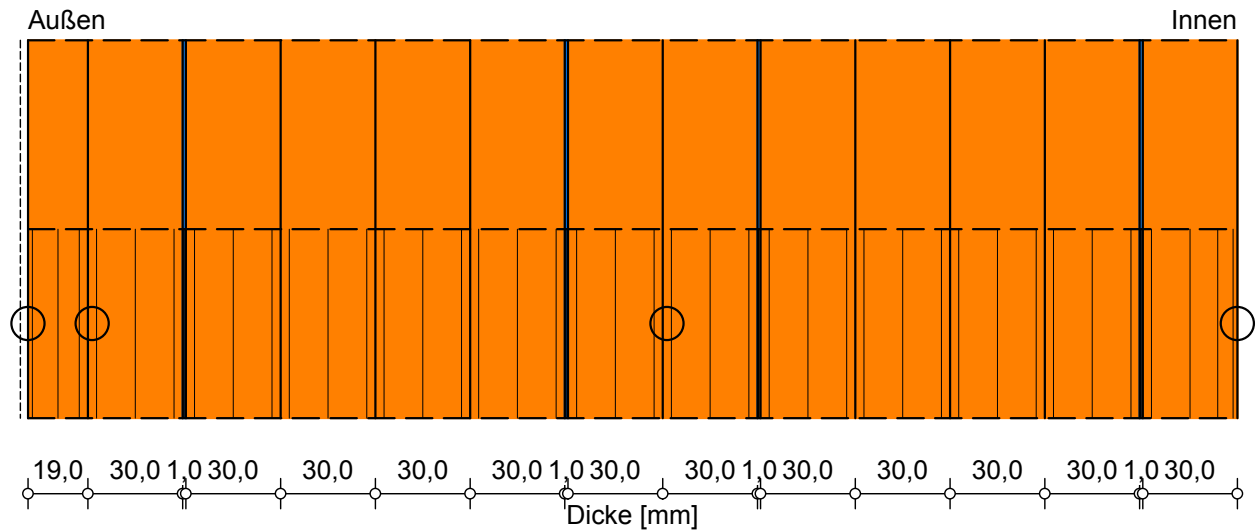
Explizite Strahlungsbilanz

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Wert
Eingeschaltet	nein

Bauteilaufbau

Variante: Nägeli Massivholzkonstruktion



○ - Monitorpositionen

Materialien :

- Fichte radial
- Fichte radial
- Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)
- Fichte radial
- Fichte radial
- Fichte radial
- Fichte radial
- Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)
- Fichte radial
- Fichte radial
- Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)
- Fichte radial
- Fichte radial
- Fichte radial
- Fichte radial
- Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)
- Fichte radial

Sd-Wert außen [m]: 0,05

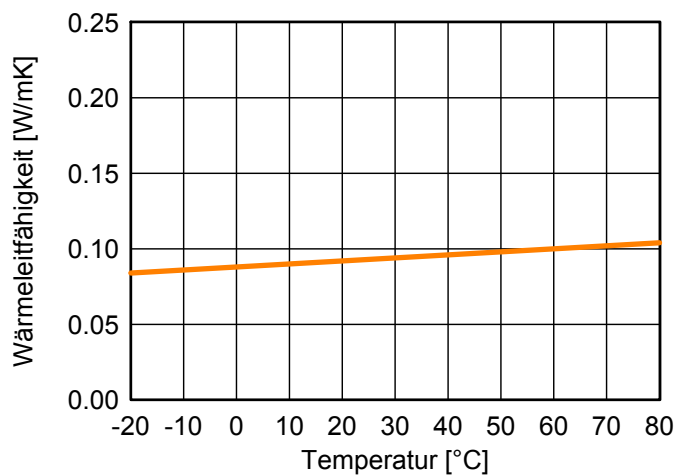
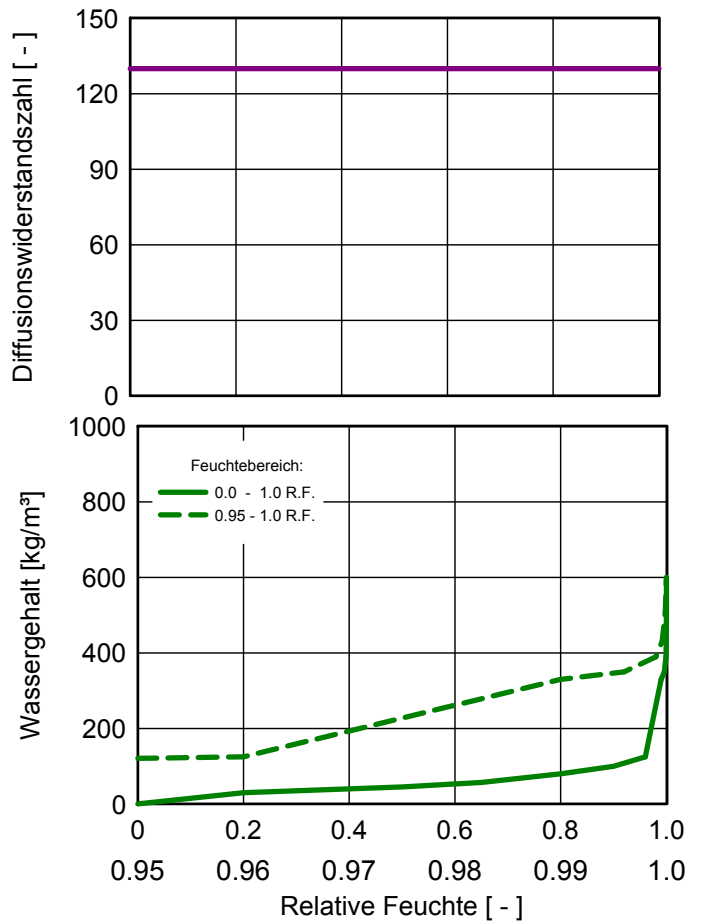
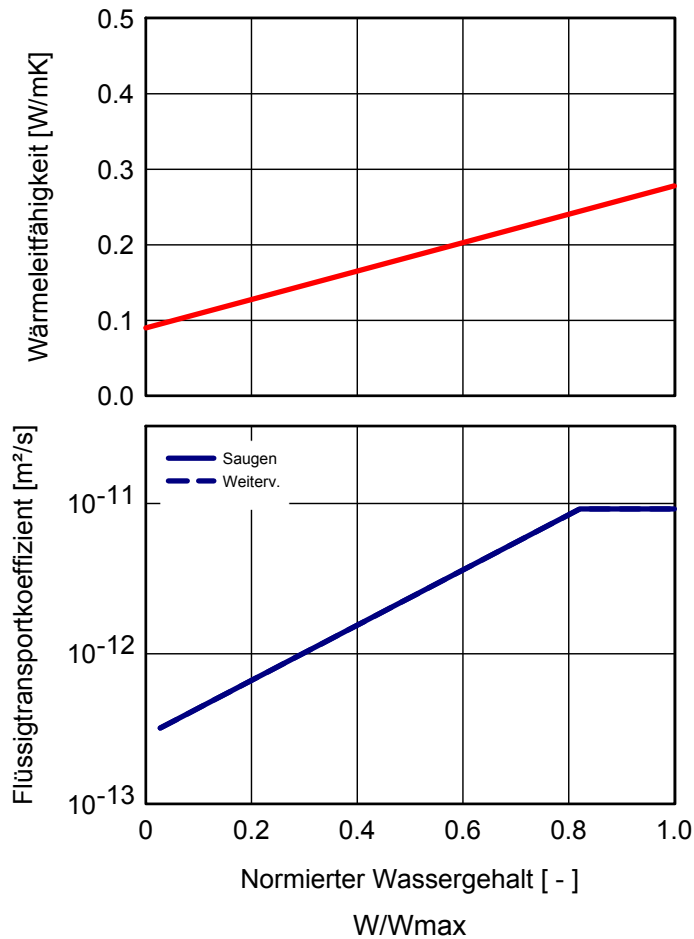
Gesamtdicke: 0,38 m

Wärmedurchlasswiderstand: 3,43 m²K/W; U-Wert: 0,273 W/m²K

Material : Fichte radial

Zusammenstellung der Rechengrößen

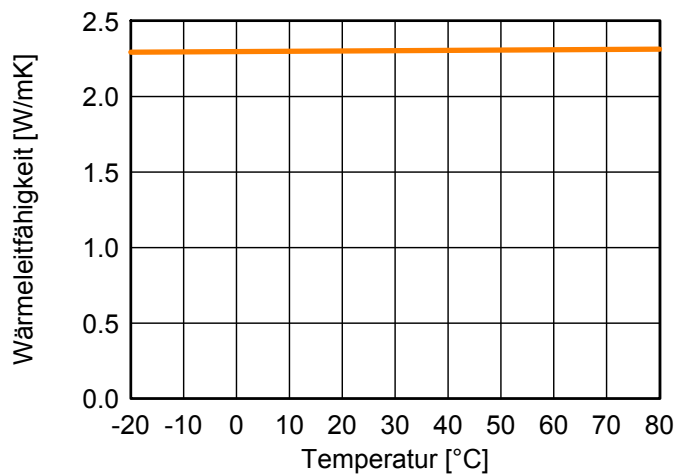
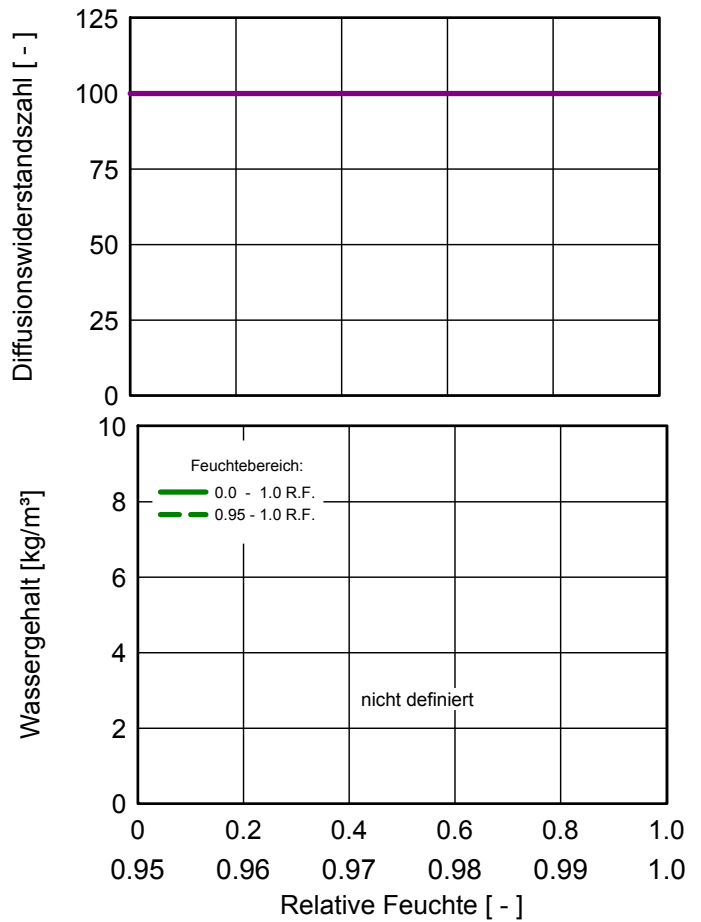
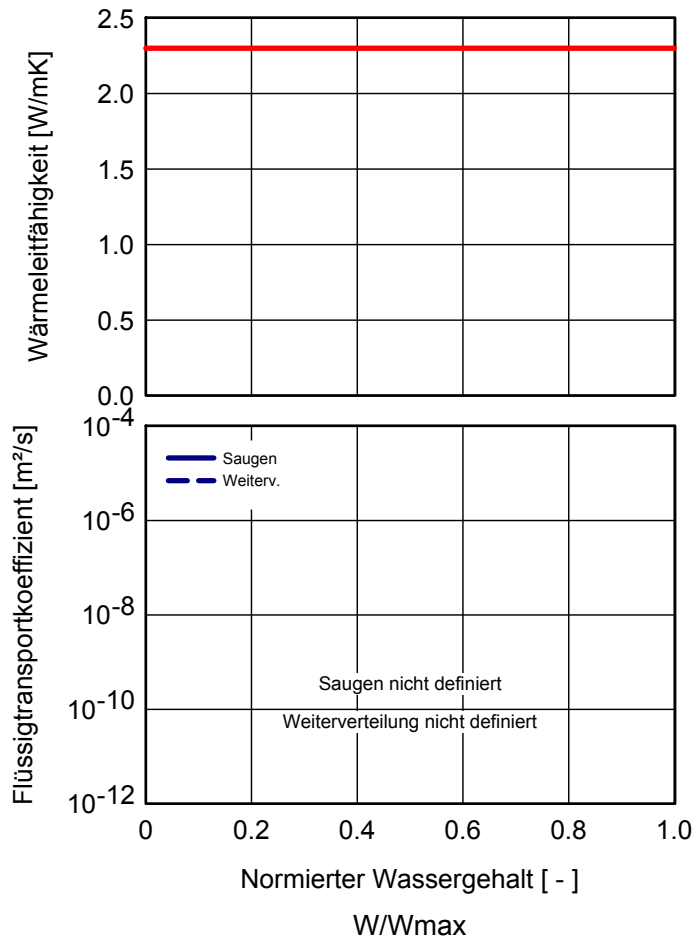
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	455,0
Porosität	[m³/m³]	0,73
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,09
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	130,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	1,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	130,0
Porosität	[m³/m³]	0,001
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2300,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	2,3
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	100,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: IBP01012009-31122010.WAC

Orientierung / Neigung: West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Klimaort: Innenklima-F8-Halle_ab260909.kli

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,11	
Sd-Wert	[m]	0,05	
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	[-]	0,7	Holz (Fichte) verwittert (silbergrau)
Langwellige Strahlungsemissionszahl	[-]	0,9	Holz (Fichte) verwittert (silbergrau)
Anhaftender Anteil des Regens	[-]	0,7	Gemäß Bauteiltyp/Neigung

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,125	
Sd-Wert	[m]	----	Keine Beschichtung

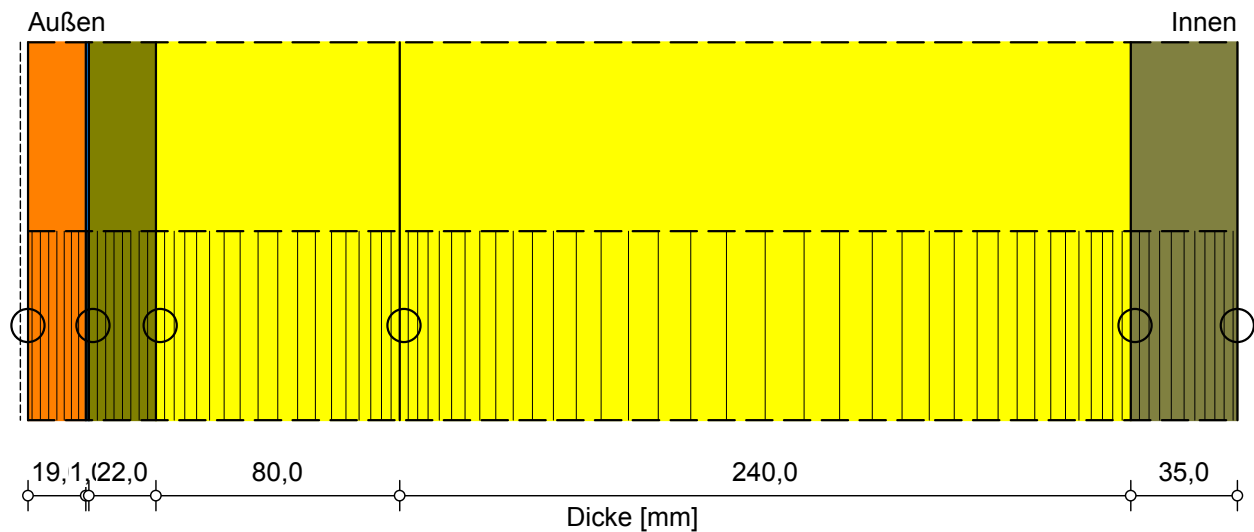
Explizite Strahlungsbilanz

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Wert
Eingeschaltet	nein

Bauteilaufbau

Variante: Schuler Holzrahmenkonstruktion



○ - Monitorpositionen

Materialien :



- *Fichte radial (entriegelt)



- Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)



- Holzfaserdämmplatte (WLG 040)



- *Mineralfaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK) (entriegelt)



- *Mineralfaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK) (entriegelt)



- *Dreischichtplatte Fichte (entriegelt)

Sd-Wert außen [m]: 0,05

Gesamtdicke: 0,4 m

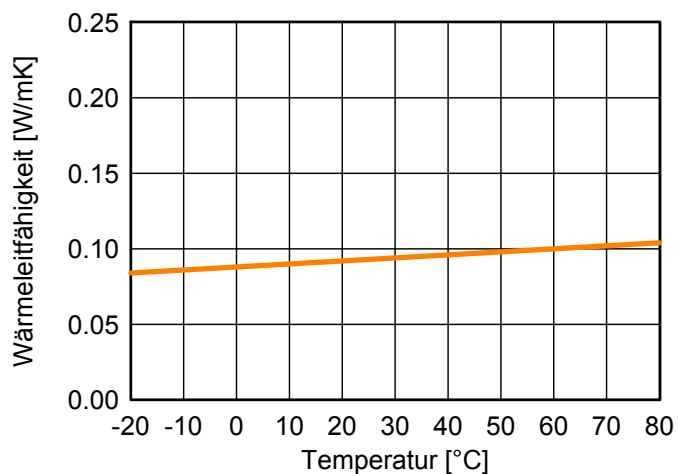
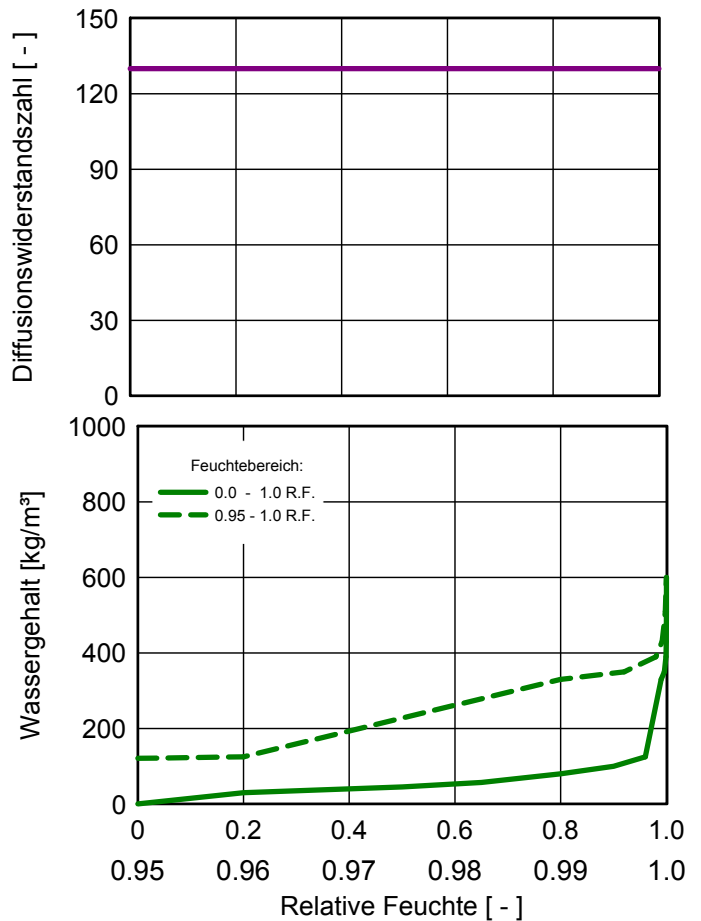
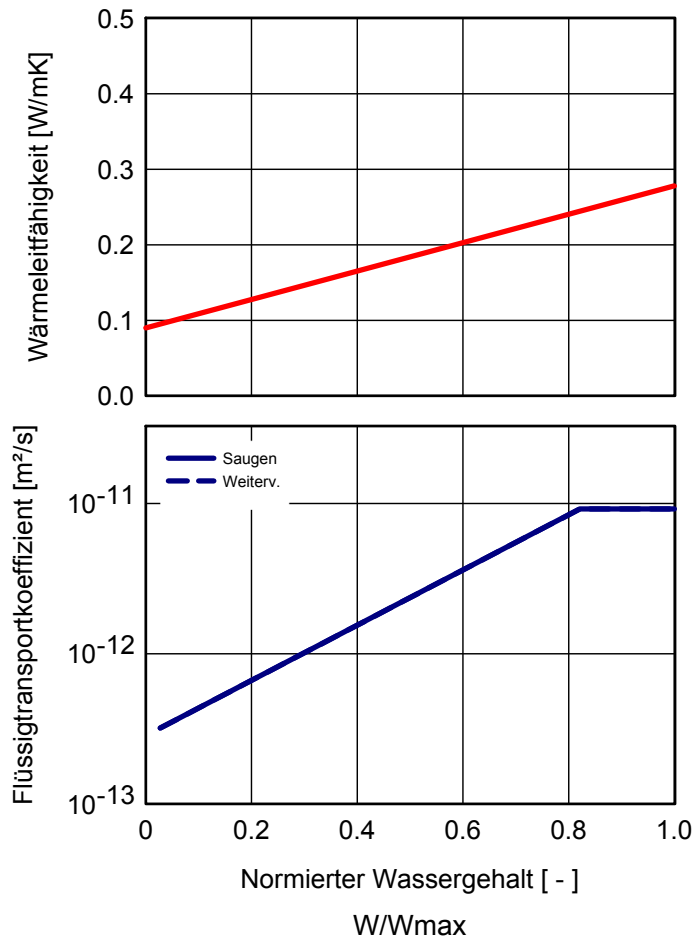
Wärmedurchlasswiderstand: 9,93 m²K/W

U-Wert: 0,099 W/m²K

Material : *Fichte radial (entriegelt)

Zusammenstellung der Rechengrößen

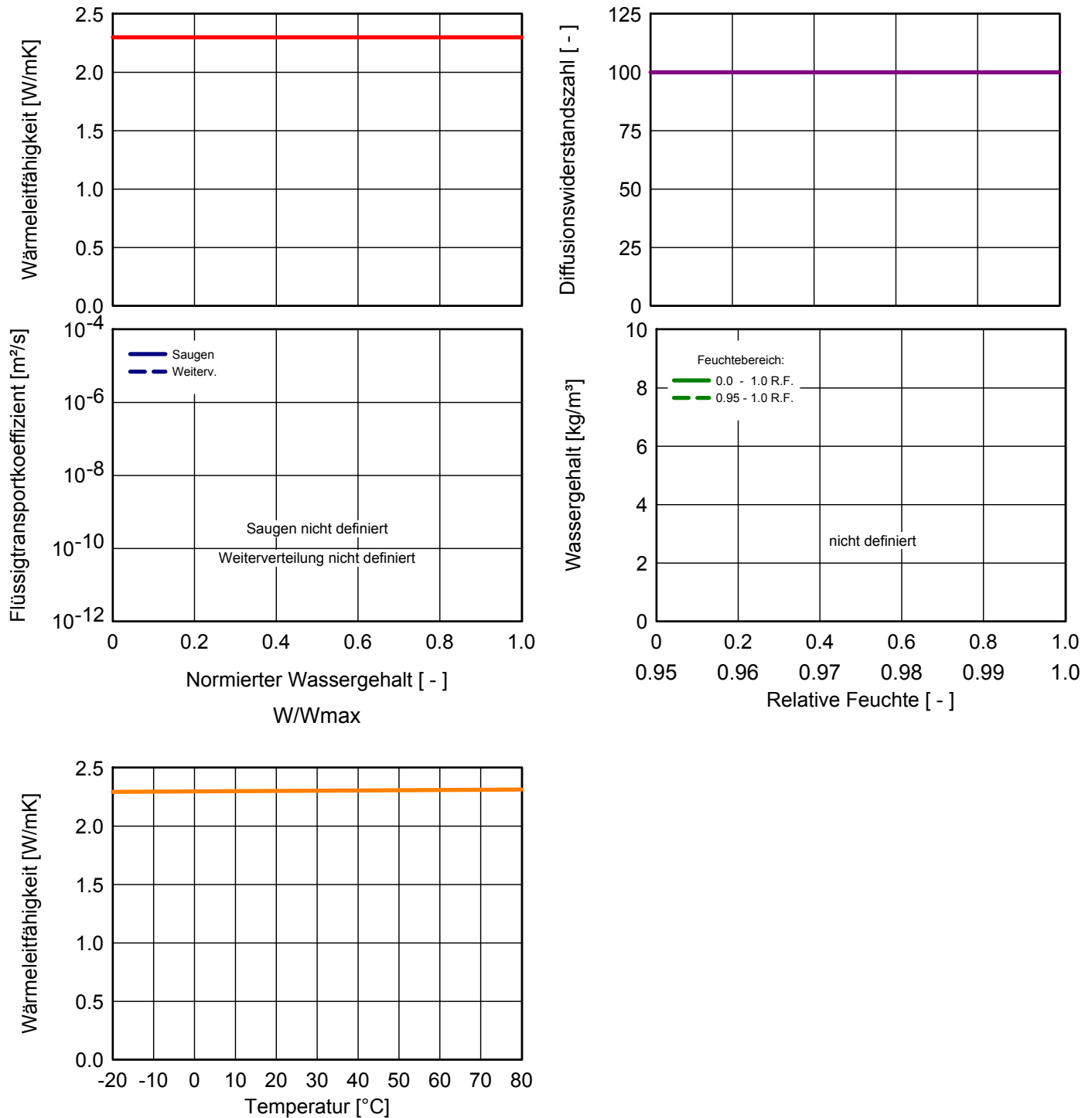
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	455,0
Porosität	[m³/m³]	0,73
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0,09
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	130,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	1,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : Witterungsschutzbahn (sd=0,1m)

Zusammenstellung der Rechengrößen

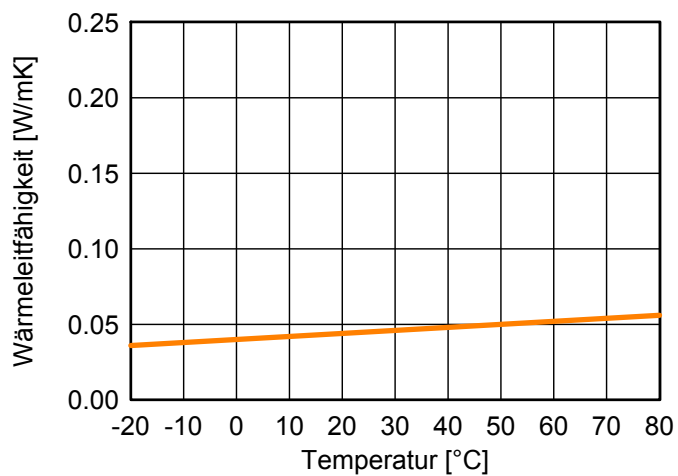
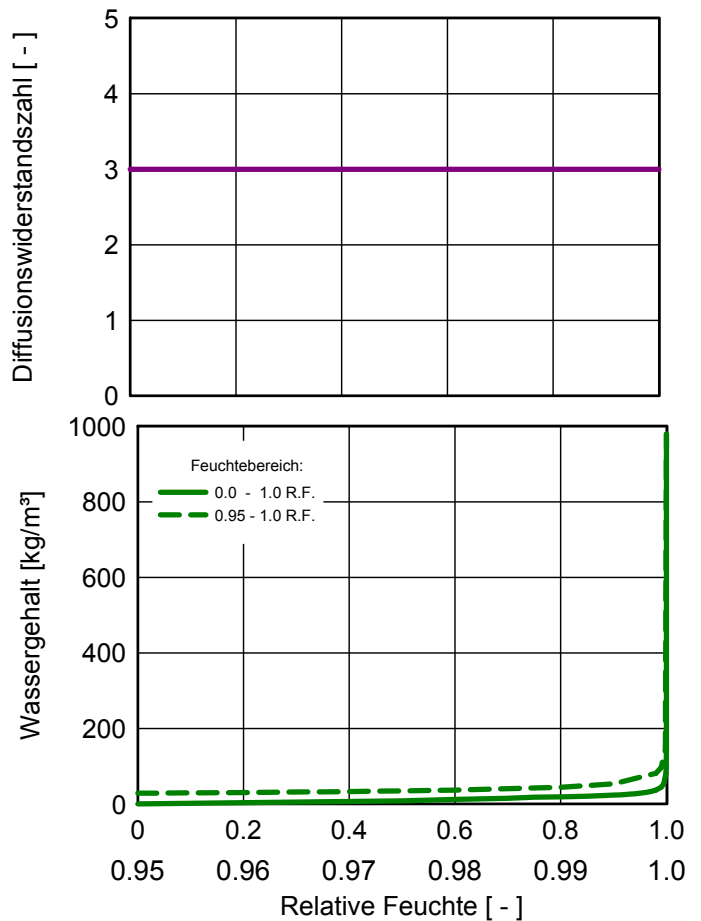
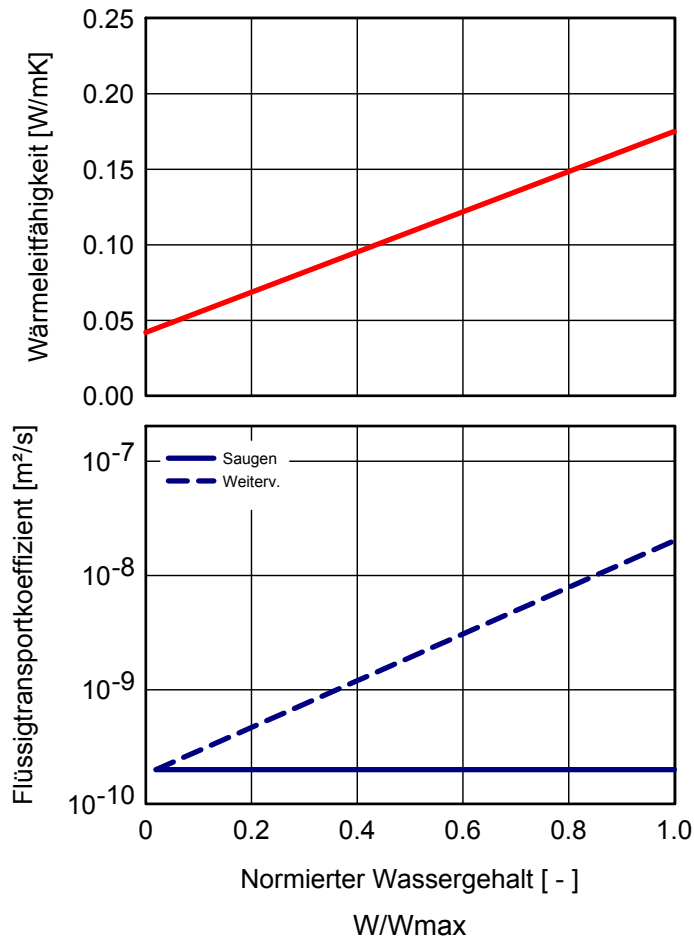
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	130,0
Porosität	[m³/m³]	0,001
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2300,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	2,3
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	100,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : Holzfaserdämmplatte (WLG 040)

Zusammenstellung der Rechengrößen

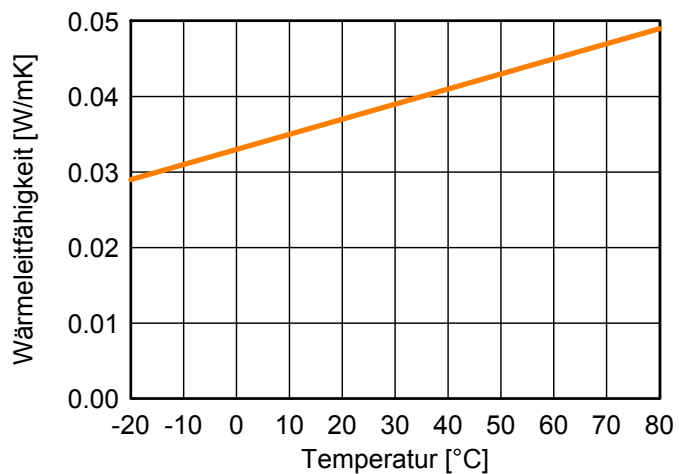
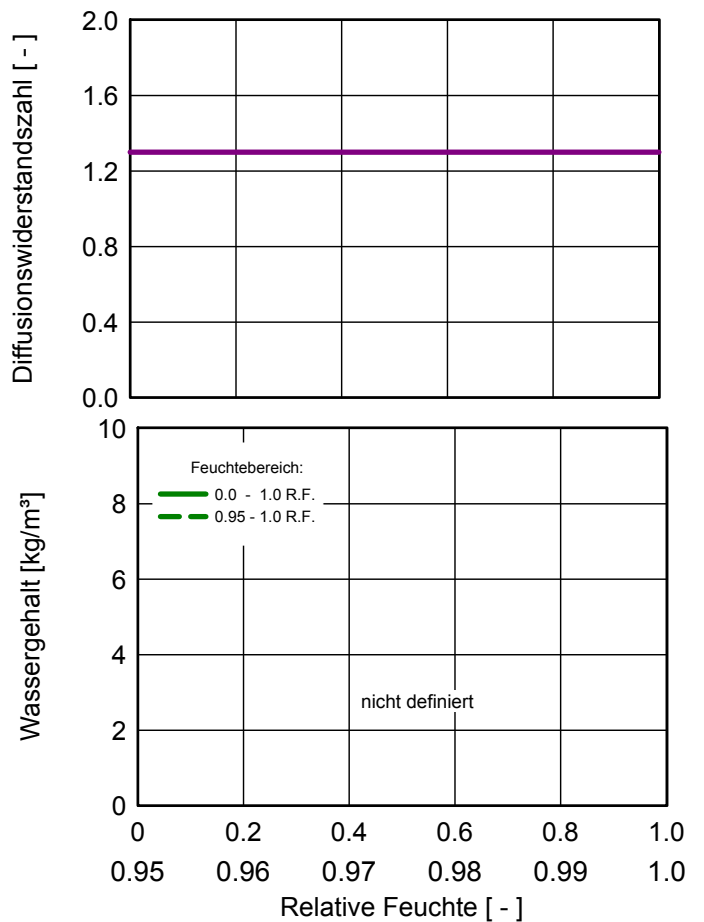
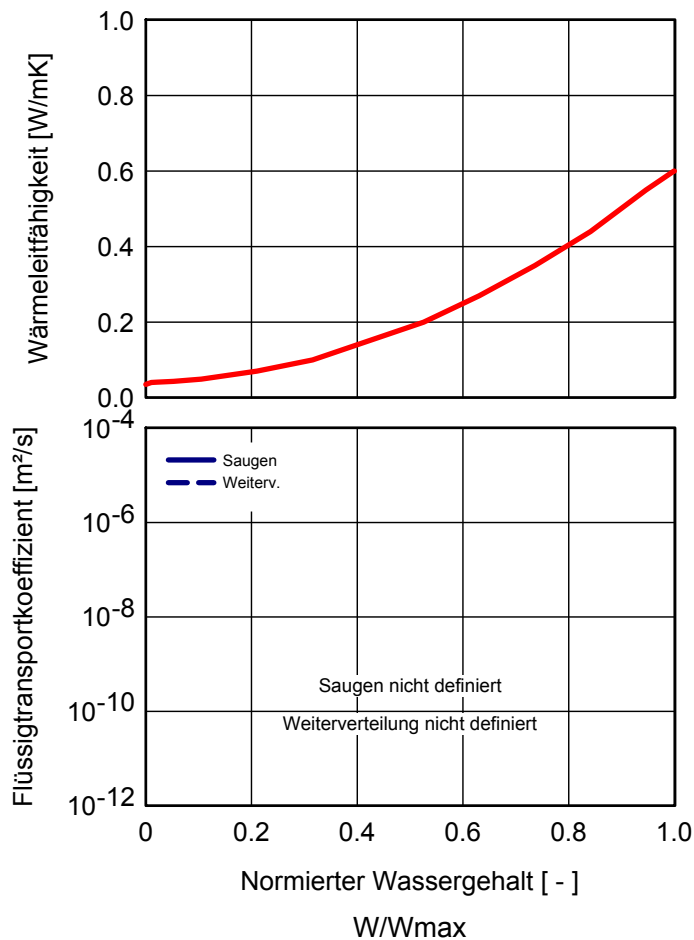
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	155,0
Porosität	[m³/m³]	0,981
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2000,0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0,042
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	3,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	0,5
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : *Mineralfaser (Wärmeleit.: 0,04 W/mK) (entriegelt)

Zusammenstellung der Rechengrößen

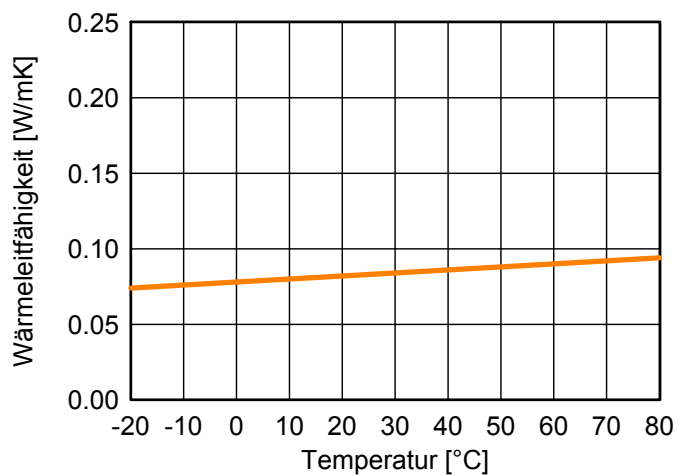
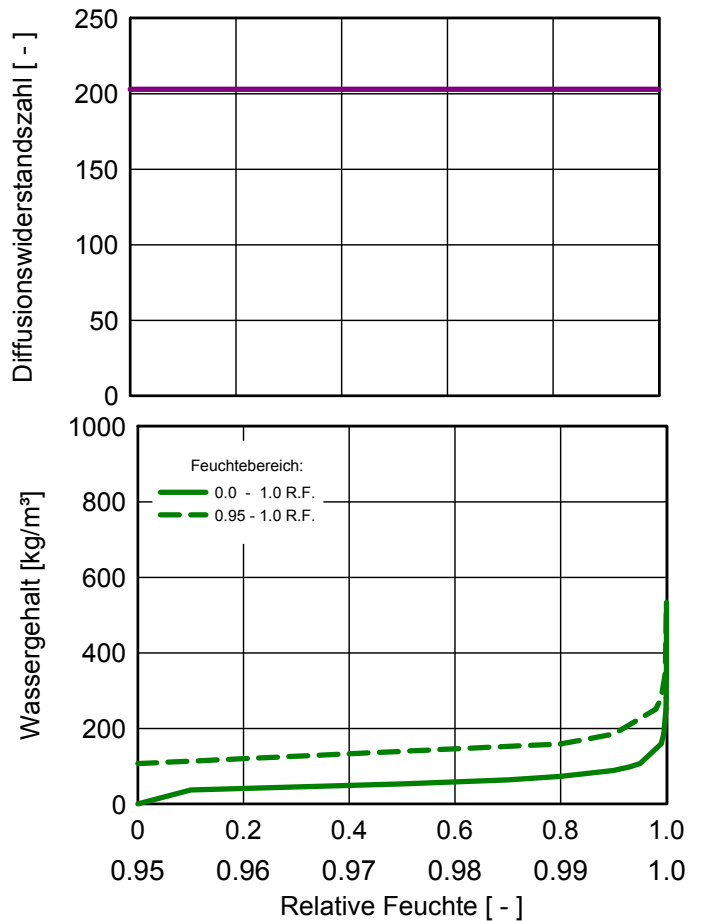
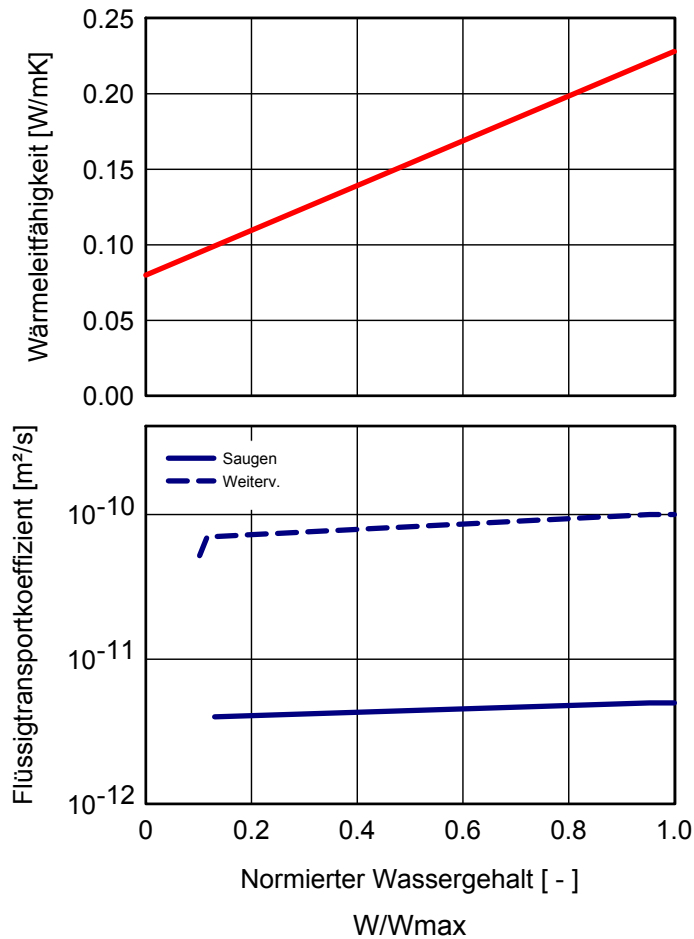
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	60,0
Porosität	[m³/m³]	0,95
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,035
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : *Dreischichtplatte Fichte (entriegelt)

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	454,0
Porosität	[m³/m³]	0,56
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0,08
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	203,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	1,5
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: IBP01012009-31122010.WAC

Orientierung / Neigung: West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Klimaort: Innenklima-F8-Halle_ab260909.kli

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,0588	Außenwand
Sd-Wert	[m]	0,05	
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	[-]	0,7	Holz (Fichte) verwittert (silbergrau)
Langwellige Strahlungsemissionszahl	[-]	0,9	Holz (Fichte) verwittert (silbergrau)
Anhaftender Anteil des Regens	[-]	0,7	Gemäß Bauteiltyp/Neigung

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,125	Außenwand
Sd-Wert	[m]	----	Keine Beschichtung

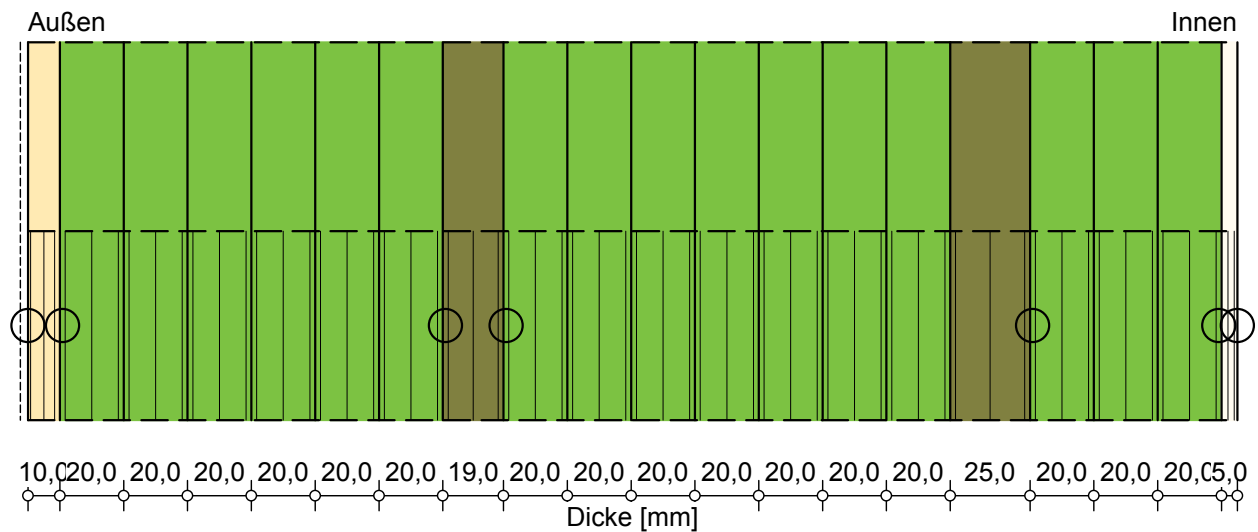
Explizite Strahlungsbilanz

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Wert
Eingeschaltet	nein

Bauteilaufbau

Variante: Pavatex pavabloc



○ - Monitorpositionen

Materialien :

- Mineralischer Außenputz
- Pavatex Diffutherm
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- Dreischichtplatte Fichte
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- Dreischichtplatte Fichte
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- *Pavatex Diffutherm (entriegelt)
- Pavatex Diffutherm
- Kalkputz

Sd-Wert außen [m]: 0,05

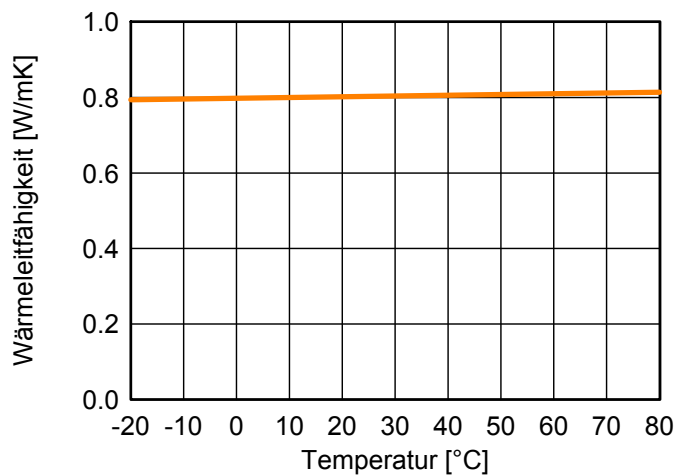
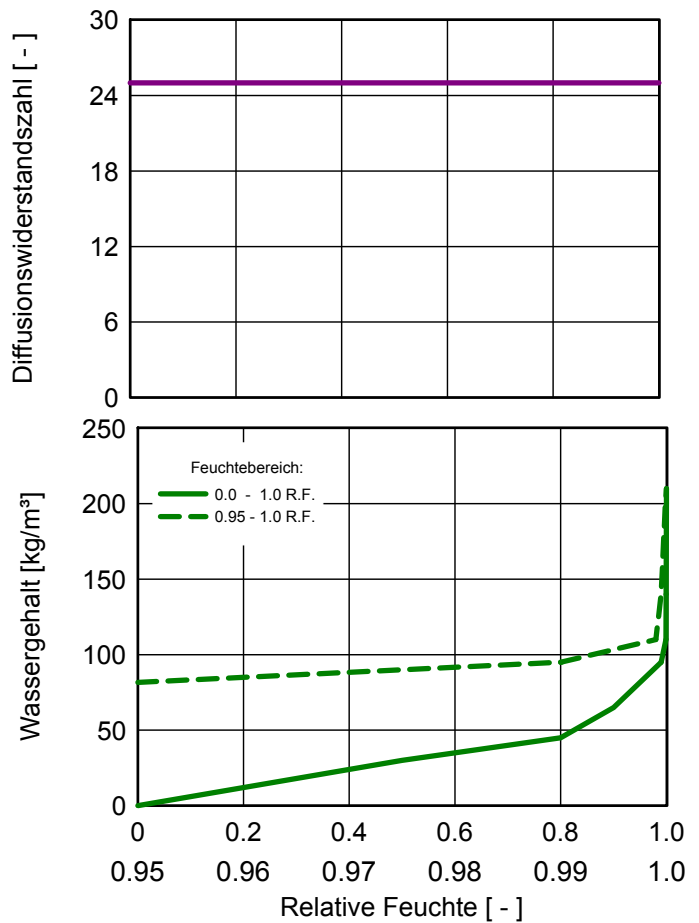
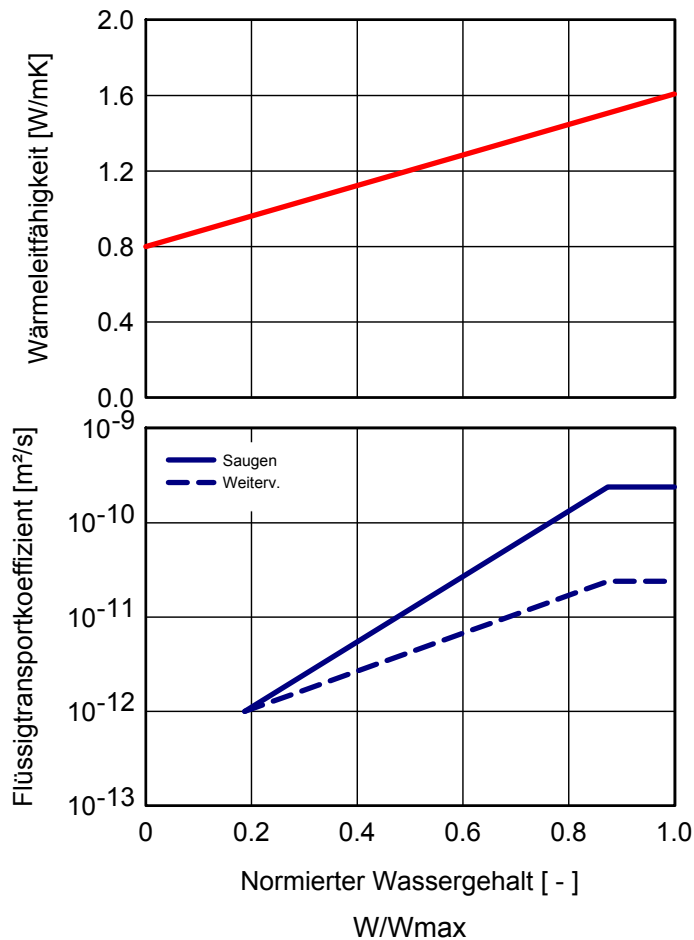
Gesamtdicke: 0,38 m

Wärmedurchlasswiderstand: 7,42 m²K/W; U-Wert: 0,131 W/m²K

Material : Mineralischer Außenputz

Zusammenstellung der Rechengrößen

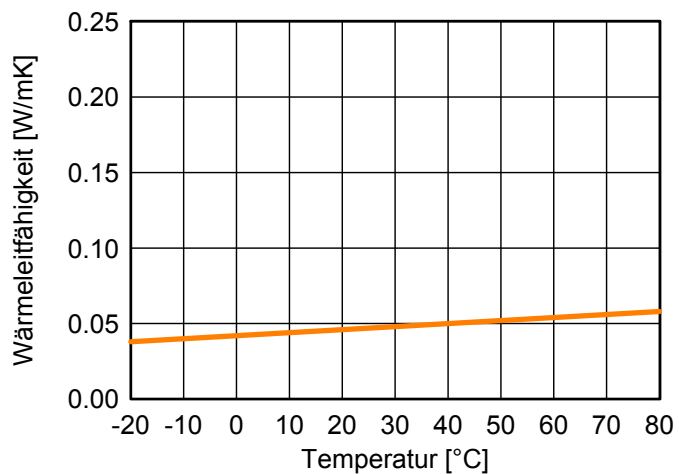
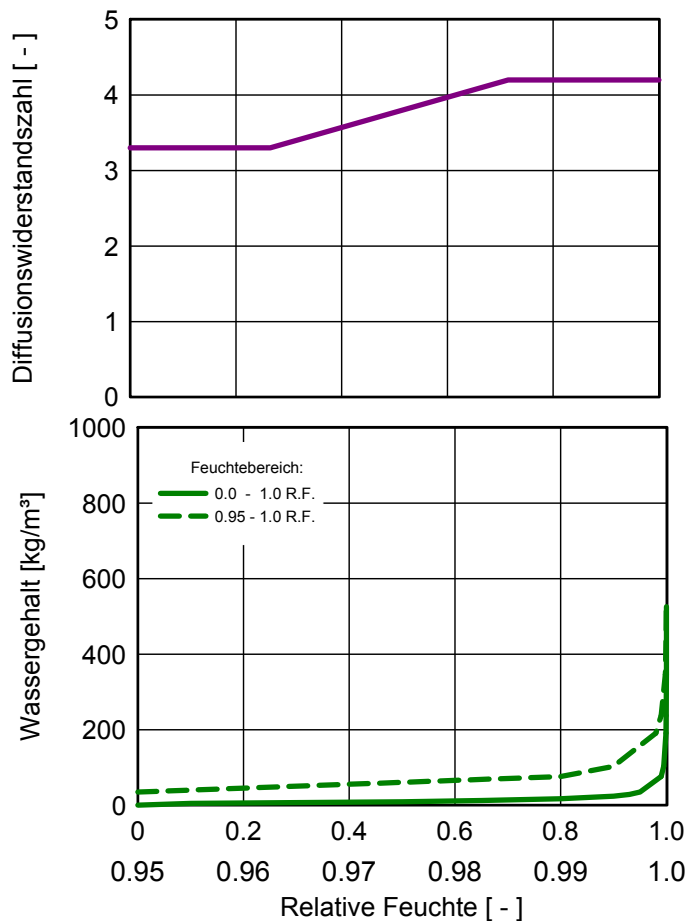
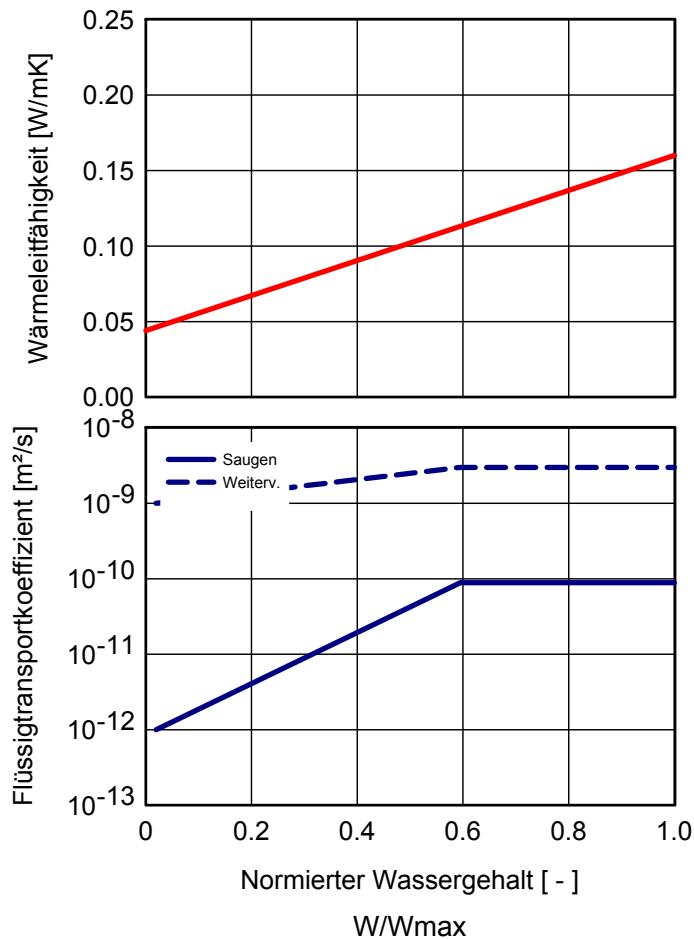
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1900,0
Porosität	[m³/m³]	0,24
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850,0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0,8
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	25,0
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m³]	45,0
Freie Wassersättigung	[kg/m³]	210,0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m²s ^{0.5}]	0,00167
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	8,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : Pavatex Diffutherm

Zusammenstellung der Rechengrößen

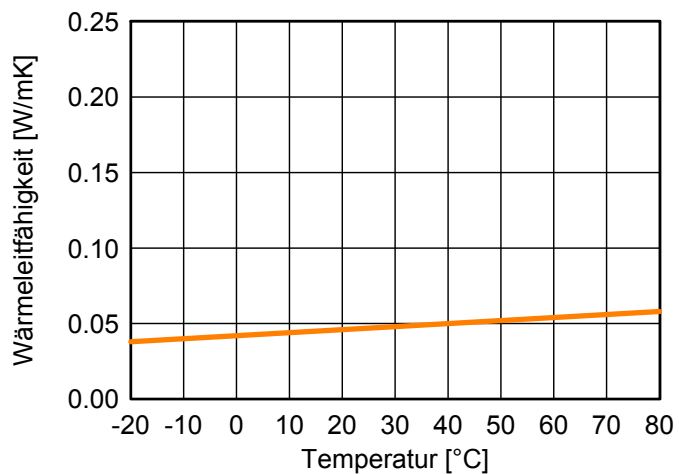
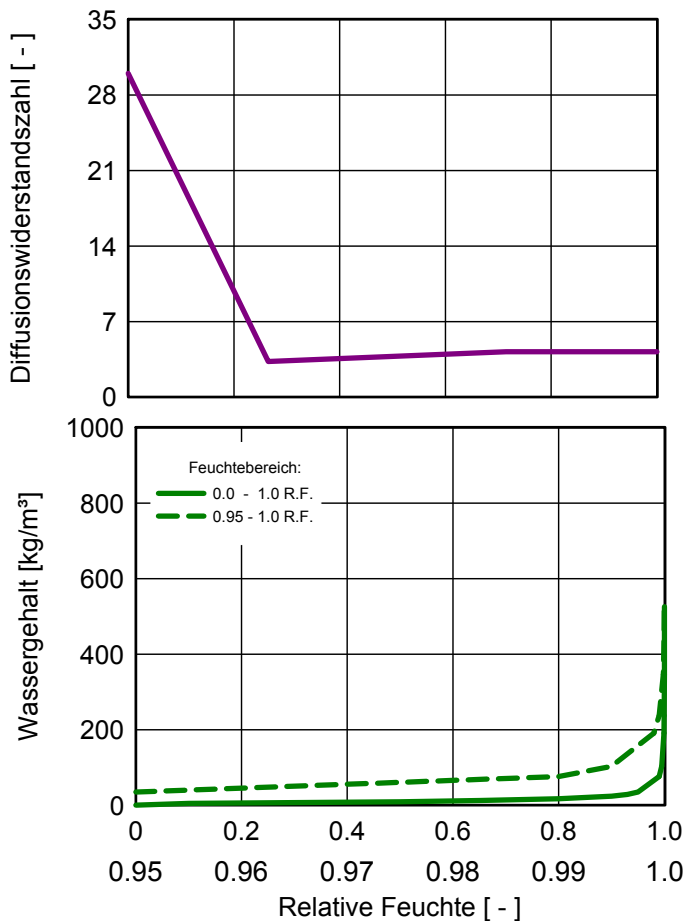
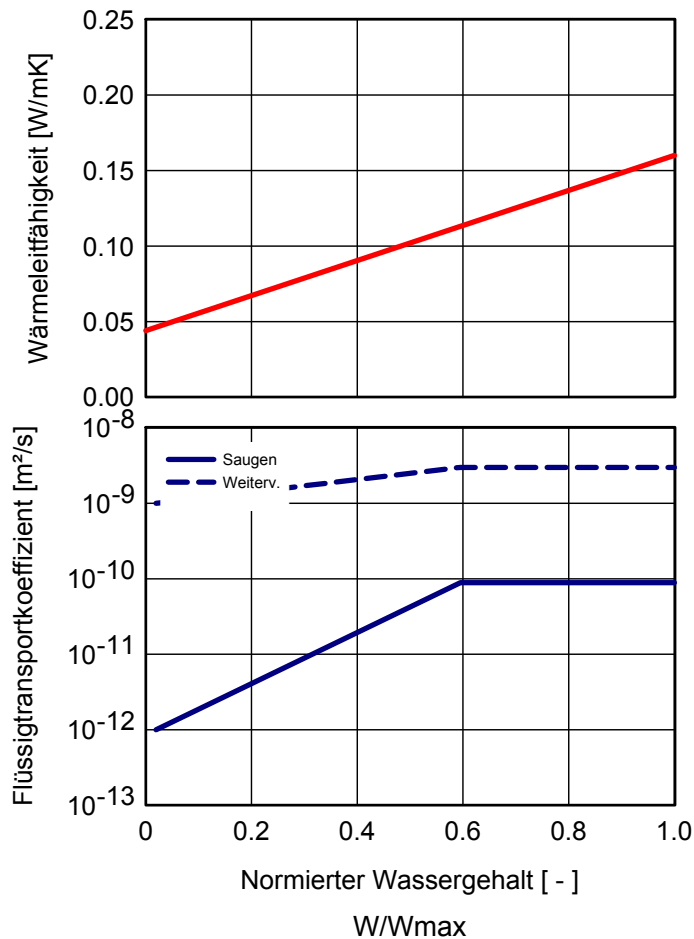
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	168,0
Porosität	[m³/m³]	0,883
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2100,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,044
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	3,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	0,5
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,045



Material : *Pavatex Diffutherm (entriegelt)

Zusammenstellung der Rechengrößen

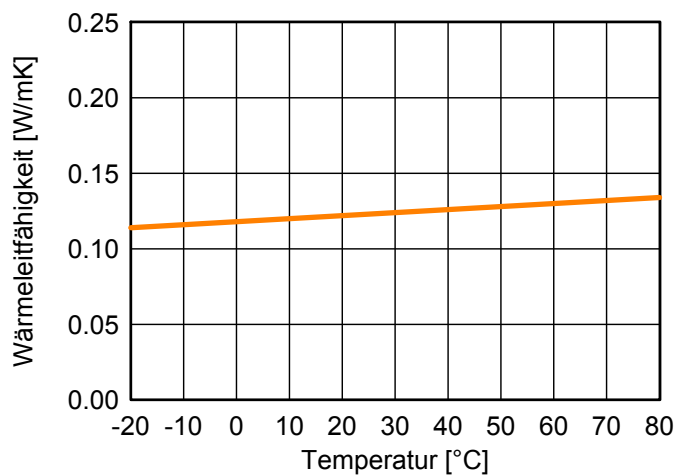
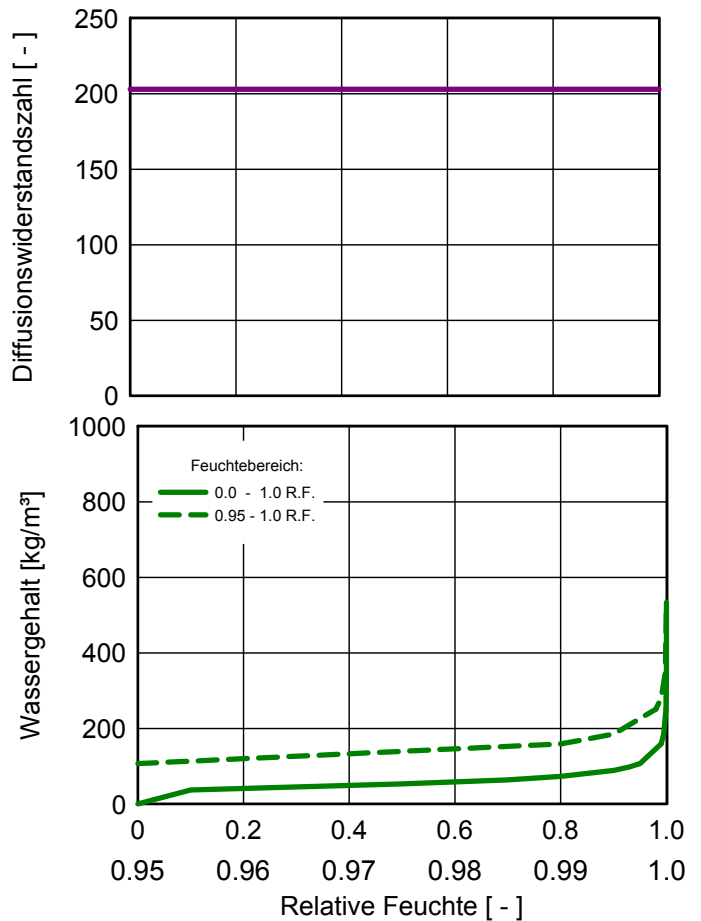
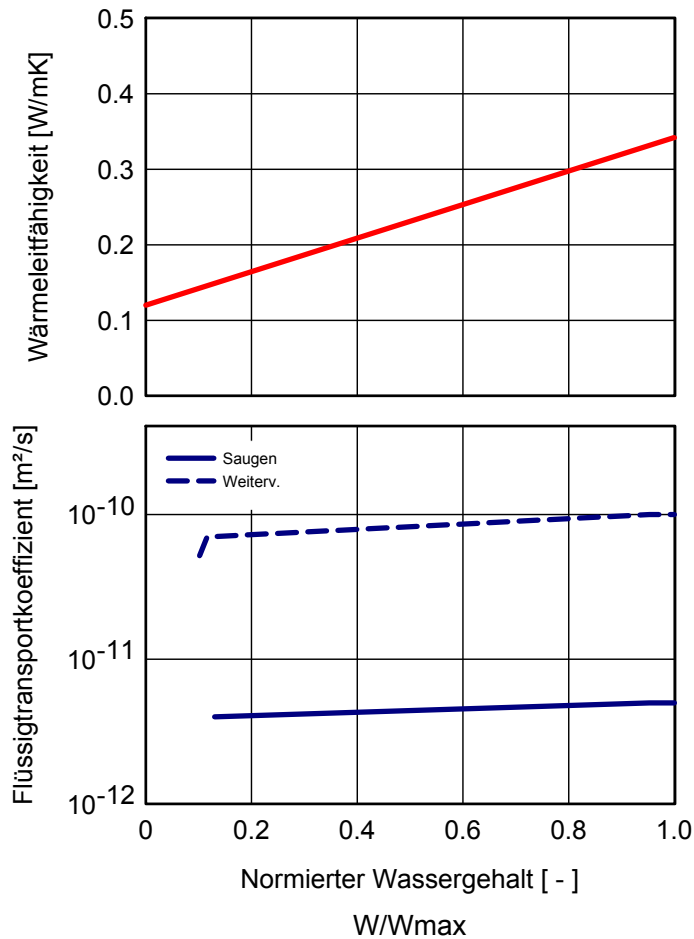
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	168,0
Porosität	[m³/m³]	0,883
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2100,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,044
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	30
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	0,5
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,045



Material : Dreischichtplatte Fichte

Zusammenstellung der Rechengrößen

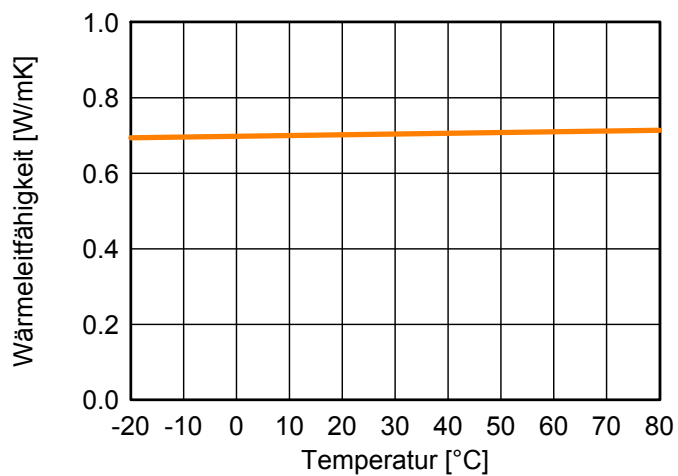
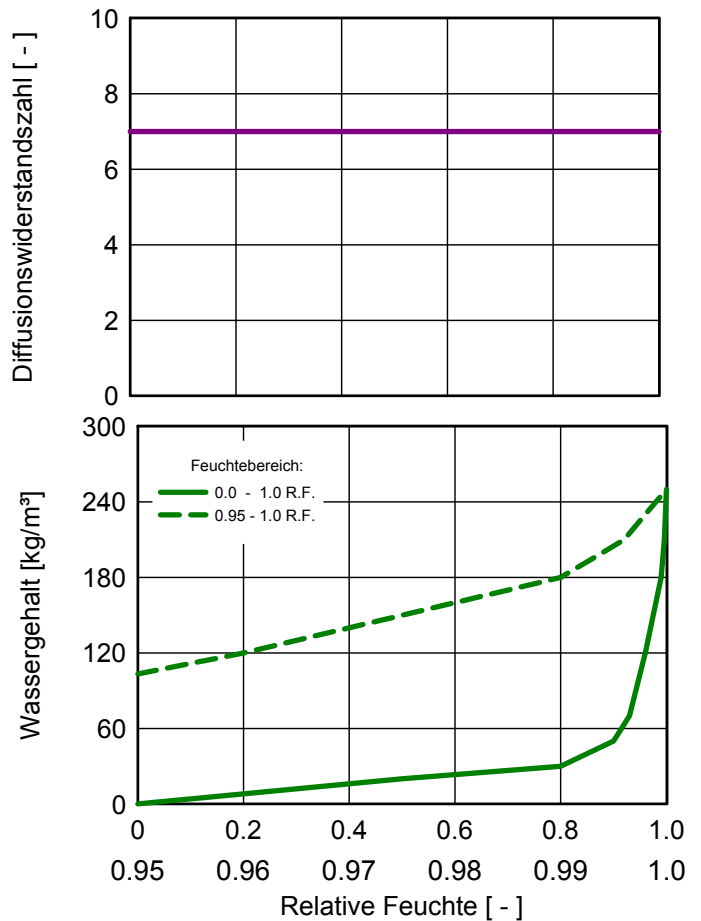
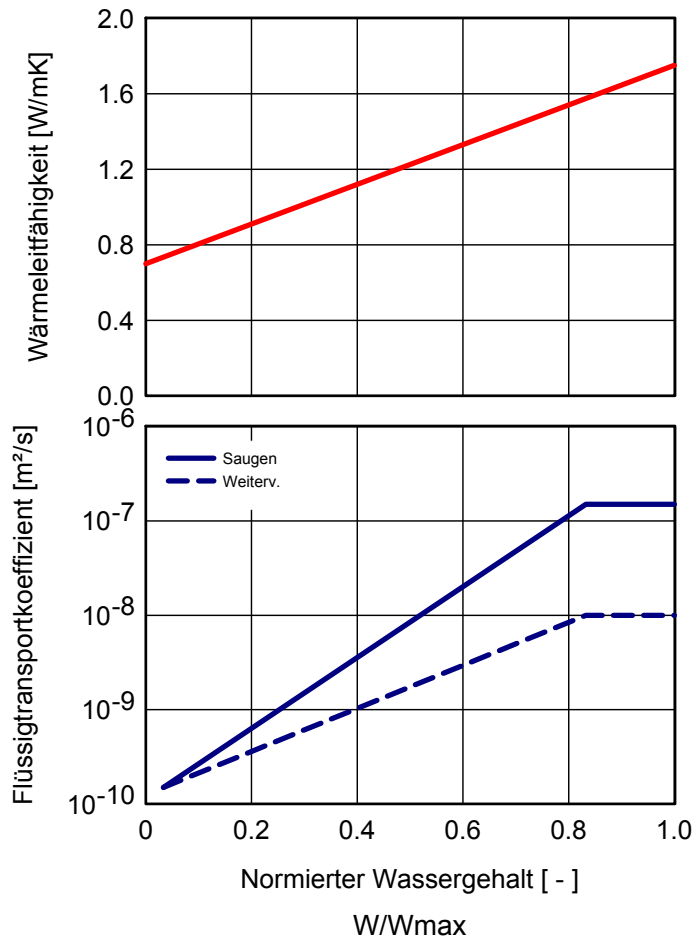
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	454,0
Porosität	[m³/m³]	0,56
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,12
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	203,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	1,5
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material : Kalkputz

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1600,0
Porosität	[m³/m³]	0,3
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,7
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	7,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	8,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: IBP01012009-31122010.WAC

Orientierung / Neigung: West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Klimaort: Innenklima-F8-Halle_ab260909.kli

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,0588	Außenwand
Sd-Wert	[m]	0,05	
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	[-]	0,4	Putz normal hell
Langwellige Strahlungsemissionszahl	[-]	0,9	Putz normal hell
Anhaftender Anteil des Regens	[-]	0,7	Gemäß Bauteiltyp/Neigung

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m²K/W]	0,125	Außenwand
Sd-Wert	[m]	----	Keine Beschichtung

Explizite Strahlungsbilanz

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Wert
Eingeschaltet	nein

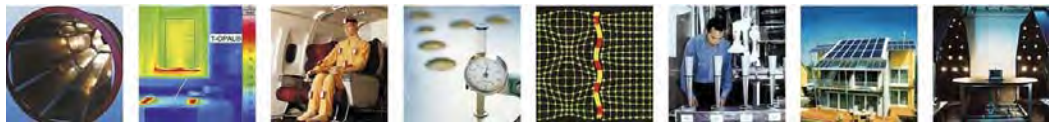
Anhang

Erweiterter Anhang

Montagebilder von den Wandelementen (13 Seiten)

Dokument des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik
in Holzkirchen

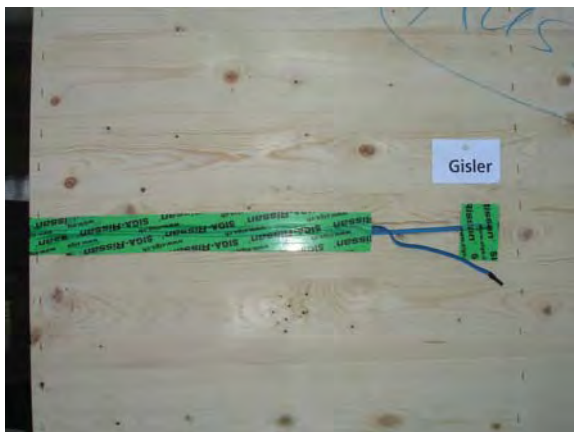
Fotozusammenstellung Montage Holzbauelemente



Einleitung

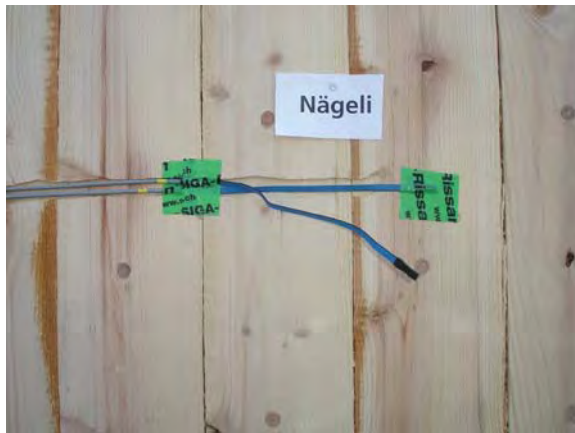
Fotozusammenstellung

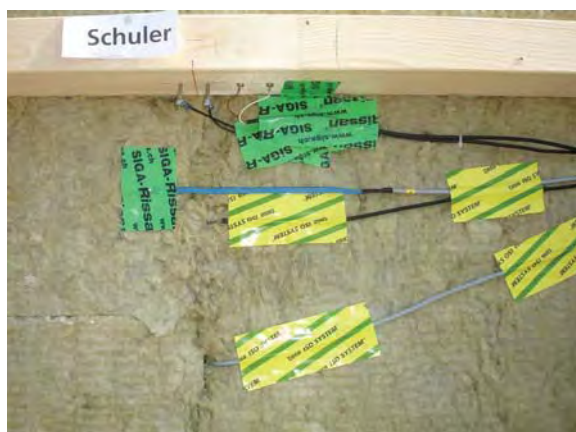
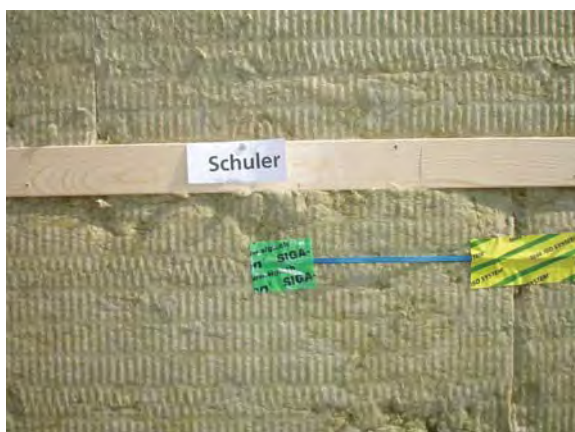
Montage der Holzbauelemente, Installation der Sensorik und Messwerterfassung am IBP in Holzkirchen vom 22. – 24. September 2009 in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich, Firma Nägeli und der Firma Pavatex.

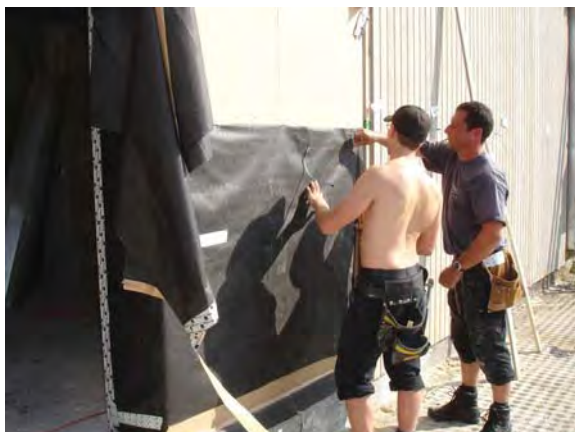
























Dünnbettmörtel, Innen- und Außenputz

