



Schlussbericht

MOFEINN

Monitoring des Feuchtehaushaltes innengedämmter Bauteile





Datum: 31.03.2017

Ort: Biel

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Flumroc AG, CH-8890 Flums
Isofloc AG, CH-9606 Bütschwil
Saint-Gobain ISOVER AG, CH-1522 Lucens
Pro clima Schweiz GmbH, CH-8460 Marthalen

Auftragnehmer/in:

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur; Kompetenzbereich Bauphysik und Energie
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel
www.ahb.bfh.ch

Autor/in:

Federico Gariglio, BFH, federico.gariglio@bfh.ch
Andreas Masuch, BFH (ehemalig), andreas.masuch@bfh.ch

BFE-Bereichsleitung: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Rolf Moser, moser@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501067-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

Um die Ziele der Energiestrategie 2050 erreichen zu können, ist eine umfassende Sanierung des Schweizer Gebäudebestands unabdingbar [1]. Für die energetische Sanierung denkmalgeschützter historischer Außenwände stellt der Einbau eines innenliegenden Wärmedämmsystems oft die einzige Sanierungsmöglichkeit dar. Diese Sanierungsmassnahme verändert aber die Wärme- und Feuchteströme und folglich die Feuchtegehalte des Bauteils. Zur Optimierung der Robustheit der Sanierungslösungen werden in der Planungspraxis vermehrt numerische Simulationen der Wärme- und Feuchteströme im Bauteil durchgeführt. Allerdings bestehen aber noch Unsicherheiten bezüglich der Prognosegenauigkeit und der erforderlichen Eingabeparameter.

In diesem Projekt werden in drei Objekten die Feuchtegehalte und die Temperaturprofile von Außenwänden mit innenliegenden Wärmedämmsystemen über einen Zeitraum von 2 Jahren gemessen. Mit einem numerischen Programm werden dann die gekoppelten Wärme- und Feuchteströme in den sanierten Außenwänden berechnet.

Die Berechnungsergebnisse werden mit den Messergebnissen vor Ort verglichen. Um die Prognosegenauigkeit der Berechnungen zu verbessern, werden die Eingabeparameter variiert. Hierdurch wird festgestellt, wie die verschiedenen Eingabeparameter den zeitlichen Verlauf der Feuchtegehalte in den verschiedenen Bauteilschichten beeinflussen.

Die gemessenen Temperaturen in der massgebenden Bauteilschicht, Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung, konnten mit einer mittleren Abweichung von (1.6 ± 1.48) K rekonstruiert und die Messwerte der relativen Feuchte mit einer minimalen Abweichung von (1.8 ± 3.88) % r. F. reproduziert werden.

Es hat sich unter anderem gezeigt, dass die Abbildung des Fugenteils im Mauerwerk, insbesondere bei Bruchsteinmauerwerk, eine wichtige Rolle spielt und durch Veränderung der hygrothermischen Materialkennwerte des Mauerwerks in den Berechnungen berücksichtigt werden muss. Da aber der Wandaufbau und die Zusammensetzung der Materialien historischer Bauten von Gebäude zu Gebäude stark variieren, konnten hieraus keine allgemeingültigen Regeln für andere Mauerwerksarten abgeleitet werden.

Darüber hinaus konnte der Einfluss von Feuchteinträgen durch Fehlstellen in der Konstruktion festgestellt und über das Berücksichtigen von Feuchtequellen in den Simulationen rekonstruiert werden.

Résumé

Afin d'atteindre les objectifs de la stratégie énergétique 2050, un assainissement complet du parc immobilier suisse est essentiel [1]. Pour l'assainissement énergétique des murs extérieurs placés sous protection du patrimoine, l'installation d'un système d'isolation thermique intérieur est souvent la seule option d'assainissement. Ce mode d'assainissement change les flux thermique et d'humidité et donc la teneur en humidité de l'élément de construction. Pour optimiser la robustesse des solutions d'assainissement dans la pratique de la planification, la simulation numérique des flux thermiques et d'humidité dans l'élément de construction est de plus en plus utilisée. Il y a toutefois encore des incertitudes concernant la précision des prévisions et les paramètres de saisie nécessaires.

Dans ce projet, la teneur en humidité et le profil de température des murs extérieurs avec des systèmes d'isolation thermique intérieurs de trois objets sont mesurées pendant une période de 2 ans. Avec un programme numérique, les flux de chaleur et d'humidité couplés dans les murs extérieurs rénovés seront calculés.

Les résultats de calculs seront comparés avec les résultats de mesure. Afin d'améliorer la précision des calculs de prévisions, les paramètres de saisie sont modifiés. Ceci permettra de déterminer la



façon dont les différents paramètres de saisie affectent l'évolution dans le temps de la teneur en humidité dans les différentes couches de l'élément de construction.

Les températures mesurées dans les couches de l'élément de construction ont pu être reconstitués avec un écart moyen de (1.6 ± 1.48) K et les valeurs mesurées de l'humidité relative reproduites avec une différence minimale de (1.8 ± 3.88) % Hr.

Parmi ceux-ci, on peut constater que la reproduction de la partie du joint dans la maçonnerie, en particulier en moellons, joue un rôle important et doit être pris en compte dans les calculs en modifiant les propriétés hygrothermiques du matériau de maçonnerie. Puisque la structure de paroi et la composition des matériaux des bâtiments historiques peuvent varier considérablement de bâtiments en bâtiments, il n'a pas été possible de dériver des règles générales pour les autres types de maçonnerie.

En outre, l'influence des infiltrations d'humidité causées par des défauts dans la construction ont pu être détectée et reconstruite dans la simulation en pris en compte des sources d'humidité.

Summary

In order to achieve the objectives of the energy strategy 2050, a comprehensive renovation of the Swiss building stock is indispensable [1]. The installation of an internal heat insulation system is often the only way to restore exterior walls under historical preservation to provide greater energy efficiency. However, this method of renovation changes the heat and moisture flux and therefor the moisture content of the component. In order to optimize the robustness of the reconstruction solutions, in planning practice numerical simulations of heat and moisture fluxes in the component are carried out. Certainly, there are still insecurities regarding the forecast accuracy and the required input parameters.

In this project, the moisture contents and the temperature profiles of exterior walls with internal heat insulation systems of three different objects are measured over a period of 2 years. By means of a numerical program, the coupled heat and moisture fluxes in the renovated exterior walls are calculated.

The results of the calculation are then compared with the measurement results. To improve the forecast accuracy of the calculations, the input parameters are varied. Thereby the influence of the various input parameters on the moisture contents in the various component layers over time can be determined.

The measured temperatures in the component layers could be reconstructed with a mean deviation of (1.6 ± 1.48) K and the measured values of the relative humidity were reproduced with a minimal deviation of (1.8 ± 3.88) % rh.

Among other things, it has been shown that the representation of the joint portion in the masonry, in particular in the case of quarry stone brickwork, plays an important role and must be taken into account in the calculations by changing the hygrothermal material characteristics of the masonry. However, since the wall structure and the composition of the materials of historical buildings vary considerably from building to building, no general rules could be derived for other types of masonry.

In addition, the influence of moisture permeation by defects in the construction could be determined and reconstructed in the simulation on integrating moisture sources.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Ausgangslage	8
2 Projektbeteiligte	9
2.1 Vertragsbeteiligte	9
2.2 Forschende der Berner Fachhochschule	9
3 Vorgehensweise	11
3.1 Allgemein	11
3.2 Auswahl der Messobjekte für das Monitoring	11
3.3 Dokumentation der Messobjekte und Entnahme von Materialproben	11
3.4 Installation der Messtechnik und Durchführung der Langzeitmessung (Monitoring)	11
3.5 Durchführung der Materialmessungen	12
3.6 Numerische Simulationen der Wärme- und Feuchteströme im Bauteil	12
4 Messtechnik	13
4.1 Allgemein	13
4.2 Messung der Materialfeuchte	14
4.3 Messung hygrothermischer Kennwerte	15
4.4 Datenfernübertragung	16
4.5 Software	17
4.6 Kalibrierung	17
5 Messobjekte	18
5.1 Allgemein	18
5.2 Aarwangen (Innendämmsystem der Firma Flumroc AG)	19
5.2.1 Allgemein	19
5.2.2 Wandaufbau	21
5.2.3 Messtechnik	21
5.3 Brüttelen (Innendämmsystem der Firma Isover SA)	29
5.3.1 Allgemein	29
5.3.2 Wandaufbau	30
5.3.3 Messtechnik	31
5.4 Bütschwil (Innendämmsystem der Firma Isofloc AG)	36
5.4.1 Allgemein	36
5.4.2 Wandaufbau	37



5.4.3 Messtechnik	37
6 Materialmessungen	42
6.1 Messung von Materialwiderständen und –feuchten im Labor der Berner Fachhochschule	42
6.1.1 Allgemein	42
6.1.2 Ergebnisse der Widerstandsmessungen.....	43
6.1.3 Messung des Wassergehalts	48
6.2 Bestimmung von Materialkennwerten am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP	50
6.2.1 Allgemein	50
6.2.2 Prüfergebnisse des Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP	51
6.3 Bestimmung der Isothermen	54
6.3.1 Bestimmung der Widerstands Isothermen	55
6.3.2 Bestimmung der Sorptions Isothermen	58
6.4 Vergleich der Sorptions Isothermen Labor/IBP	62
6.4.1 Sorptions Isotherme Aarwangen	62
7 Numerische Simulation mit WUFI Pro®.....	65
7.1 Allgemein	65
7.2 Klimadaten	65
7.2.1 Wahl der Aussen Klimadaten	65
7.2.2 Wahl der Innen Klimadaten	65
7.2.3 Aufbereitung der Klimadaten	65
7.3 Bauteileingabe	66
7.3.1 Aarwangen.....	66
7.3.2 Brüttelen	70
7.3.3 Bütschwil.....	74
7.4 Umgebungs-, Anfangs- und Steuerungsbedingungen	77
7.4.1 Eigenschaften der Oberflächen	77
7.4.2 Anfangsbedingungen und Simulationsperiode	77
7.5 Ergebnisse der numerischen Simulationen mit WUFI Pro®	78
8 Ergebnisse der in situ Messungen im Vergleich mit den numerischen Simulationen	79
8.1 Aarwangen.....	79
8.1.1 Legende Sensoranordnung	79
8.1.2 Vergleich in situ Messungen und Simulation des Objektes in Aarwangen	79
8.2 Brüttelen	83
8.2.1 Legende Sensoranordnung	83
8.2.2 Vergleich in situ Messungen und Simulation des Objektes in Brüttelen	83
8.3 Bütschwil.....	86

8.3.1	Legende Sensoranordnung.....	86
8.3.2	Vergleich in situ Messungen und Simulation des Objektes in Bütschwil	86
8.4	Differenzen zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur, resp. relativen Feuchte	89
9	Fazit und Ausblick.....	95
10	Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	95
10.1	Umfang des Berichts	97
11	Verzeichnisse.....	98
11.1	Tabellenverzeichnis.....	98
11.2	Abbildungsverzeichnis.....	100
11.3	Literaturverzeichnis	109
Anhang A1:	Kalibrierschein der Firma Scantronik	110
Anhang B1:	Kurzbeschreibung Amt für Kultur/ Denkmalpflege Kanton Bern - Brüttelen	111
Anhang B2:	Kurzbeschreibung Amt für Kultur/ Denkmalpflege Kanton Bern - Aarwangen.....	112
Anhang C1:	IBP-Prüfbericht des Aussenputzes in Aarwangen	113
Anhang C2:	IBP-Prüfbericht des Mauerwerks in Aarwangen	118
Anhang C3:	IBP-Prüfbericht des Mauerwerks in Brüttelen	122
Anhang D1:	Datenblatt Isover PB M 035	126
Anhang D2:	Datenblatt Flumroc Dämmplatte 1	127
Anhang D3:	Datenblatt Flumroc Dämmplatte 3	128
Anhang D4:	Datenblatt pro clima Intello.....	129
Anhang D5:	Datenblatt Fermacell Gipsfaser-Platte	130
Anhang D6:	Datenblatt isofloc LM.....	131
Anhang D7:	Datenblatt Fermacell Gipsfaser-Platte	132
Anhang E1:	Widerstandsisotherme.....	133
Anhang E2:	Sorptionisotherme.....	136
Anhang F1:	WUFI Pro [®] -Bericht Aarwangen.....	140
Anhang F2:	WUFI Pro [®] -Bericht Brüttelen	158
Anhang F3:	WUFI Pro [®] -Bericht Bütschwil.....	178
Anhang G1:	Vergleich in situ Messungen/Simulation Aarwangen.....	186
Anhang G2:	Vergleich in situ Messungen/Simulation Brüttelen.....	192
Anhang G3:	Vergleich in situ Messungen/Simulation Bütschwil	199



1 Ausgangslage

Der Schweizer Gebäudepark hält 2010 mit 1.64 Millionen Wohngebäuden einen Anteil von 46 % des inländischen Gesamtenergieverbrauchs [1] [2]. Die Quote der energetischen Sanierungen am Gebäudebestand liegt derzeit bei 0.9 Prozent [1].

Um die Ziele der Energiestrategie 2050 sowie der 2000-Watt-Gesellschaft erreichen zu können, ist eine umfassende Sanierung des Gebäudebestands unabdingbar. Zu diesem zählen auch historische Gebäude, welche vor 1919 erbaut wurden. Diese machen einen Anteil von rund 20 % des Schweizer Gebäudebestands aus [3]. Historische Gebäude verursachen damit einen beträchtlichen Anteil des Energiebedarfs. Wären alle Altbauten der 1920er bis 1970er Jahre bereits umfassend saniert, so würden historische Gebäude erbaut vor 1920 heute rund 60 % des Heizwärmebedarfs erzeugen [4].

Im ersten Massnahmenpaket zur Energiestrategie 2050 des BFE wird dazu aufgefordert, auch bei historischen Einzelbauten sowie Gebäuden in geschützten Ortsbildern bei jeder Gebäudesanierung energetische Massnahmen zu prüfen. Jedoch soll hier eine sorgfältige Abwägung zwischen den Interessen der Verringerung des Energieverbrauchs und den Anliegen des Denkmalschutzes stattfinden [1].

Der Einsatz einer innenliegenden Wärmedämmung stellt bei vielen historischen Gebäuden die einzige denkmalgerechte und wirtschaftliche Sanierungsmöglichkeit dar. Diese Sanierungsart weist aus bauphysikalischer Sicht jedoch hohe Schadensrisiken auf. Durch den Einbau einer innenliegenden Wärmedämmung ändern sich die Wärmeströme und Feuchtegehalte des Bauteils. Diese Veränderungen werden in der Planungspraxis vermehrt mit numerischen Simulationen der Wärme- und Feuchteströme im Bauteil prognostiziert. Hierbei bestehen aber noch Unsicherheiten bezüglich einiger Eingabeparameter. Aktuell werden auch einzelne Kriterien zur Beurteilung der bauphysikalischen Funktionsfähigkeit der sanierten Bauteile diskutiert.

Langzeitmessungen der Temperatur und Bauteilfeuchte von sanierten Bauteilen sollen Messdaten zur Validierung der Eingabeparameter liefern. Ziel der Validierungsmessungen ist es, eine Verbesserung der Genauigkeit der Prognosen zu erreichen.

Damit werden sichere Sanierungslösungen mit langen Lebensdauern für die Gebäudesubstanz entwickelt, um historische Gebäude langfristig zu erhalten.

2 Projektbeteiligte

2.1 Vertragsbeteiligte

Projektleitung:	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Einheit Holz- und Verbundbau Solothurnstrasse 102, Postfach, CH-2500 Biel 6 Projektverantwortung: Prof. Dr. Christoph Geyer
Wirtschaftspartner:	Flumroc AG Industriestrasse 8 CH-8890 Flums Ansprechpartner: Patrick Sägesser, Christoph Egli
	Isofloc AG Soorpark CH-9606 Bütschwil Ansprechpartner: Lorenz Neher, Willi Senn
	Saint-Gobain ISOVER SA Napfstrasse 52 CH-1522 Lucens Ansprechpartner: Martin Bohnenblust
	pro clima schweiz GmbH Oberdorf 21 CH-8460 Marthalen Ansprechpartner: Michael Wehrli

2.2 Forschende der Berner Fachhochschule

Name:	Christoph Geyer
Ausbildung	Dr. rer. nat. Dipl. Phys., Professor für Bauphysik
Spezialkenntnisse:	Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Wärme- und Schallschutz
Adresse:	Solothurnstrasse 102, Postfach, CH-2500 Biel 6
Funktion:	Projektverantwortung
Name:	Andreas Masuch
Ausbildung	Dipl. Bauingenieur (Vertiefung konstruktiver Hochbau), Wiss. Mitarbeiter
Spezialkenntnisse:	Mehrjährige Tätigkeit im Fassadenbau und im Bereich Bauphysik
Adresse:	Wärme- und Feuchteschutz, Schallschutz, Prüfverfahren Solothurnstrasse 102, Postfach, CH-2500 Biel 6
Funktion:	Projektleitung



Name: Barbara Wehle
Ausbildung: M. Sc. Holztechnik (Vertiefungsrichtung Bauphysik), Wiss. Mitarbeiterin
Spezialkenntnisse: Mehrjährige Forschungstätigkeit im Bereich Wärme- und Feuchteschutz, Mitarbeit im Projekt SuRHiB
Adresse: Solothurnstrasse 102, Postfach, CH-2500 Biel 6
Funktion: Projektmitarbeiterin

Name: Federico Gariglio
Ausbildung: B. Sc. Holztechnik (Vertiefungsrichtung TST), Wiss. Assistent
Spezialkenntnisse: Wärme- und Feuchteschutz, Mitarbeit in diversen Projekten
Adresse: Solothurnstrasse 102, Postfach, CH-2500 Biel 6
Funktion: Projektmitarbeiter

3 Vorgehensweise

3.1 Allgemein

Das Forschungsvorhaben besteht aus folgenden Arbeitsschritten:

- Auswahl der Messobjekte für die Langzeitmessungen
- Dokumentation der Messobjekte und Entnahme von Materialproben
- Installation der Messtechnik
- Durchführung der Langzeitmessung (Monitoring)
- Materialmessungen im Labor
- Numerische Simulationen der Wärme- und Feuchteströme im Bauteil
- Vergleich Langzeitmessung und Simulation

3.2 Auswahl der Messobjekte für das Monitoring

Die Auswahl der Messobjekte für das Monitoring wird zusammen mit den Wirtschaftspartnern durchgeführt. Pro Innendämmsystem (IDS) wird eine Baumassnahme untersucht. Es werden insgesamt drei Gebäude zur Untersuchung ausgewählt. Es wird darauf geachtet, dass die Sanierung der ausgewählten Objekte mit Innendämmsystemen nach heutigem Stand der Technik und mit typischen Dämmstoffdicken erfolgt. Sonderlösungen beziehungsweise kritische Dämmstoffdicken werden nicht in Betracht gezogen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Untersuchungen eine hohe Relevanz in Bezug auf den Schweizer Gebäudebestand sowie die heutige Sanierungstätigkeit aufweisen. Die Auswahl der Gebäude ist idealerweise so zu treffen, dass stündliche Aussenklimamesswerte (relative Luftfeuchte, Aussentemperatur, Normalregen, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung) von einer möglichst nahe gelegenen Wetterstation bezogen werden können. Weitere Anforderungen an die Auswahl der Messobjekte sind in Kapitel 5.1 beschrieben.

3.3 Dokumentation der Messobjekte und Entnahme von Materialproben

Vor Einbau eines IDS ist eine detaillierte Aufnahme der Bestandskonstruktion notwendig. Neben dem allgemeinen baulichen Zustand werden die Bauteilaufbauten, sowie einige Materialeigenschaften der Baustoffe untersucht und dokumentiert. In diesem Zusammenhang sind besonders die Dicke der einzelnen Bauteilschichten und die hygrothermischen Eigenschaften der Materialien von besonderer Bedeutung. Sofern diese Eigenschaften nicht bekannt sind, was vorwiegend auf die bestehenden Aussenputze und Mauerwerke zutrifft, werden Materialproben für Messungen im Labor durchgeführt. Die Kenntnis der hygrothermischen Eigenschaften der Materialien erhöht die Genauigkeit der Eingabeparameter für die numerischen Simulationen (siehe auch Kapitel 3.5).

3.4 Installation der Messtechnik und Durchführung der Langzeitmessung (Monitoring)

Nach Auswahl und Bestandsaufnahme der Gebäude erfolgt die Installation der Messtechnik zur Langzeituntersuchung der Bauteiltemperaturen und der Feuchtegehalte der Konstruktionen. Gemessen wird das Innenraumklima (Raumlufthtemperatur und relative Raumlufftfeuchte), die Oberflächentemperaturen an der Grenzschicht zwischen IDS und Bestandswand. Zum späteren Vergleich mit den Ergebnissen der numerischen Simulationen ist auch die Erfassung der Materialfeuchte an der Grenzschicht zwischen IDS und Bestandswand sowie im Dämmstoff und Mauerwerk notwendig. Um die Randbedingungen in der Simulation genau abbilden zu können, werden stündliche Messwerte der



relativen Raumlufffeuchte und Raumlufftemperatur aufgezeichnet. Die Messungen werden über einen Zeitraum von 24 Monaten durchgeführt. Gemessen wird an der Aussenwand mit der geringsten Sonneneinstrahlung sowie an der Aussenwand mit der höchsten Schlagregenbelastung, da diese aus bauphysikalischer Sicht am kritischsten sind.

3.5 Durchführung der Materialmessungen

In den Laboren der Berner Fachhochschule steht die notwendige Messtechnik zur Bestimmung der Rohdichten, der Feuchtespeichereigenschaften (Sorptionsisothermen) und des Feuchtegehaltes von Baustoffen zur Verfügung. Forschungseinrichtungen wie das Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP, verfügen über Laboreinrichtungen zur Untersuchung des Wasseraufnahme-, und Transportvermögens von Aussenputzen und Mauerwerken, sowie der Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und des Wasserdampfdiffusionswiderstandes.

Für die Durchführung hygrothermischer Simulationen ist die Kenntnis folgender Materialkennwerte mindestens erforderlich [5]:

- Rohdichte
- Porosität
- Wärmekapazität
- Wärmeleitfähigkeit
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Zusätzlich kann die Kenntnis folgender Materialkennwerte erforderlich sein [5]:

- Feuchtespeicherfunktion (nur bei hygroskopischen Baustoffen)
- Flüssigtransportkoeffizient, Saugen (nur bei kapillaraktiven Baustoffen)
- Flüssigtransportkoeffizient, Weiterleitung (nur bei kapillaraktiven Baustoffen)

Generell gilt: Je mehr Materialeigenschaften der untersuchten Bauteile bekannt sind, desto genauer lässt sich das Bauteil in der Simulation abbilden.

Daher ist die messtechnische Erfassung dieser Materialkennwerte wesentlicher Bestandteil des Monitoring-Projektes.

3.6 Numerische Simulationen der Wärme- und Feuchteströme im Bauteil

Die Simulation der eindimensionalen Wärme- und Feuchteströme der Bauteilaufbauten erfolgt mit der Software WUFI Pro[®]. Das gemessene Raumklima sowie das Aussenklima werden, wenn möglich, in der Simulation als Randbedingung angesetzt. Die Eingabe der Materialschichten erfolgt gemäss dem tatsächlichen Wandaufbau. Die gemessenen Temperatur- und Feuchtwerte werden mit den simulierten Werten in denselben Materialschichten verglichen. Mit Hilfe der Messdaten ist eine Validierung der Simulation möglich. Hier ist beispielsweise der Feuchtegehalt des Dämmstoffes zu nennen. Stimmen Messwerte und Simulationsergebnisse hinreichend genau überein, so kann der Einfluss verschiedener Eingabeparameter in der Simulation untersucht werden.

Ziel ist eine Verbesserung der Genauigkeit der Prognosen für die Auswirkungen von Innendämmmassnahmen auf den Temperatur- und Wassergehalt von sanierten Bauteilen.

4 Messtechnik

4.1 Allgemein

Es wird ein Messsystem mit Datenfernübertragung über das Mobilfunknetz eingesetzt.

Folgende Messverfahren kommen zum Einsatz:

- Messung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung
- Temperaturmessung im Bauteil mit Temperatursensor (NTC Thermistor)
- Temperatur- und Luftfeuchtemessung im Bauteil und im Innenraum mit Thermo-Hygro-Sensor (CMOS)

In der nachfolgenden Tabelle findet sich eine Übersicht über die eingesetzte Messtechnik mit deren Funktion.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendete Messtechnik und ihre Funktion.

Nr.	Produkt	Hersteller	Funktion
1	Thermofox mit Speichererweiterung auf 64000 Messwerte	Scantronik	Einheit zur Datenerfassung und Speicherung
2	Universal HUB zum Anschluss von Temperatur- und Luftfeuchtesensoren	Scantronik	4-fach Erweiterungsmodul zu Thermofox
3	Gigamodul zum Anschluss von Elektroden zur Messung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung	Scantronik	8-fach Erweiterungsmodul zu Thermofox zur Erfassung der Materialfeuchte
4	Gigamodul Messleitung	Scantronik	Verbindung zwischen Gigamodul und Elektrode
5	Elektrode aus V2A, teflonisoliert	Gann	Messung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung
6	Thermo-Hygro-Sensor (CMOS)	Scantronik	Temperatur- und Luftfeuchtesensor
7	Temperatursensor	Scantronik	Temperaturmessung
8	Remotefox	Scantronik	Datenfernübertragung der Messdaten per E-Mail über das Mobilfunknetz
9	Antennenverlängerung (2.5 m) zum Remotefox	Scantronik	Bessere Positionierung der Antenne zur Verbesserung der Sendeleistung zur Datenfernübertragung im Mobilfunknetz (z.B. aus Keller heraus)



4.2 Messung der Materialfeuchte

Für die Bestimmung der Materialfeuchtigkeit wird der elektrische Widerstand des Materials gemessen. Dabei wird ausgenutzt, dass Wasser eine höhere elektrische Leitfähigkeit als trockene Baustoffe hat. Daher hängt der elektrische Widerstand eines Baustoffes vom Wassergehalt ab.

Abbildung 1 zeigt die drei massgeblichen Bestandteile zur Messung der Materialfeuchte.

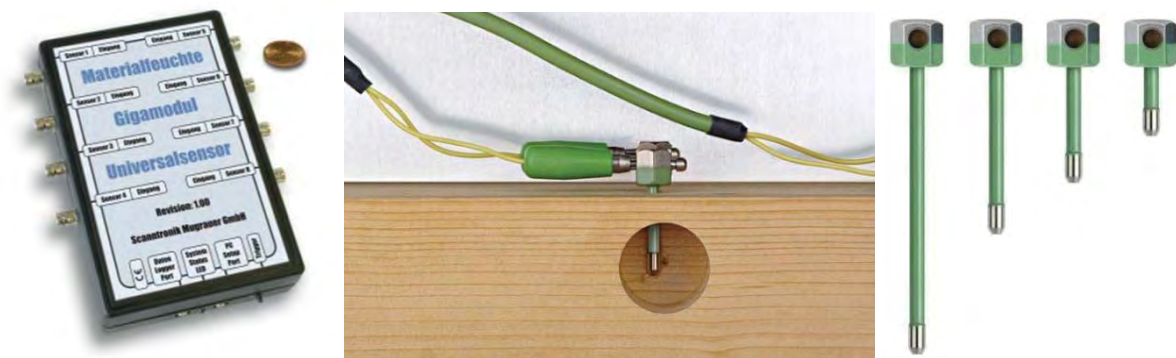


Abbildung 1: 8-fach Erweiterungsmodul, Messleitung und Elektroden zur Messung der Materialfeuchte in Putz und Mauerwerk.

Zwei Elektroden werden mit einem Abstand von 30 mm im Material positioniert. Die Elektroden werden im rechten Winkel zur Bauteiloberfläche eingebracht. Die Elektroden bestehen aus nichtrostendem Stahl (V2A), der Schaft ist teflonisoliert, um die Materialfeuchte einer möglichst dünnen Schicht zu messen.

Die Länge der Elektroden bestimmt, in welcher Tiefe die Materialfeuchte gemessen wird. Für die vorliegenden Messobjekte wurde die max. Sondenlänge von 70 mm verwendet.

Im Aussenputz werden als Elektrodenpaar zwei Edelstahlschrauben mit einer Länge von 15 mm zur Widerstandsmessung verwendet.

Im Mauerwerk erfolgt die Messung der Materialfeuchte ebenfalls über die Messung des elektrischen Widerstands des Materials zwischen den beiden Spitzen eines Elektrodenpaares. Die Messung der Materialfeuchte im Aussenputz gibt den Mittelwert des elektrischen Widerstandes über die Putzdicke wieder.

Der elektrische Widerstand muss mittels einer Kalibrierkurve in einen Wassergehalt des Materials umgerechnet werden.

Zum Erstellen dieser Kalibrierkurve ist es deshalb notwendig, vor Ort Materialproben für Labormessungen zu entnehmen. Danach werden die Proben in eine Klimakammer eingebracht, um eine bestimmte Materialfeuchte einzustellen. Dann wird die Materialfeuchte mittels Wägung bestimmt und gleichzeitig der zugehörige elektrische Widerstand gemessen. Mit dem so gewonnenen Zusammenhang zwischen Wassergehalt und elektrischem Widerstand lassen sich dann die in situ gemessenen elektrischen Widerstände in einen Feuchtegehalt des Bauteils umrechnen.

4.3 Messung hygrothermischer Kennwerte

Zur Messung hygrothermischer Kennwerte im Aussenputz, Mauerwerk, Wärmedämmung und dem Innenraum kommen zwei weitere Messsensoren zur Anwendung.

Zur Messung der Temperatur im Bauteil wird ein Temperatursensor (NTC Thermistor) verwendet. NTC Thermistoren (auch Heissleiter genannt) sind Materialien beziehungsweise Widerstände, deren elektrischer Widerstand einen negativen Temperaturkoeffizienten besitzt. Das bedeutet, dass sie bei hohen Temperaturen elektrischen Strom besser leiten als bei tiefen Temperaturen.

Zur Messung von Temperatur und relativer Feuchte im Bauteil und Innenraum wird ein Thermo-Hygro-Sensor verwendet. Für die Messungen im Bauteil werden, als Sonderanfertigung, Thermo-Hygro-Sensoren mit einer 0.5 m langen Kabelverlängerung verwendet, um den Bauteilaufbau so wenig wie möglich zu stören.

Der Thermo-Hygro-Sensor wird direkt an die Einheit zur Datenspeicherung angeschlossen, der über je einen externen Eingang für einen Thermo-Hygro-Sensor verfügt. Mit dem 4-fach Erweiterungsmodul können bis zu vier Thermo-Hygro-Sensoren je Einheit zur Datenspeicherung angeschlossen werden.

Abbildung 2 bis Abbildung 5 zeigen die vier Bestandteile zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.



Abbildung 2: Gerät zur Datenspeicherung.



Abbildung 3: 4-fach Erweiterungsmodul mit angeschlossenem Thermo-Hygro-Sensor ohne Kabelverlängerung.



Abbildung 4: Thermo-Hygro-Sensor mit Kabelverlängerung.



Abbildung 5: Temperatursensor.

Die Positionierung der Sensoren zur Bestimmung der thermisch-hygrischen Kennwerte im Putz und Mauerwerk erfolgt über Bohrlöcher in welche die Sensoren eingeschoben werden. Die Bohrungen für die Sensoren sind im 90° Winkel zur Bauteiloberfläche gesetzt worden.

4.4 Datenfernübertragung

Trotz der Erweiterung der Einheit zur Datenspeicherung auf 64000 Messwerte ist die Speicherkapazität bezogen auf die Dauer der Messung zu klein. Bei stündlicher Erfassung der Daten aller Messsensoren müsste die Einheit zur Datenspeicherung ca. alle 3 bis 4 Monate vor Ort ausgelesen werden. Je nach Standort der Messobjekte kann dies sehr zeitaufwendig sein. Es ist auch keine permanente Überwachung der Messergebnisse, und damit der Funktion der Messsensoren möglich. Aus diesem Grund werden an jedem Messobjekt zwei batteriebetriebene Geräte zur Datenfernübertragung mit GPRS-Modem verwendet. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen ein Gerät zur Datenfernübertragung mit Anschlussmöglichkeiten.



Abbildung 6: Gerät zur Datenfernübertragung mit Batteriepack.



Abbildung 7: Anschlussmöglichkeiten für Sensoren.

Die eingesetzten Datenübertragungseinheiten sind so konfiguriert, dass Sie in regelmässigen Abständen die gesammelten Messdaten der Einheiten zur Datenspeicherung automatisch per E-Mail übertragen. Die aktuelle Konfiguration löst eine tägliche Datenübertragung aus, die aus Gründen der geringeren Netzauslastung nachts zwischen zwei und vier Uhr stattfindet. Die Speicherung der Daten in den Einheiten zur Datenspeicherung funktioniert nach dem Prinzip eines Ringspeichers, das heisst, dass bei Erreichen der Speicherkapazität die ältesten Daten mit den aktuellen Daten überschrieben werden.

Durch die Datenfernübertragung ist eine einfache und regelmässige Kontrolle der Messwerte und der Funktion der Sensoren vom Arbeitsplatz aus möglich.

4.5 Software

Die Firma Scantronik Mugrauer GmbH liefert neben der Messtechnik auch die dazugehörige Software SoftFOX. Mit dieser Software ist eine Datenanalyse und detaillierte Auswertung der Messergebnisse möglich. Aus dem Programm SoftFOX heraus ist es möglich, die vorliegenden Daten nach Excel zu exportieren, um diese dort weiterzuverarbeiten. Das Programm SoftFox dient auch zur Konfiguration der Messtechnik.

4.6 Kalibrierung

Die verwendete Messtechnik ist vom Hersteller werksseitig kalibriert und unterliegt, im Rahmen der Projektdauer, keinem Alterungsprozess. Dabei werden die Temperatursensoren (NTC Thermistor) werksseitig einer Kalibrierung unterzogen. Nach Angaben des Herstellers ist eine typische Abweichung von ca. $\pm 0.2 - 0.3$ K zu berücksichtigen.

Die Thermo-Hygro-Sensoren (CMOS) werden ebenfalls werksseitig kalibriert. Beispielhaft für alle Thermo-Hygro-Sensoren (CMOS) ist im Anhang A ein Kalibrierdokument abgebildet.

Sofern die Thermo-Hygro-Sensoren nach Messende aus den Objekten ausgebaut werden können, werden diese im Labor mittels Salzlösung nachkalibriert.



5 Messobjekte

5.1 Allgemein

Die Auswahl der Messobjekte (Gebäude) für das Monitoring erfolgt in enger Absprache mit den Wirtschaftspartnern. Pro Wirtschaftspartner wird ein Messobjekt mit Messtechnik ausgestattet. Dadurch können im Rahmen des Forschungsprojektes drei unterschiedliche Innendämmsysteme (IDS) untersucht werden. Je Messobjekt werden zwei Aussenwände mit Messtechnik bestückt. Dies an der Aussenwand mit der geringsten Sonneneinstrahlung (Nord) sowie an der Aussenwand mit der höchsten Schlagregenbelastung (West), da diese aus bauphysikalischer Sicht am kritischsten sind.

Die Messobjekte sollten idealerweise die folgenden Kriterien erfüllen:

- Es besteht eine hohe Bereitschaft der Eigentümer, Planer und ausführenden Firmen zur Teilnahme am Forschungsprojekt.
- Es ist ein ungestörter, homogener Wandaufbau auf einer Fläche von ca. 2 m x 2 m vorhanden.
- Zur Installation der Messtechnik sind die Aussen- und Innenbereiche leicht zugänglich.
- Die Entnahme von Materialproben wird vom Eigentümer geduldet.
- Eine professionelle Klimastation ist in der Nähe.
- Die Messausrüstung kann an Wänden mit der Ausrichtung Nord und West installiert werden.
- Wartungsbesuche für Batteriewechsel oder die Behebung von Problemen ist während der Messdauer möglich.
- Der Ausbau der Messtechnik nach Projektende ist gewährleistet.
- Vorhandensein eines Mobilfunknetzes zur Datenfernübertragung.

Bei der Objektsuche zeigte sich, dass sich die Auswahl geeigneter Messobjekte schwieriger gestaltete als erwartet. Massgebliche Gründe waren die mangelnde Eignung der verbauten Materialien, nicht genügend grosse ungestörte Wandbereiche für das Monitoring und die mangelnde Bereitschaft der Eigentümer zur Teilnahme. Aus diesem Grund liegt zwischen dem Einbau der Messtechnik und dem Beginn des Monitorings zwischen dem ersten und letzten Messobjekt ein Zeitraum von ca. 9 Monaten. Die ausgewählten Messobjekte für dieses Projekt sind wie folgt:

- Messobjekt Aarwangen mit Innendämmung des Projektpartners Flumroc AG und einer feuchtevariablen Dampfbremse des Wirtschaftspartners pro clima schweiz GmbH
- Messobjekt Brüttelen mit Innendämmung des Projektpartners Isover SA
- Messobjekt Soorpark Bütschwil mit Innendämmung des Projektpartners Isofloc AG

Nachfolgend werden die drei vorhandenen Messobjekte näher beschrieben.

5.2 Aarwangen (Innendämmsystem der Firma Flumroc AG)

5.2.1 Allgemein

Das Messobjekt Aarwangen ist Teil eines Bauernhofes und befindet sich geografisch ca. 1.5 km ausserhalb der Ortschaft Aarwangen in südwestlicher Richtung. Es befindet sich ferner etwas abgesetzt von den anderen Höfen der kleinen Ortschaft Meiniswil südlich der Aare im Kanton Bern. Das Messobjekt ist Teil eines grossen Mehrzweckbaus und wird als Wohnhaus genutzt. Der Bauernhof besteht neben dem grossen Mehrzweckbau noch aus weiteren, gewerblich (Stall, usw.) genutzten Gebäuden. Das Messobjekt wird derzeit einer Komplettsanierung unterzogen. In Zuge dieser Arbeiten wird das bestehende Mauerwerk mit einer Innendämmung der Firma Flumroc AG ausgestattet.

Der weitere Einbau der Komponenten des Innendämmsystems, wie z. B. der raumseitigen Verkleidung oder der Dampfbremse erfolgten durch den Bauherrn selbst.

Tabelle 2: Steckbrief Messobjekt Aarwangen.

Steckbrief	
Ort	Meiniswilstrasse 51, CH-4912 Aarwangen
Baujahr	ca. 1908
Nutzung	Wohnnutzung
Bewertung Denkmalpflege	Erhaltenswert, K-Objekt
Höhenlage	ca. 437 m ü.M.
Aussenwand	Hochlochziegel im Verbund
Innendämmung	Flumroc Dämmplatte 1; Flumroc Dämmplatte 3
Bestehend/Sanierung	Sanierung
Einbau Messtechnik	20.9.2014 bis 30.09.2014

Abbildung 8 bis Abbildung 12 geben einen Überblick über den Bauernhof in Aarwangen und enthalten Ansichten des Messobjektes vor dem Einbau der Messtechnik.



Abbildung 8: Vogelperspektive Gebäudekomplex Aarwangen mit Messobjekt Wohnhaus (grün). Bild aus Google Earth aufgerufen am 24. November 2014.



Abbildung 9: Ansicht Südwestwand des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen.



Abbildung 10: Ansicht Nordwestwand des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen.



Abbildung 11: Ansicht der Westecke des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen, an die links die nach Nordwest orientierte Wand anschliesst.



Abbildung 12: Ansicht Westecke des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen, an die links die nach Südwest orientierte Wand anschliesst.

5.2.2 Wandaufbau

Tabelle 3 gibt den Wandaufbau des Messobjektes nach der Sanierung wieder.

Tabelle 3: Sanierter Wandaufbau von aussen nach innen im Messobjekt Aarwangen.

Bauteil	Dicke	Material
Aussenputz	ca. 1 cm	k.A.
Aussenwand	ca. 30 cm	Hochlochziegel im Verbund
Wärmedämmung	8 cm	Flumroc Dämmplatte 1, Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0.035$ W/(m*K) (siehe Anhang D2)
Dampfbremse	-	Feuchtevariable Dampfbremse pro clima Intello, Sd-Wert 0.25 bis 25 m (siehe Anhang D4)
Wärmedämmung	4 cm	Flumroc Dämmplatte 3 in Installationsebene, Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0.033$ W/(m*K) (siehe Anhang D3)
Verkleidung Innen	1.5 cm	Fermacell Gipsfaser-Platte (Produktdatenblatt siehe Anhang D5)

5.2.3 Messtechnik

Abbildung 13 bis Abbildung 15 zeigen die Einbauorte der Sensoren, wie sie für das Messobjekt in Aarwangen ausgewählt wurden.

Der Raum, in dem die Sensoren eingebaut sind, verfügt über Aussenwände mit Nordwest- und Südwest-Ausrichtung.

Das Messfeld in der Nordwestwand befindet ca. 90 cm über dem Boden und von innen betrachtet ca. 200 cm rechts vom Aussenfenster.

Das Messfeld in der Südwestwand befindet ca. 80 cm über dem Boden und von innen betrachtet ca. 60 cm links vom Aussenfenster.

Die angegebenen Höhen beziehen sich auf den umlaufenden Steinsockel, auf dem das Mauerwerk steht. Die horizontalen Masse sind von der Kante der Fensterlaibungen im Rohbau aus gemessen.

Der Raum soll als Gäste- und Arbeitszimmer genutzt werden. Während die nach Südwesten ausgerichtete Wand der Witterung ausgesetzt ist, kann die nach Nordwest ausgerichtete Wand als weitestgehend witterungs- und sonnengeschützt betrachtet werden.

Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Positionen der Sensoren im Wandquerschnitt. Bedingung des Eigentümers zur Teilnahme am Forschungsprojekt war, dass nach Abschluss der Bauarbeiten keine Eingriffe mehr von innen erlaubt sind. Dies hat zur Folge, dass die Sensoren nach Abschluss der Messungen nicht entnommen werden können und keine Wartung oder Austausch defekter Sensoren möglich ist. Deshalb wurden zur Sicherheit, soweit möglich, die Sensoren auf der Innenseite redundant gesetzt. Die Kiste zur Aufbewahrung der Messtechnik durfte ebenfalls nicht im Gebäudeinneren positioniert werden. Diese befindet sich aussen vor der Nordwestwand im weitestgehend witterungs- und sonnengeschützten Bereich. Zur Verringerung des Korrosionsrisikos auf Bauteilen der Messtechnik, sind alle Öffnungen der Messkiste luftdicht verschlossen und im inneren befindet sich als Trockenmittel Silicagel.



Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Art und Anzahl der Messtechnik, welche am Messobjekt Aarwangen verwendet wird.

Tabelle 4: Art und Anzahl der verwendeten Messtechnik am Messobjekt Aarwangen.

Nr.	Produkt	Hersteller	Funktion	Anzahl
1	Thermofox mit Speichererweiterung auf 64000 Messwerte	Scantronik	Datenerfassung und Speicherung	4
2	Universal HUB	Scantronik	4-fach Erweiterungsmodul zu Thermofox	3
3	Gigamodul	Scantronik	8-fach Erweiterungsmodul zu Thermofox zur Erfassung der Materialfeuchte	1
4	Gigamodul Messleitung	Scantronik	Verbindung zwischen Gigamodul und Elektrode	8
5	Elektrode	Gann	Messung der Materialfeuchte im Substrat mittels Widerstandsmessung	16
6	Thermo-Hygro-Sensor (CMOS)	Scantronik	Temperatur- und Luftfeuchtesensor	11
7	Temperatursensor	Scantronik	Temperatursensor	4
8	Remotefox	Scantronik	Datenfernübertragung	2
9	Antenne zum Remotefox	Scantronik	Verbesserung der Sendeleistung	-



Abbildung 13: Einbauorte der Sensoren für das Messobjekte Aarwangen. Blau: Nordwestwand. Rot: Südwestwand. Bild aus Google Earth aufgerufen am 20. November 2014.



Abbildung 14: Detailansicht der Nordwestwand des Objekts in Aarwangen und Einbauort der Sensoren (Blau).



Abbildung 15: Detailansicht der Südwestwand des Objekts in Aarwangen und Einbauort der Sensoren (Rot).

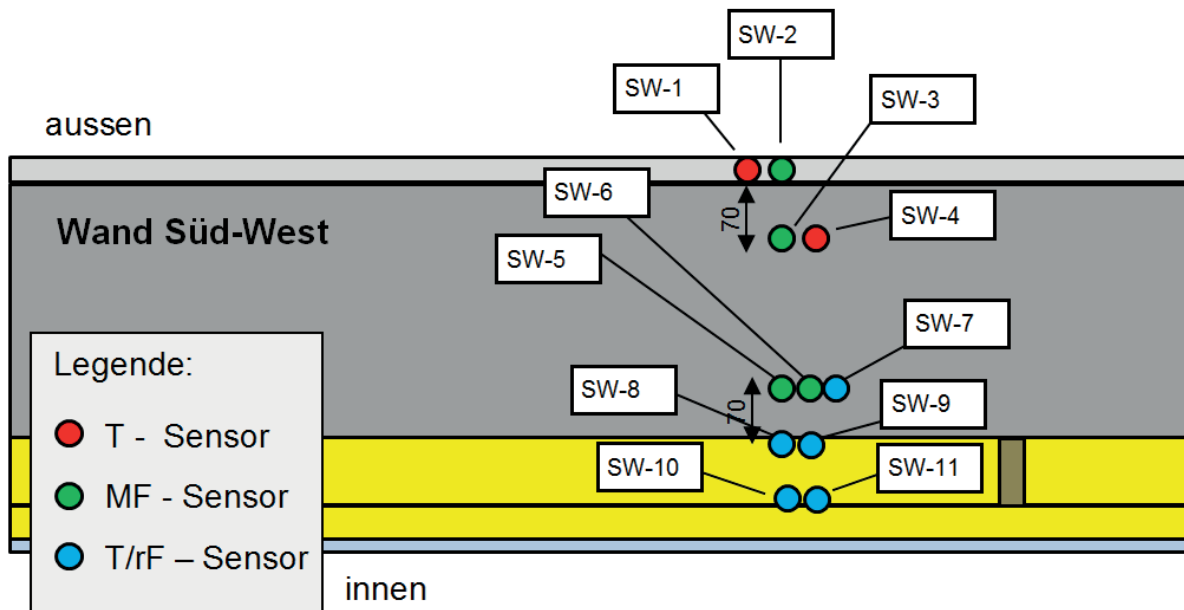


Abbildung 16: Wandquerschnitt der Südwestwand mit Sensoranordnung des Messobjektes Aarwangen. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.

Tabelle 5: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 16 für die Südwestwand.

Sensor	Ort	Benennung
Temperatur (T)	Aussenputz	SW-1
Materialfeuchte (MF)	Aussenputz	SW-2
Temperatur (T)	Mauerwerk (70 mm von aussen)	SW-4
Materialfeuchte (MF)		SW-3
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Mauerwerk (70 mm von innen)	SW-7
Materialfeuchte (MF)		SW-5
Materialfeuchte (MF)		SW-6
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche Mauerwerk innen	SW-8
		SW-9
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche erste Dämmschicht innen. Von innen betrachtet hinter Dampfbremse.	SW-10
		SW-11

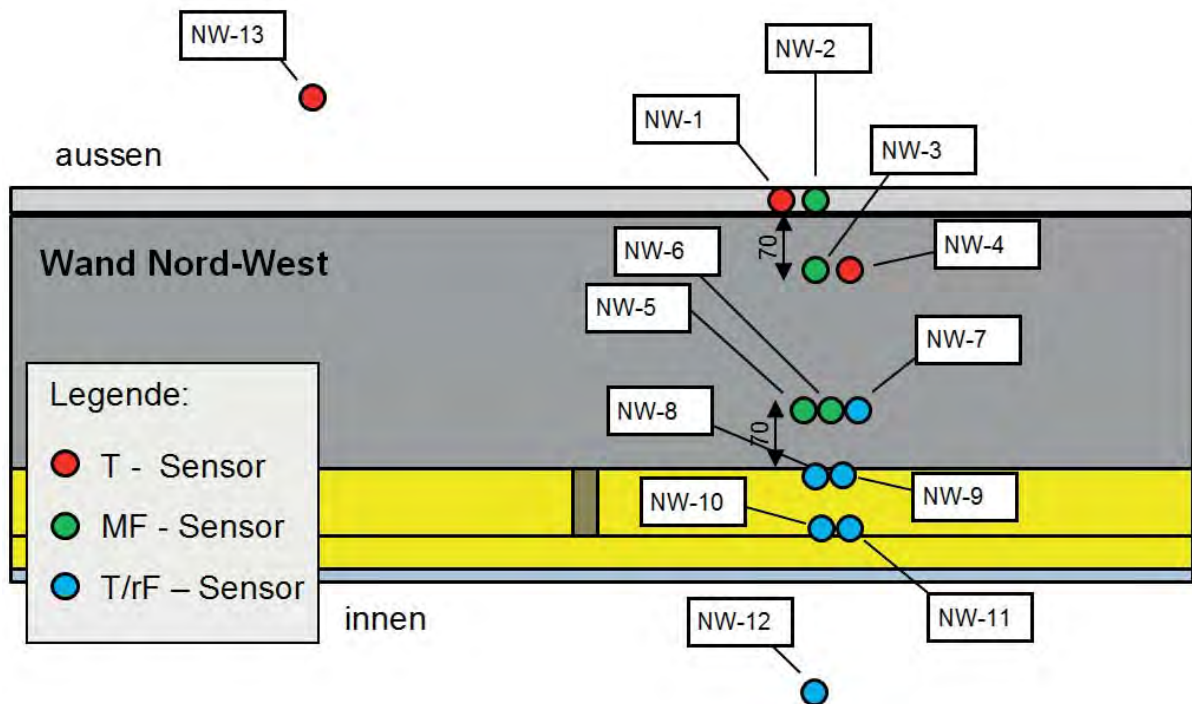


Abbildung 17: Wandquerschnitt der Nordwestwand mit Sensoranordnung des Messobjekts Aarwangen. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.

Tabelle 6: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 17 für Nordwestwand.

Sensor	Ort	Benennung
Temperatur (T)	Aussenputz	NW-1
Materialfeuchte (MF)	Aussenputz	NW-2
Temperatur (T)	Mauerwerk (70 mm von aussen)	NW-4
Materialfeuchte (MF)		NW-3
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Mauerwerk (70 mm von innen)	NW-7
Materialfeuchte (MF)		NW-5
Materialfeuchte (MF)	Oberfläche Mauerwerk innen	NW-6
Temp./rel. Feuchte (T/rF)		NW-8
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche erste Dämmschicht innen. Von innen betrachtet hinter Dampfbremse.	NW-9
		NW-10
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Innenraum Decke ca. 80 cm von Wand nord-west	NW-11
		NW-12
Temperatur (T)	Messkiste Aussenbereich	NW-13



Abbildung 18: Oben von links: Temperatur/rel. Feuchte Sensor im Mauerwerk (70 mm Tiefe), Temperatur/rel. Feuchte Sensor Oberfläche Mauerwerk, Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe).



Abbildung 19: Gesamtansicht Einbauort Sensoren Nordwestwand mit Kabeldurchführung nach aussen zu Messkiste (unten links).



Abbildung 20: Einbauort Südwestwand mit 1x Temperatur/rel. Feuchte Sensor im Mauerwerk (70 mm Tiefe), 2x Temperatur/rel. Feuchte Sensor Oberfläche Mauerwerk, 2x Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe).



Abbildung 21: Gesamtansicht Einbauort Sensoren Südwestwand mit Kabeldurchführung nach aussen zu externen Sensoren.



Abbildung 22: Ansicht Westecke des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen, an die links die nach Südwest orientierte Wand anschliesst. Die beiden Einbauorte der Sensoren befinden sich jeweils am linken und rechten Bildrand.



Abbildung 23: Ansicht Westecke nach Einbau der feuchtevariablen Dampfbremse und der neuen Fenster.

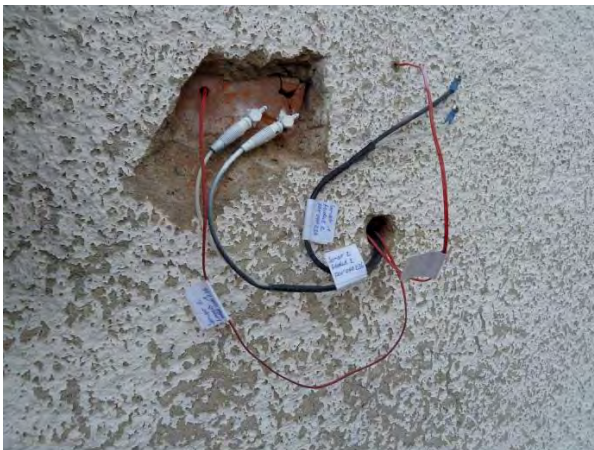


Abbildung 24: Aussenansicht Einbauort Sensoren Südwestwand. Temperatur Sensor Mauerwerk (70 mm Tiefe), Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe), Temperatur Sensor Oberfläche Mauerwerk, Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Aussenputz.



Abbildung 25: Endzustand Einbauort Sensoren Südwestwand.



Abbildung 26: Aussenansicht Einbauort Sensoren Nordwestwand. Temperatur Sensor Mauerwerk (70 mm Tiefe), Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe).

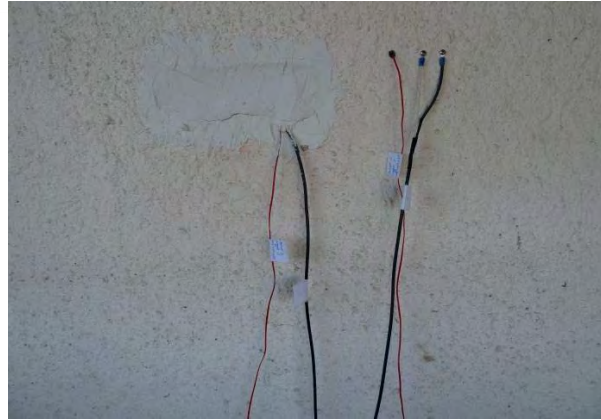


Abbildung 27: Endzustand Einbauort Sensoren Nordwestwand mit sichtbaren Sensoren zur Messung der Temperatur und Materialfeuchte im Aussenputz.



Abbildung 28: Aussenansicht Einbauort Sensoren Nordwestwand mit Temperatur Sensor Mauerwerk (70 mm Tiefe) und Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe).

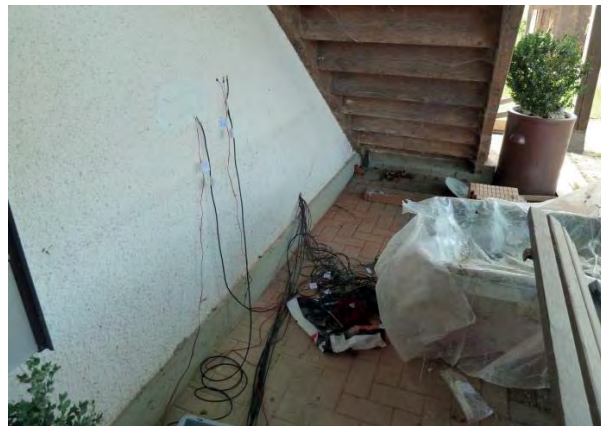


Abbildung 29: Endzustand Einbauort Sensoren Nordwestwand mit Kabeldurchführung Aussenwand vor Einbau Messgeräte in Messkiste.



Abbildung 30: Luftdicht verschlossene Messkiste im weitestgehend witterungs- und sonnengeschützten Bereich der Nordwestwand.

5.3 Brüttelen (Innendämmsystem der Firma Isover SA)

5.3.1 Allgemein

Das Messobjekt Brüttelen befindet sich geografisch zwischen den Gemeinden Brüttelen und Ins im Kanton Bern. Das Messobjekt wird als Wohnhaus genutzt und ist Teil eines Ensembles von Gebäuden, die alle zum Gehöft Fluhhof gehören. Das Gehöft besteht aus mehreren Wohn- und gewerblich (Stall, usw.) genutzten Gebäuden. Das Messobjekt selber kann als Hauptbau betrachtet werden und wird derzeit einer Komplettsanierung unterzogen. In Zuge dieser Arbeiten wird das bestehende Mauerwerk mit einer Innendämmung der Firma Isover SA ausgestattet.

In unmittelbarer Nähe zum Gehöft befindet sich ein Steinbruch. Der verwendete Bruchstein der Aussenwand wurde sehr wahrscheinlich aus diesem Steinbruch entnommen.

Tabelle 7: Steckbrief Messobjekt Brüttelen.

Steckbrief	
Ort	Fluhweg 1, CH-3237 Brüttelen
Baujahr	ca. 1900
Nutzung	Wohnnutzung
Bewertung Denkmalpflege	Erhaltenswert
Höhenlage	449 m ü.M.
Aussenwand	Bruchsteinmauerwerk (vermutlich Muschelsandstein)
Innendämmung	Isover PB M 035
Bestehend/Sanierung	Sanierung
Einbau Messtechnik	21.7.2014 bis 25.07.2014

Abbildung 31 bis Abbildung 34 geben einen Überblick über das Gehöft Fluhhof und enthalten Ansichten des Messobjektes vor dem Einbau der Messtechnik.



Abbildung 31: Vogelperspektive Gebäudekomplex Brüttelen mit Messobjekt Wohnhaus (grün). Bild aus Google Earth aufgerufen am 20. November 2014.



Abbildung 32: Ansicht Südecke des Messobjekts Wohnhaus Brüttelen, an die links die nach Südwest orientierte Wand anschliesst.



Abbildung 33: Ansicht der Westecke des Messobjekts Wohnhaus Brüttelen, an die links die nach Nordwest orientierte Wand anschliesst.



Abbildung 34: Innenansicht der Westecke des Messobjekts Wohnhaus Brüttelen, an die links die nach Südwest orientierte Wand anschliesst.

5.3.2 Wandaufbau

Die Tabelle 8 gibt den Wandaufbau des Messobjektes nach der Sanierung wieder.

Tabelle 8: Sanierter Wandaufbau von aussen nach innen im Messobjekt Brüttelen.

Bauteil	Dicke	Material
Aussenputz	ca. 2 cm	Zementputz mit Silikonharzanstrich
Aussenwand	ca. 50 cm	Bruchstein
Wärmedämmung	4 cm	Isover PB M 035, Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0.035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (Produktdatenblatt siehe Anhang D1)
Wärmedämmung	10 cm	Installationsebene mit Isover PB M 035 und feuchteadaptiver Dampfsperre Vario Xtra auf der Innenseite, s_d -Wert 0.3 bis 20 m
Wärmedämmung	3 cm	Installationsebene mit Isover PB M 035
Verkleidung Innen	1.5 cm	Fermacell Gipsfaser-Platte (Produktdatenblatt siehe Anhang D5)

5.3.3 Messtechnik

Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen die Einbauorte der Sensoren, wie sie für das Messobjekt in Brüttelen ausgewählt wurden.

Der Raum, in dem die Sensoren eingebaut sind, verfügt über Aussenwände mit Nordwest- und Südwest-Ausrichtung.

Das Messfeld in der Nordwestwand befindet sich ca. 40 cm über dem Fußboden und ca. 100 cm von der Nordecke entfernt.

Das Messfeld in der Südwestwand befindet sich ca. 40 cm über dem Fußboden und ca. 200 cm von der Nordecke entfernt.

Die angegebenen Höhen beziehen sich auf den neu eingebrachten Estrich im Fussboden des Erdgeschosses. Die horizontalen Masse sind von der Innenseite der Gipskartonplatten in der Nordecke aus gemessen.

Der Raum wird als Wohnküche genutzt. Während die nach Südwesten ausgerichtete Wand der Witterung ausgesetzt ist, kann die Nordwestwand aufgrund des grossen Dachvorstands als regen- und sonnengeschützt betrachtet werden.

Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen die Positionen der Sensoren im Wandquerschnitt. Im Bereich der Messfelder ist von der Innenseite her je eine Revisionsklappe vorgesehen. Es ist deshalb möglich die Sensoren zur Wartung, erforderlichenfalls zum Austausch und zum Ausbau bei Projektende relativ einfach zu erreichen. Die Kiste zur Aufbewahrung der Messtechnik wurde, auf Wunsch der Eigentümer, in den sich unter der Wohnküche befindenden Keller verlegt. Zur Verbesserung der Sendeleistung mussten die beiden Geräte zur Datenfernübertragung mit je einer Verlängerungsantenne nach aussen bestückt werden.

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Art und Anzahl der Messtechnik, welche am Messobjekt Brüttelen verwendet wird.

Tabelle 9: Art und Anzahl der verwendeten Messtechnik am Messobjekt Brüttelen.

Nr.	Produkt	Hersteller	Funktion	Anzahl
1	Thermofox mit Speichererweiterung auf 64000 Messwerte	Scantronik	Einheit zur Datenerfassung und Speicherung	4
2	Universal HUB	Scantronik	4-fach Erweiterungsmodul zu Thermofox	2
3	Gigamodul	Scantronik	8-fach Erweiterungsmodul zu Thermofox zur Erfassung der Materialfeuchte	1
4	Gigamodul Messleitung	Scantronik	Verbindung zwischen Gigamodul und Elektrode	6
5	Elektrode	Gann	Messung der Materialfeuchte im Substrat mittels Widerstandsmessung	12
6	Thermo-Hygro-Sensor (CMOS)	Scantronik	Temperatur- und Luftfeuchtesensor	9
7	Temperatursensor	Scantronik	Temperatursensor	5
8	Remotefox	Scantronik	Datenfernübertragung	2
9	Antenne zum Remotefox	Scantronik	Verbesserung der Sendeleistung	2



Abbildung 35: Einbauorte der Sensoren für das Messobjekt Brüttelen. Blau: Nordwestwand. Rot: Südwestwand. Bild aus Google Earth aufgerufen am 20. November 2014.



Abbildung 36: Ansicht der Einbauorte der Sensoren für das Messobjekt Brüttelen. Blau: Nordwestwand. Rot: Südwestwand

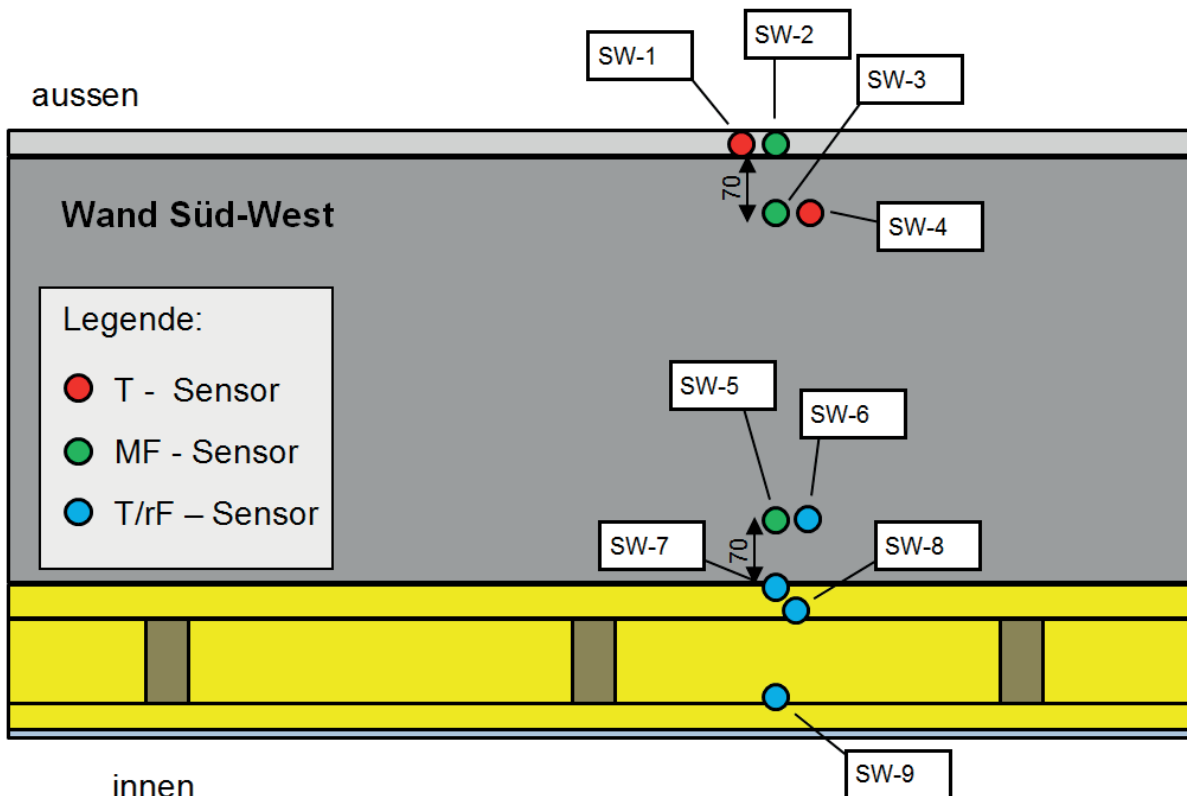


Abbildung 37: Wandquerschnitt der Südwestwand (SW) mit Sensoranordnung des Messobjekts Brüttelen. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.

Tabelle 10: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 37 für Südwestwand.

Sensor	Ort	Bezeichnung
Temperatur (T)	Aussenputz	SW-1
Materialfeuchte (MF)	Aussenputz	SW-2
Temperatur (T)	Mauerwerk (70 mm von aussen)	SW-4
Materialfeuchte (MF)		SW-3
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Mauerwerk (70 mm von innen)	SW-6
Materialfeuchte (MF)		SW-5
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche Mauerwerk innen	SW-7
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche erste Dämmschicht innen	SW-8
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche zweite Dämmschicht innen. Von innen betrachtet hinter Dampfsperre.	SW-9

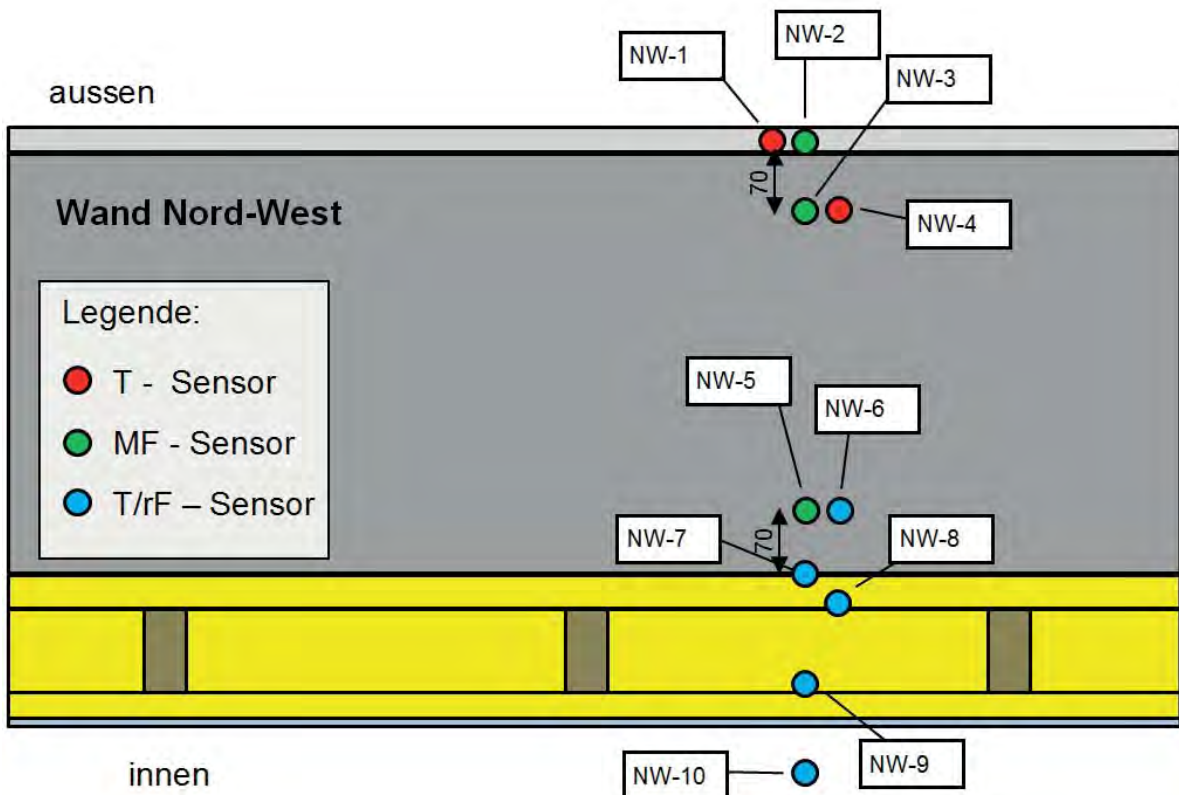


Abbildung 38: Wandquerschnitt der Nordwestwand (NW) mit Sensoranordnung des Messobjekts Brüttele. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.

Tabelle 11: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 38 für Nordwestwand.

Sensor	Ort	Benennung
Temperatur (T)	Aussenputz	NW-1
Materialfeuchte (MF)	Aussenputz	NW-2
Temperatur (T)	Mauerwerk (70 mm von aussen)	NW-4
Materialfeuchte (MF)		NW-3
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Mauerwerk (70 mm von innen)	NW-6
Materialfeuchte (MF)		NW-5
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche Mauerwerk innen	NW-7
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche erste Dämmschicht innen	NW-8
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche zweite Dämmschicht innen. Von innen betrachtet hinter Dampfsperre.	NW-9
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Innenraum Decke ca. 50 cm von Wand Nordwest	NW-10



Abbildung 39: Einbau der Sensoren innen nach Installation der Wärmedämmung in der Installations Ebene.



Abbildung 40: Einbauorte der Sensoren innen nach Installation der Dampfsperre.

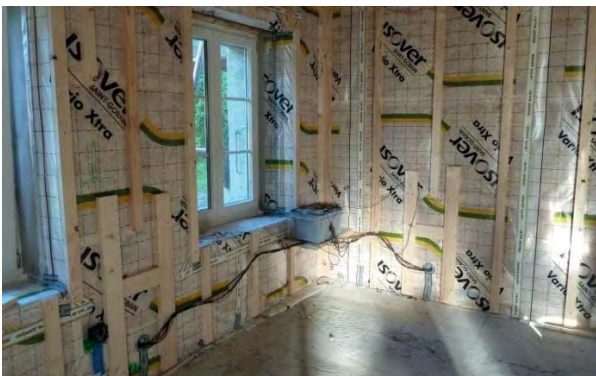


Abbildung 41: Einbauorte Sensoren innen nach Installation der Dampfsperre und Vorbereitung der Lattung für Gipskartonplatten.

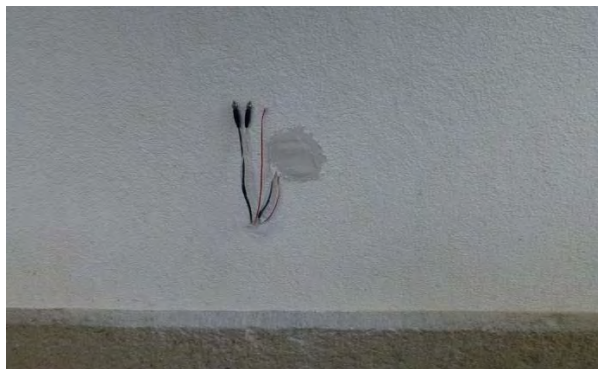


Abbildung 42: Situation aussen an der Nordwestwand nach Installation der Messsonden.



Abbildung 43: Temperatursensor und Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe) bei geöffnetem Putz.



Abbildung 45: Situation aussen Südwestwand nach Installation der Sonden zur Messung der Materialfeuchte und Temperatur im Aussenputz und Mauerwerk (70 mm Tiefe). Die Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk sind mit Lack isoliert, um nicht Widerstände im Putz zu messen.



Abbildung 44: Aussenwand Südwest nach Installation der Sonden zur Messung der Materialfeuchte und Temperatur im Aussenputz und Mauerwerk (70 mm Tiefe).



5.4 Bütschwil (Innendämmsystem der Firma Isofloc AG)

5.4.1 Allgemein

Das Messobjekt Bütschwil befindet sich in der Gemeinde Bütschwil - Ganterschwil im Kanton St. Gallen nahe des Baches Thur. Das Messobjekt wird als Werkraum für Behinderte genutzt und ist Teil eines grossen Gebäudekomplexes (Soorpark), welcher bis zum Jahr 2002 eine Spinnerei und Weberei beheimatete. Das Areal besteht aus mehreren Büro-, Verkaufs- und Produktionsgebäuden. Das Messobjekt ist ein Nebenbau und wurde einer Innensanierung unterzogen. Die isofloc AG hat im Zuge der Sanierungsarbeiten das bestehende Mauerwerk mit einer Innendämmung ausgestattet.

Tabelle 12: Steckbrief Messobjekt Bütschwil.

Steckbrief	
Ort	Soorpark CH-9606 Bütschwil
Baujahr	ca. 1958
Nutzung	Werkstatt
Bewertung Denkmalpflege	keine
Höhenlage	610 m ü.M.
Aussenwand	Backstein 35 cm, beidseitig verputzt (zwischen Betonstützen)
Innendämmung	Isofloc LM
Bestehend/Sanierung	Sanierung
Einbau Messtechnik	26.05.2015 bis 27.05.2015

Abbildung 46 bis Abbildung 48 geben einen Überblick über das Messobjekt Bütschwil und enthalten Ansichten des Messobjektes vor dem Einbau der Messtechnik.

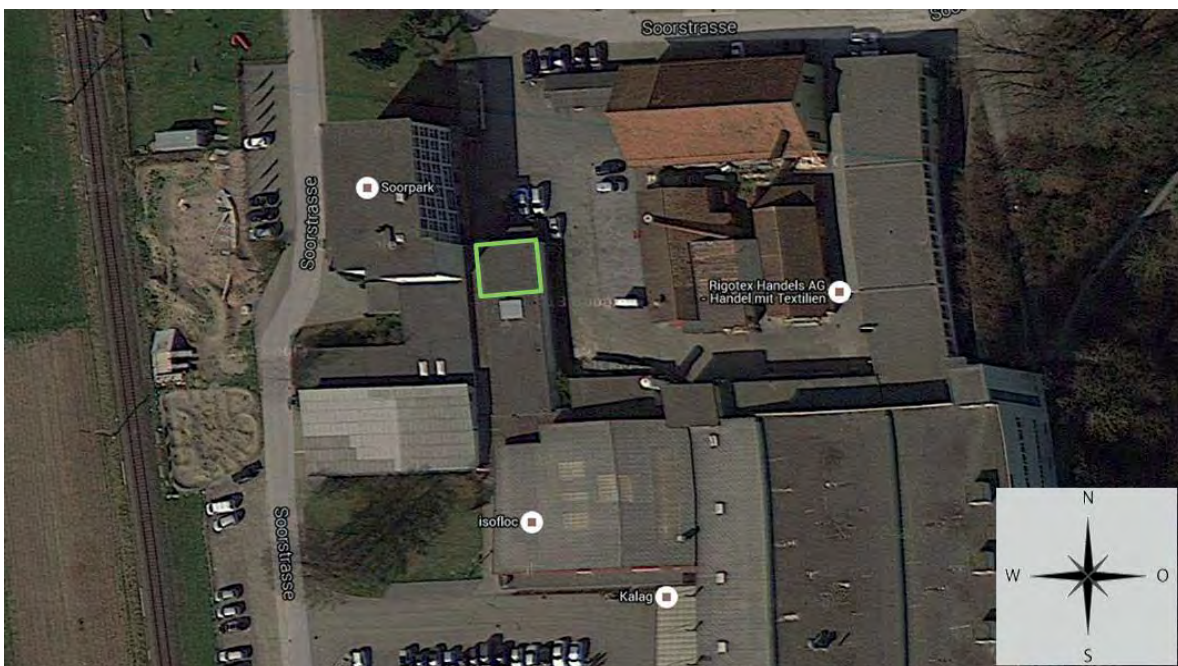


Abbildung 46: Vogelperspektive Gebäudekomplex Soorpark Bütschwil mit Messobjekt Werkstatt (grünes Viereck). Bild aus Google Earth aufgerufen am 17. November 2015.



Abbildung 47: Aussenansicht Nordostecke des Messobjekts Soorpark Bütschwil, an die rechts die nach Nord orientierte Wand anschliesst.



Abbildung 48: Innenansicht der Nordwestecke des Messobjekts Soorpark Bütschwil, an die rechts die nach Nord orientierte Wand anschliesst.

5.4.2 Wandaufbau

Die Tabelle 13 gibt den Wandaufbau des Messobjektes nach der Sanierung wieder. Die Dicke des Putzes innen und aussen variiert je nach Messstelle jeweils zwischen ca. 2.0 – 2.5 cm.

Tabelle 13: Sanierter Wandaufbau von aussen nach innen im Messobjekt Bütschwil.

Bauteil	Dicke	Material
Aussenputz	ca. 2.0 – 2.5 cm	k.A.
Aussenwand	ca. 35 cm	Backstein
Innenputz	ca. 2.0 – 2.5 cm	k.A.
Wärmedämmung	14 cm	Isofloc LM (Produktdatenblatt siehe Anhang D6)
Verkleidung Innen	1.5 cm	Fermacell Gipsfaser-Platte (Produktdatenblatt siehe Anhang D7)

Auf Initiative des Industriepartners Isofloc AG hin wurde die Konstruktion ohne Dampfbremse ausgeführt.

5.4.3 Messtechnik

Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen die Einbauorte der Sensoren, wie sie für das Messobjekt in Bütschwil ausgewählt wurde.

Der Raum, in dem die Sensoren eingebaut sind, verfügt über Aussenwände mit Nord- und Ostausrichtung. Die verbleibenden Wände grenzen an den Gang oder den benachbarten Raum an. Die Aussenwand Ost mit oberliegendem Fensterband ist betoniert und deshalb zum Einbau der Sensoren ungeeignet. Aus diesem Grund konzentriert sich das Monitoring auf die Aussenwand Nord.

An der Aussenseite der Nordwand befindet sich ein überdachter, aber offener Fahrradunterstand. Die Messstellen wurden deshalb so gewählt, dass sie einerseits weit genug vom oberen Dachabschluss (thermisch ungestörter Bereich) und andererseits nicht zu nah an der Überdachung des Fahrradunterstandes liegen (Spritzwasser bei Regen).



Von innen betrachtet befindet sich das Messfeld in der Nordwand ca. 240 cm über dem vorhandenen Boden und ca. 250 cm von der Nordwestecke entfernt.

Von aussen betrachtet, befindet sich das Messfeld in der Nordwand ca. 70 cm über der Überdachung des Velostandes und ca. 300 cm von der Nordwestecke entfernt.

Die horizontalen Masse sind von der Innen- bzw. Aussenecke der Nordwestecke aus gemessen.

Der Raum wird als Werkstatt (beheizt) genutzt.

Abbildung 51 zeigt die Positionen der Sensoren im Wandquerschnitt.

Die Kiste zur Aufbewahrung der Messtechnik durfte im Gebäudeinneren positioniert werden und befindet sich somit im geschützten Innenklima.

Abbildung 53 bis Abbildung 57 vermitteln einen Eindruck des Einbaus der Messtechnik und des Zustandes nach Fertigstellung der Arbeiten.

Tabelle 14 gibt einen Überblick über die Art und Anzahl der Messtechnik, welche am Messobjekt Bütschwil verwendet wird.

Tabelle 14: Art und Anzahl der verwendeten Messtechnik am Messobjekt Bütschwil.

Nr.	Produkt	Hersteller	Funktion	Anzahl
1	Thermofox mit Speichererweiterung auf 64000 Messwerte	Scantronik	Einheit zur Datenerfassung und Speicherung	2
2	Universal HUB	Scantronik	4-fach Erweiterungsmodul zu Thermofox	1
3	Gigamodul	Scantronik	8-fach Erweiterungsmodul zu Thermofox zur Erfassung der Materialfeuchte	1
4	Gigamodul Messleitung	Scantronik	Verbindung zwischen Gigamodul und Elektrode	6
5	Elektrode	Gann	Messung der Materialfeuchte im Substrat mittels Widerstandsmessung	12
6	Thermo-Hygro-Sensor (CMOS)	Scantronik	Temperatur- und Luftfeuchtesensor	4
7	Temperatursensor	Scantronik	Temperatursensor	4
8	Remotefox	Scantronik	Datenfernübertragung	1

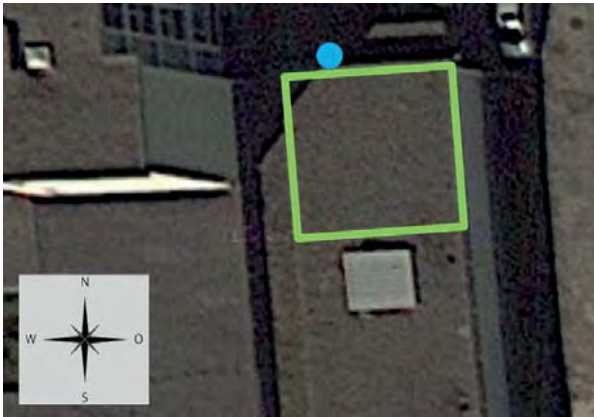


Abbildung 49: Einbauort der Sensoren für das Messobjekt Bütschwil in der Nordwand (Blau). Bild aus Google Earth aufgerufen am 17. November 2015.



Abbildung 50: Detailansicht der Nordwand in Bütschwil und Einbauort der Sensoren (Blau).

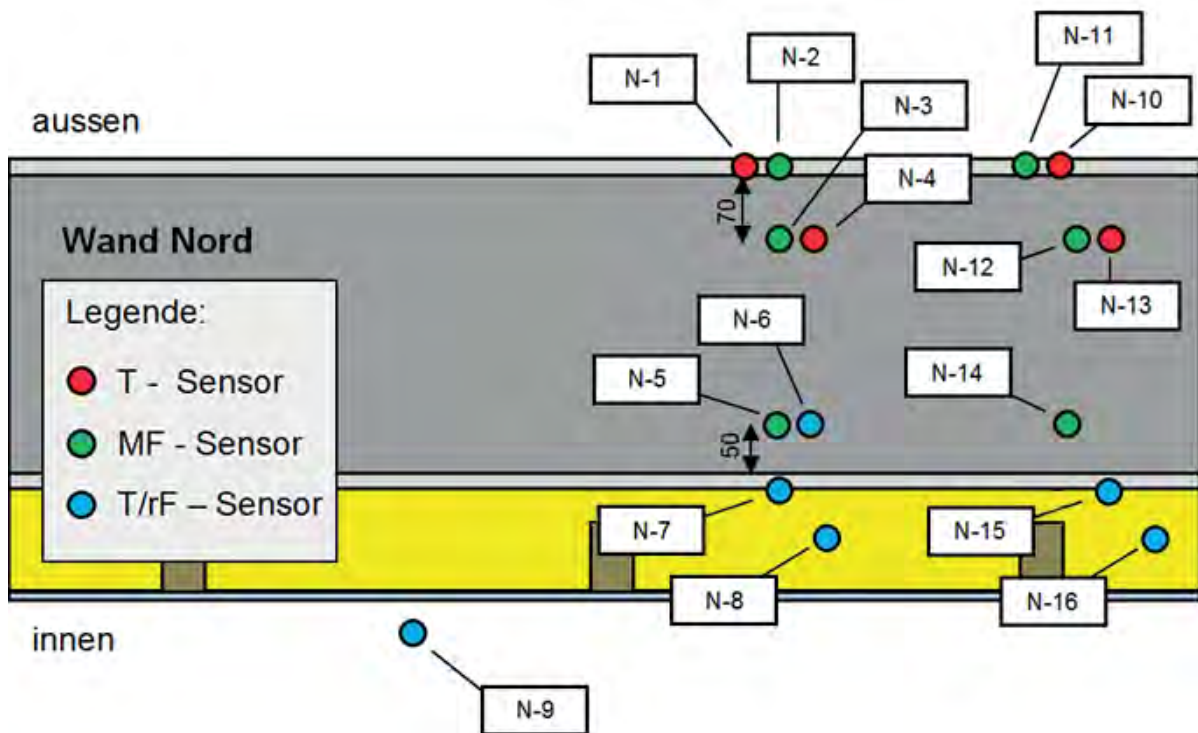


Abbildung 51: Wandquerschnitt der Nordwand mit Sensoranordnung des Messobjektes Bütschwil. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.

**Tabelle 15: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 51 für Nordwand.**

Sensor	Ort	Bezeichnung
Temperatur (T)	Aussenputz	N-1, N-10
Materialfeuchte (MF)	Aussenputz	N-2, N-11
Materialfeuchte (MF)	Mauerwerk (70 mm von aussen)	N-3
Materialfeuchte (MF)		N-12
Temperatur (T)		N-4
Temperatur (T)		N-13
Materialfeuchte (MF)		N-5
Materialfeuchte (MF)	Mauerwerk (50 mm von innen)	N-14
Temp./rel. Feuchte (T/rF)		N-6
Temp./rel. Feuchte (T/rF)		N-7
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche Mauerwerk innen	N-7
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Oberfläche Mauerwerk innen (Ersatz, nicht an Datenübertragung angeschlossen)	N-15
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Mitte Dämmschicht	N-8
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Mitte Dämmschicht (Ersatz, nicht an Datenübertragung angeschlossen)	N-16
Temp./rel. Feuchte (T/rF)	Innenraum Decke jeweils ca. 160 cm von der Nord- und Westwand entfernt.	N-9



Abbildung 52: Gesamtansicht der eingebauten Sensoren innen vor der Installation der Wärmedämmung.

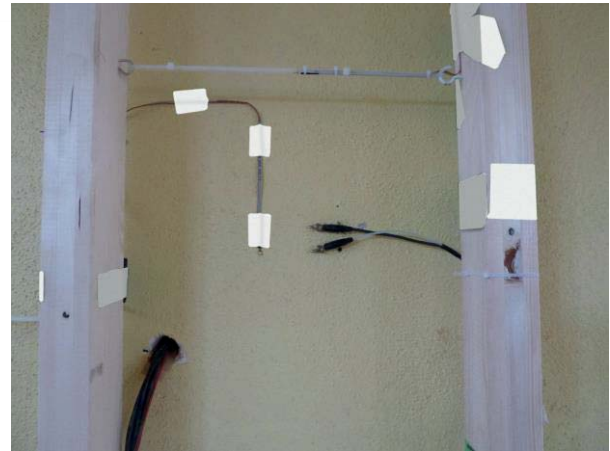


Abbildung 53: Einbauorte der Sensoren N-14 bis N-16 innen mit Kabeldurchführung vor der Installation der Wärmedämmung.

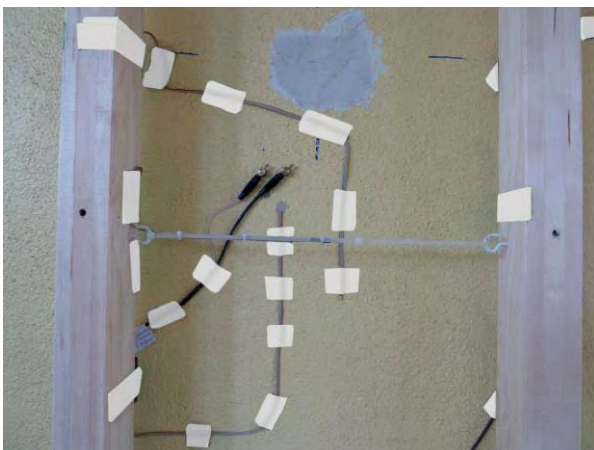


Abbildung 54: Einbauorte der Sensoren N-5 bis N-8 innen vor der Installation der Wärmedämmung.



Abbildung 55: Situation innen nach Beendigung der Sanierungsarbeiten mit Raumsensor N-9 oben links und Kiste zur Aufbewahrung der Messtechnik unten links.

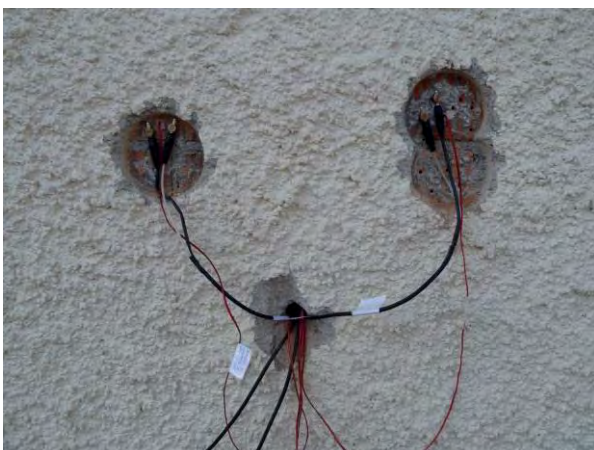


Abbildung 56: Aussenwand Nord mit Kabeldurchführung nach Installation der Sonden zur Messung der Materialfeuchte und Temperatur im Mauerwerk (70 mm Tiefe).

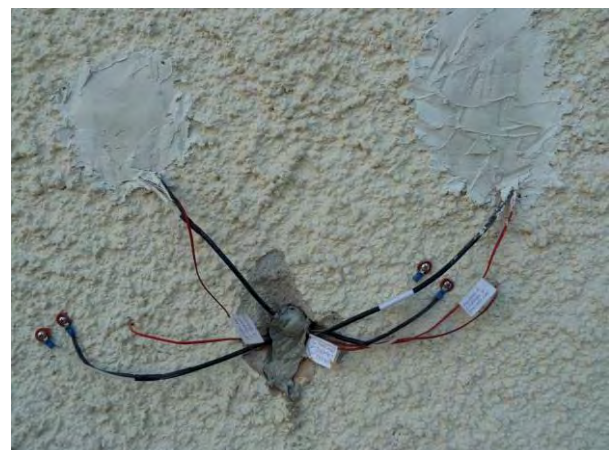


Abbildung 57: Aussenwand Nord mit Kabeldurchführung und wieder verschlossenen Putz zur Messung der Materialfeuchte und Temperatur im Putz und Mauerwerk.



6 Materialmessungen

6.1 Messung von Materialwiderständen und –feuchten im Labor der Berner Fachhochschule

6.1.1 Allgemein

Bei der Messung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung für Putz und Mauerwerk wird bei den in situ Messungen stündlich ein elektrischer Widerstand (R in Ohm) gemessen.

Da aber für die vorliegenden Baustoffe kein Tabellenwerk zur Verfügung steht, welches einen Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und dem Feuchtegehalt angibt, ist es erforderlich, die entsprechenden Messungen zur Ableitung einer Umrechnungsfunktion durchzuführen.

Dazu werden jeweils zwei Putz- und Steinproben für jedes in situ Messobjekt im Labor der BFH mit Messtechnik zur Messung des Materialwiderstandes versehen. Die Anordnung der Messsensoren (z.B. Abstand und Art der Sonden) entspricht dabei den in situ Messungen.

Die mit Messtechnik versehenen Materialproben werden in einem Klimaschrank stufenweise veränderten relativen Feuchten ausgesetzt. Nach Erreichen der Ausgleichfeuchte der Proben kann der Widerstand in den einzelnen Schichten gemessen und die Werte für die Erstellung von Widerstandsiso-thermen verwendet werden.

Parallel zu den Widerstandsmessungen muss die Materialfeuchte an separaten Probenstücken über deren Gewicht bestimmt werden, um die dazugehörige Sorptionsisotherme zu bestimmen. Diese Sorptionsisothermen ermöglichen dann die Umrechnung von der relativen Luftfeuchte zum Wassergehalt.

Mit diesen beiden Isothermen, der Widerstands- und der Sorptionsisotherme, lässt sich somit ein Zusammenhang zwischen den gemessenen Widerstandswerten und der Materialfeuchte herstellen.

Die im Labor verwendeten Materialproben für die Widerstandsmessungen wurden für die Messobjekte Aarwangen und Bütschwil am Objekt mittels Kernbohrungen entnommen. Beim Messobjekt Brüttelen waren Kernbohrungen seitens der Eigentümer nicht erwünscht. Da sich in unmittelbarer Nähe zum Gehöft ein Steinbruch befindet und angenommen werden kann, dass der verwendete Bruchstein der Aussenwand aus diesem Steinbruch stammt, wurden die Materialproben dort entnommen. Der Aussenputz wurde ca. im Jahr 2000 erneuert. Daher konnten mit der ausführenden Firma der Putzaufbau und die Materialien bestimmt werden, mit denen der Aussenputz im Labor der BFH nachgebaut werden konnte.

Für die Messungen der Materialfeuchte wurden separate Probenstücke der Messobjekte verwendet.

In diesem Bericht werden folgende Bezeichnungen zur Identifizierung der im Labor gemessenen Materialien M_k verwendet.

Tabelle 16: Bezeichnung der gemessenen Materialien im Labor der BFH.

Standort	Schicht	Material	Probennr.	Annotation M_k
Aarwangen	Mauerwerk	Ziegel	1	$M_{1,1}$
			2	$M_{1,2}$
	Aussenputz	Putz	1	$M_{2,1}$
			2	$M_{2,2}$
Brüttelen	Mauerwerk	Muschelkalk	1	$M_{3,1}$
			2	$M_{3,2}$
	Aussenputz	Putz	1	$M_{4,1}$
			2	$M_{4,2}$
Bütschwil	Mauerwerk	-	1	$M_{5,1}$
			2	$M_{5,2}$
	Aussenputz	-	1	$M_{6,1}$
			2	$M_{6,2}$

6.1.2 Ergebnisse der Widerstandsmessungen

Aufgrund des begrenzten Zeitrahmens wurden die Widerstände der Materialien nur während der Adsorption, also bei zunehmender Feuchte gemessen.

Die vom Datenlogger angezeigten Messwerte werden mit Formel 1 in den Widerstand des Materials in Megaohm ($M\Omega$) umgerechnet.

$$R = \frac{10^{(x/10)}}{10^6} \quad \text{Formel 1}$$

Mit:

$R = \text{Widerstand in } M\Omega$

$x = \text{Messwert, einheitslos}$

Die folgenden Tabellen zeigen die Mittelwerte der gemessenen Widerstände in Megaohm der verschiedenen Proben und Materialien während der Adsorption, sowie deren 95 % Konfidenzintervall. Es gibt eine Tabelle für jede untersuchte relative Luftfeuchte im Klimaschrank, in der die Messwerte des elektrischen Widerstands für alle Materialien aufgeführt sind.

Die Spalte Messwert [-] enthält nur einen ungefähren Mittelwert und kein 95 % Konfidenzintervall, da sich die Fehlerrechnung nur auf den umgerechneten Widerstand in Mega-Ohm bezieht.

Diese Messwerte dienen als Grundlage für die Bestimmung der Widerstandsisothermen in Kapitel 6.3.1.



Tabelle 17: Widerstände der untersuchten Materialien M_k bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 30 %. Hier existiert nur ein Messwert, weshalb auch keine Fehlerrechnung möglich war.

Bezeichnung	θ_{Soll}	φ_{Soll}	θ_{Ist}	φ_{Ist}	Messwert	R		
$M_{1,1}$	30	30	29.9	30.3	76.7	46.77		
$M_{2,1}$					76.9	48.89		
$M_{1,2}$			29.9	29	87	501.19		
$M_{2,2}$					90.3	1'071.52		
$M_{3,1}$			29.7	29.1	89.8	955		
$M_{4,1}$					92.7	1'862.09		
$M_{3,2}$			30	29	85.2	331.13		
$M_{4,2}$					88.8	758.58		
$M_{5,1}$			30	29.5	86.3	426.58		
$M_{6,1}$					94	2'511.89		
$M_{5,2}$			29.9	29.2	102.4	17'378.01		
$M_{6,2}$					94.9	3'090.3		
θ_{Soll} = Soll – Temperatur in ° C φ_{Soll} = Soll – relative Feuchte in % θ_{Ist} = Ist – Temperatur in ° C φ_{Ist} = Ist – relative Feuchte in % R = Widerstand in Megaohm								

Tabelle 18: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien M_k bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 40 %.

Bezeichnung	θ_{Soll}	φ_{Soll}	θ_{Ist}	φ_{Ist}	Messwert	R		
$M_{1,1}$	30	40	29.9 ± 0.18	39.1 ± 0.49	~74	24.9 ± 2.1		
$M_{2,1}$					~69.8	9.6 ± 1.5		
$M_{1,2}$			30.0 ± 0.18	38.4 ± 0.95	~82.7	184 ± 28		
$M_{2,2}$					~85.5	352 ± 15		
$M_{3,1}$			29.7 ± 0.18	38.3 ± 0.64	~82.8	193 ± 119		
$M_{4,1}$					~91.3	1361 ± 724		
$M_{3,2}$			30.0 ± 0.18	38 ± 0.8	~78.6	72 ± 167		
$M_{4,2}$					~85.8	384 ± 92		
$M_{5,1}$			30	38.6 ± 0.49	~81.8	153 ± 23		
$M_{6,1}$					~89.1	813 ± 60		
$M_{5,2}$			29.8	38.2 ± 0.66	~96.8	$4'829 \pm 895$		
$M_{6,2}$					~90.1	$1'016 \pm 43$		
θ_{Soll} = Soll – Temperatur in ° C φ_{Soll} = Soll – relative Feuchte in % θ_{Ist} = Ist – Temperatur in ° C φ_{Ist} = Ist – relative Feuchte in % R = Widerstand in Megaohm								

Tabelle 19: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien M_k bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 50 %.

Bezeichnung	θ_{Soll}	φ_{Soll}	θ_{Ist}	φ_{Ist}	Messwert	R
$M_{1,1}$	30	50	29.8 ± 0.14	49.1 ± 0.58	~68.9	7.8 ± 0.93
$M_{2,1}$					~63.7	2.3 ± 0.38
$M_{1,2}$			29.7 ± 1.04	48.6 ± 0.91	~78.5	71 ± 12
$M_{2,2}$					~81.2	132 ± 8.1
$M_{3,1}$			29.6 ± 0.14	48.2 ± 1.67	~75.9	39 ± 22
$M_{4,1}$					~88.7	$741 \pm 54.$
$M_{3,2}$			29.8 ± 0.14	48.02 ± 2.8	~781.6	15 ± 11.6
$M_{4,2}$					~83.1	203 ± 48
$M_{5,1}$			29.9 ± 0.14	48.6 ± 0.6	~77.7	59 ± 1.9
$M_{6,1}$					~84.6	290 ± 18
$M_{5,2}$			29.7 ± 0.14	48.2 ± 0.93	~93.4	$2'200 \pm 440$
$M_{6,2}$					~85.5	350 ± 18
θ_{Soll} = Soll – Temperatur in ° C φ_{Soll} = Soll – relative Feuchte in % θ_{Ist} = Ist – Temperatur in ° C φ_{Ist} = Ist – relative Feuchte in % R = Widerstand in Megaohm						

Tabelle 20: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien M_k bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 60 %.

Bezeichnung	θ_{Soll}	φ_{Soll}	θ_{Ist}	φ_{Ist}	Messwert	R
$M_{1,1}$	30	60	29.8 ± 0.32	58.5 ± 0.81	~64.3	2.7 ± 0.63
$M_{2,1}$					~58.6	0.7 ± 0.10
$M_{1,2}$			29.8 ± 0.27	58.5 ± 0.83	~73.6	23 ± 10
$M_{2,2}$					~77.7	59 ± 7.1
$M_{3,1}$			29.6 ± 0.23	58.1 ± 0.92	~68.6	7.2 ± 1.36
$M_{4,1}$					~83.5	223 ± 36
$M_{3,2}$			29.8 ± 0.36	58.1 ± 0.94	~66.3	4.3 ± 1.5
$M_{4,2}$					~78.4	69 ± 18
$M_{5,1}$			29.9 ± 0.27	58.4 ± 0.60	~73.1	20 ± 3.2
$M_{6,1}$					~80.6	115 ± 12
$M_{5,2}$			29.7 ± 0.17	58.0 ± 0.77	~90.6	$1'146 \pm 315$
$M_{6,2}$					~81.4	139 ± 16
θ_{Soll} = Soll – Temperatur in ° C φ_{Soll} = Soll – relative Feuchte in % θ_{Ist} = Ist – Temperatur in ° C φ_{Ist} = Ist – relative Feuchte in % R = Widerstand in Megaohm						



Tabelle 21: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien M_k bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 70 %.

Bezeichnung	θ_{Soll}	φ_{Soll}	θ_{Ist}	φ_{Ist}	Messwert	R		
$M_{1,1}$	30	70	29.6 ± 0.14	70 ± 1.2	~62	1.6 ± 0.25		
$M_{2,1}$					~54.3	0.27 ± 0.029		
$M_{1,2}$			29.4 ± 0.48	71 ± 2.2	~72.1	16 ± 5.5		
$M_{2,2}$					~74	25 ± 3.0		
$M_{3,1}$			29.1 ± 0.86	70 ± 2.0	~64.6	2.8 ± 1.0		
$M_{4,1}$					~78.3	67 ± 7.4		
$M_{3,2}$			29.4 ± 0.42	70 ± 4.8	~61.3	1.4 ± 0.55		
$M_{4,2}$					~69.9	9.8 ± 2.3		
$M_{5,1}$			29.5 ± 0.14	70 ± 1.4	~69.1	8 ± 1.7		
$M_{6,1}$					~76.4	43 ± 7.8		
$M_{5,2}$			29.2	70 ± 1.3	~88.3	670 ± 123		
$M_{6,2}$					~77.5	56 ± 5.5		
θ_{Soll} = Soll – Temperatur in ° C φ_{Soll} = Soll – relative Feuchte in % θ_{Ist} = Ist – Temperatur in ° C φ_{Ist} = Ist – relative Feuchte in % R = Widerstand in Megaohm								

Tabelle 22: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien M_k bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 80 %.

Bezeichnung	θ_{Soll}	φ_{Soll}	θ_{Ist}	φ_{Ist}	Messwert	R		
$M_{1,1}$	30	80	30.0 ± 0.14	79.2 ± 0.32	~60.4	1.10 ± 0.036		
$M_{2,1}$					~51.6	0.14 ± 0.011		
$M_{1,2}$			29.9 ± 0.17	81.1 ± 0.35	~69.2	8.3 ± 0.79		
$M_{2,2}$					~69.7	9.4 ± 0.9		
$M_{3,1}$			29.5 ± 0.35	80.5 ± 0.32	~55.5	0.35 ± 0.073		
$M_{4,1}$					~70.4	11 ± 2.6		
$M_{3,2}$			29.9 ± 0.17	79.7 ± 0.35	~57.6	0.6 ± 0.44		
$M_{4,2}$					~64.6	2.9 ± 0.33		
$M_{5,1}$			29.8 ± 0.14	80.1 ± 0.14	~66.2	4.2 ± 0.62		
$M_{6,1}$					~72.6	18 ± 1.1		
$M_{5,2}$			29.6 ± 0.17	80.1	~84.5	283 ± 30		
$M_{6,2}$					~73.5	22 ± 1.8		
θ_{Soll} = Soll – Temperatur in ° C φ_{Soll} = Soll – relative Feuchte in % θ_{Ist} = Ist – Temperatur in ° C φ_{Ist} = Ist – relative Feuchte in % R = Widerstand in Megaohm								

Tabelle 23: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien M_k bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 90 %.

Bezeichnung	θ_{Soll}	φ_{Soll}	θ_{Ist}	φ_{Ist}	Messwert	R
$M_{1,1}$	30	90	30.0 ± 0.27	86.5 ± 2.3	~58.8	0.8 ± 0.16
$M_{2,1}$					~48.1	0.1 ± 0.01
$M_{1,2}$			30.0 ± 0.36	88.3 ± 3.3	~65.7	4 ± 2.2
$M_{2,2}$					~65	3 ± 1.7
$M_{3,1}$			29.7 ± 0.17	87.5 ± 1.9	~52.4	0.2 ± 0.03
$M_{4,1}$					~63.9	2.5 ± 0.56
$M_{3,2}$			30.0 ± 0.14	87 ± 1.6	~53.3	0.2 ± 0.11
$M_{4,2}$					~60.3	1 ± 0.3
$M_{5,1}$			30.0 ± 0.17	87.4 ± 0.73	~69.3	9 ± 4
$M_{6,1}$					~68.3	6.8 ± 1.72
$M_{5,2}$			29.8	87.9 ± 1.72	~81.1	131 ± 77
$M_{6,2}$					~68.7	7 ± 2.5
θ_{Soll} = Soll – Temperatur in ° C φ_{Soll} = Soll – relative Feuchte in % θ_{Ist} = Ist – Temperatur in ° C φ_{Ist} = Ist – relative Feuchte in % R = Widerstand in Megaohm						

Tabelle 24: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien M_k bei Raumtemperatur und einer relativen Feuchte von 100 %, respektive Wassersättigung.

Bezeichnung	θ_{Soll}	φ_{Soll}	θ_{Ist}	φ_{Ist}	Messwert	R
$M_{1,1}$	-	100	-	100	~44	0.026 ± 0.029
$M_{2,1}$					~40.5	0.011 ± 0.005
$M_{1,2}$			-	100	~43.5	0.023 ± 0.016
$M_{2,2}$					~40.7	0.012 ± 0.007
$M_{3,1}$			-	100	~43.2	0.021 ± 0.004
$M_{4,1}$					~41.3	0.014 ± 0.002
$M_{3,2}$			-	100	~42.8	0.019 ± 0.005
$M_{4,2}$					~41.1	0.013 ± 0.005
$M_{5,1}$			-	100	~45	0.032 ± 0.004
$M_{6,1}$					~41.7	0.015 ± 0.004
$M_{5,2}$			-	100	~44.4	0.028 ± 0.014
$M_{6,2}$					~41.8	0.015 ± 0.002
θ_{Soll} = Soll – Temperatur in ° C φ_{Soll} = Soll – relative Feuchte in % θ_{Ist} = Ist – Temperatur in ° C φ_{Ist} = Ist – relative Feuchte in % R = Widerstand in Megaohm						



6.1.3 Messung des Wassergehalts

Die Prüfkörper der Mauersteine und der Putze werden in einem Klimaschrank bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten gelagert. Nach Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte wird die Masse m_i des Körpers bestimmt. Die Gleichgewichtsfeuchte ist dann erreicht, wenn sich die Masse des Prüfkörpers in 24 Stunden, um nicht mehr als 0.1 % der Gesamtmasse verändert, also nach DIN EN 13755 [6] massenkonstant ist. Entsprechend beträgt der relative Fehler der Massen $\frac{\Delta m_i}{m_i} = 0.1 \%$. Auch die Wassergehalte der Materialien als Funktion der Luftfeuchte wurden auf dem Hystereseeast der Zunahme der Luftfeuchte bestimmt.

Das Volumen der Prüfkörper wurde durch Wasserverdrängung bestimmt, d.h. über die Masse der verdrängten Flüssigkeit beim Eintauchen des Probekörpers in Wasser. Dabei wurde das Volumen eines Materials fünf Mal gemessen und hieraus der Mittelwert sowie die Fehler berechnet, die für die Bestimmung der Dichte weiterverwendet werden. Das 95 % Konfidenzintervall errechnet sich aus den jeweiligen Standardabweichungen σ_V und basiert auf der Studentverteilung (t-Verteilung), da die Anzahl Messungen unter $n = 30$ liegt.

Die folgende Tabelle zeigt die gemessenen Massen der Prüfkörper bei der entsprechenden relativen Luftfeuchte sowie das Volumen, inklusive dem 95 % Konfidenzintervall. Detailliertere Angaben zu den gemessenen Volumina und den entsprechenden Fehlerrechnung sind im Anhang E2 dokumentiert.

Tabelle 25: Gemessene Massen m der Materialien M_k bei einer Temperatur von 30 ° C (der Index i bezeichnet die relative Feuchte in %-r. F.) sowie das gemittelte Volumen mit dem 95 % Konfidenzintervall.

Bez.	m_0	m_{60}	m_{70}	m_{80}	m_{90}	m_{100}	V
M_1	246.04	246.36	246.37	246.41	246.45	296.33	141 ± 6.2
M_2	151.85	153.96	154.15	154.6	155.43	172.64	76 ± 5.3
M_3	271.71	-	272.51	272.58	272.69	278	114 ± 1.8
M_4	218.03	-	218.65	219.24	223.73	247.24	101 ± 3.3
M_5	117.75	118.9	118.95	118.99	119.1	136.16	67 ± 5.5
M_6	161.69	163.15	163.23	163.34	163.6	179.68	80 ± 3.4
m_i = Masse des Prüfkörpers in g der Index i gibt die relative Luftfeuchte in % r. F. an V = Volumen in m^3							

Mit der Masse und dem Volumen wird die Dichte ρ des Prüfkörpers (siehe Tabelle 26) bei der jeweiligen relativen Luftfeuchte bestimmt:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_0} \quad \text{Formel 2}$$

mit:

ρ_i = Rohdichte in $\frac{kg}{m^3}$ bei relativer Luftfeuchte

m_i = Masse in kg bei relativer Luftfeuchte

V_0 = Volumen in m^3

Tabelle 26 und Tabelle 27 beschreiben die berechneten Dichten und Materialfeuchten der verschiedenen Materialien während der Adsorption, inklusive dem 95 % Konfidenzintervall. Diese Messwerte dienen als Grundlage für die Bestimmung der Sorptionsisothermen unter 6.3.2.

Die Fehlerrechnung der Dichte erfolgt über eine Fehlerfortpflanzung mehrerer fehlerbehafteten Grö-
sen. In diesem Fall sind dies die Fehler der Masse m_i , also 0.1 %, und des Volumens, also σ aus An-
hang E2.

**Tabelle 26: Aus Masse m und Volumen V ermittelte Rohdichte ρ im Darrzustand sowie bei relativen
Feuchten von 60 % und 70 %.**

Bez.	ρ_0	ρ_{60}	ρ_{70}
M_1	1750 ± 83	1750 ± 83	1750 ± 83
M_2	2000 ± 140	2000 ± 140	2000 ± 145
M_3	2380 ± 45	-	2390 ± 45
M_4	2100 ± 78	-	2160 ± 77
M_5	1700 ± 150	1800 ± 150	1800 ± 150
M_6	2000 ± 90	2000 ± 91	2000 ± 91

ρ_i = Rohdichte in $\frac{kg}{m^3}$; der Index gibt die relative Luftfeuchte in % r. F. an

**Tabelle 27: Aus Masse m und Volumen V ermittelte Rohdichte ρ bei relativen Feuchten von 80 % und 90 %
sowie bei Wassersättigung.**

Bez.	ρ_{80}	ρ_{90}	ρ_{100}
M_1	1800 ± 83	1700 ± 83	2100 ± 100
M_2	2000 ± 150	2000 ± 150	2300 ± 160
M_3	2390 ± 45	2390 ± 45	2440 ± 46
M_4	2160 ± 77	2200 ± 79	2440 ± 87
M_5	1800 ± 150	1760 ± 83	2000 ± 170
M_6	2030 ± 91	2040 ± 91	2300 ± 100

ρ_i = Rohdichte in $\frac{kg}{m^3}$; der Index gibt die relative Luftfeuchte in % r. F. an

Sind die Rohdichten ρ_i berechnet, kann durch die Subtraktion der Darrdichte ρ_0 der Wassergehalt w
des Prüfkörpers berechnet werden, welche für die Bildung der Sorptionsisotherme, auch Feuchtespei-
cherfunktion genannt, verwendet werden (Tabelle 28).

Tabelle 28: Wassergehalt w bei verschiedenen relativen Feuchten.

Bez.	w_0	w_{60}	w_{70}	w_{80}	w_{90}	w_f
M_1	0	2.3 ± 0.11	2.3 ± 0.11	2.6 ± 0.12	2.9 ± 0.14	370 ± 18
M_2	0	28 ± 2.0	30 ± 2.2	36 ± 2.6	47 ± 3.4	280 ± 20
M_3	0	-	7.0 ± 0.13	7.7 ± 0.15	8.6 ± 0.16	63 ± 1.2
M_4	0	-	6.1 ± 0.22	12.0 ± 0.43	56 ± 2.0	290 ± 10
M_5	0	17 ± 1.4	18 ± 1.5	18 ± 1.6	20 ± 1.7	300 ± 25
M_6	0	18.0 ± 0.81	19.1 ± 0.86	20.5 ± 0.92	23 ± 1.1	240 ± 11

w_i = Wassergehalt in $\frac{kg}{m^3}$; der Index gibt die relative Luftfeuchte in % r. F. an

w_f = Freie Wassersättigung in $\frac{kg}{m^3}$



6.2 Bestimmung von Materialkennwerten am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

6.2.1 Allgemein

Für die Durchführung hygrothermischer Simulationen mit WUFI Pro[®] ist die Eingabe bestimmter Materialkennwerte erforderlich. Die an den Messobjekten entnommenen Proben wurden dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP zur Messung feuchtetechnischer Materialkennwerte übergeben.

Am IBP wurden folgende Proben untersucht:

- Mauerwerk Messobjekt Aarwangen
- Aussenputz Messobjekt Aarwangen
- Mauerwerk Messobjekt Brüttelen

Proben des Aussenputzes des Messobjektes Brüttelen durften nicht entnommen werden und konnten somit nicht gemessen werden.

Für die Aussenputze der Messobjekte Brüttelen und Bütschwil wird daher der Wasseraufnahmekoeffizient vor Ort bestimmt und fehlende Materialkennwerte in der Simulation durch Literaturwerte ersetzt.

Die am IBP bestimmten Materialkennwerte sind:

- Rohdichte
- Porosität
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
- Flüssigtransportkoeffizient (Saugen)
- Flüssigtransportkoeffizient (Weiterleitung)

6.2.2 Prüfergebnisse des Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Nachfolgend sind zusammenfassend die Prüfergebnisse der drei am IBP untersuchten Proben dargestellt, die sogleich auch als Basis für die Bauteileingabe im Kapitel 7.3.1.2 gelten. Die kompletten Prüfberichte sind im Anhang C abgelegt.

Tabelle 29: Am IBP gemessene feuchtetechnische Materialkennwerte des Mauerwerks in Aarwangen.

Kennwert	Einheit	Ergebnis					
ρ_{Roh}	kg/m ³	1716					
ρ_{Rein}	kg/m ³	2625					
ϕ	m ³ /m ³	0.346					
μ -Wert	-	26 ¹			23 ²		
bei ϕ_i	-	0-0.5			0.5-0.93		
w	kg/m ³ √h	0.33			0.65		
nach h	h	1			4		
D_{WS}	m ² /s	$2.5 \cdot 10^{-11}$			$8 \cdot 10^{-9}$		
bei ϕ_i	-	0.8 ³			1 ⁴		
D_{WW}	m ² /s	$3.9 \cdot 10^{-10}$			$2.5 \cdot 10^{-9}$		
bei ϕ_i	-	0.8 ³			1 ⁴		
u	kg/m ³	0	26.6	39.1	69.1	108.9	235
bei ϕ_i	-	0	0.65	0.8	0.93	0.97	1

¹Werte aus Dry-cup-Messungen
²Werte aus Wet-cup-Messungen
³entspricht dem D_{W0} aus dem Prüfbericht des IBP
⁴entspricht dem D_{Wf} aus dem Prüfbericht des IBP

ρ_{Roh} = Rohdichte
 ρ_{Rein} = Reindichte
 ϕ = Porosität
 μ -Wert = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig
 ϕ = relative Luftfeuchte
w = Wasseraufnahmekoeffizient
 D_{WS} = Flüssigtransportkoeffizient, Saugen
 D_{WW} = Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung
u = Wassergehalt



Tabelle 30: Am IBP gemessene feuchtetechnische Materialkennwerte des Aussenputzes in Aarwangen.

Kennwert	Einheit	Ergebnis						
ρ_{Roh}	kg/m ³	1265						
ρ_{Rein}	kg/m ³	2771						
ϕ	m ³ /m ³	0.52						
μ -Wert	-	17.8 ¹			17.6 ²			
bei ϕ_i	-	0-0.5			0.5-0.93			
w	kg/m ³ ·h	6.1			6.1			
nach h	h	1			4			
D_{WS}	m ² /s	2.8*10 ⁻⁹			2.5*10 ⁻⁶			
bei ϕ_i	-	0.8 ³			1 ⁴			
D_{WW}	m ² /s	8.5*10 ⁻¹⁰			3.5*10 ⁻⁶			
bei ϕ_i	-	0.8 ³			1 ⁴			
u	kg/m ³	0	7.7	8.2	9.7	13.2	335	
bei ϕ_i	-	0	0.65	0.8	0.93	0.97	1	
¹ Werte aus Dry-cup-Messungen ² Werte aus Wet-cup-Messungen ³ entspricht dem D_{W0} aus dem Prüfbericht des IBP ⁴ entspricht dem D_{Wf} aus dem Prüfbericht des IBP								
ρ_{Roh} = Rohdichte ρ_{Rein} = Reindichte ϕ = Porosität μ -Wert = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig ϕ = relative Luftfeuchte w = Wasseraufnahmekoeffizient D_{WS} = Flüssigtransportkoeffizient, Saugen D_{WW} = Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung u = Wassergehalt								

Tabelle 31: Am IBP gemessene feuchtetechnische Materialkennwerte des Mauerwerks in Brüttelen.

Kennwert	Einheit	Ergebnis					
ρ_{Roh}	kg/m ³	2366					
ρ_{Rein}	kg/m ³	2708					
ϕ	m ³ /m ³	0.11					
μ -Wert	-	203 ¹			67 ²		
bei φ_i	-	0-0.5			0.5-0.93		
w	kg/m ³ ∕h	0.57	0.51		0.52		
nach h	h	1	4		24		
D_{WS}	m ² /s	$5.8 \cdot 10^{-10}$			$8.3 \cdot 10^{-8}$		
bei φ_i	-	0.8 ³			1 ⁴		
D_{WW}	m ² /s	$4.2 \cdot 10^{-9}$			$8.7 \cdot 10^{-8}$		
bei φ_i	-	0.8 ³			1 ⁴		
u	kg/m ³	0	15.4	15.7	21.8	25.6	57.6
bei φ_i	-	0	0.65	0.8	0.93	0.97	1
¹ Werte aus Dry-cup-Messungen ² Werte aus Wet-cup-Messungen ³ entspricht dem D_{W0} aus dem Prüfbericht des IBP ⁴ entspricht dem D_{Wf} aus dem Prüfbericht des IBP							
ρ_{Roh} = Rohdichte ρ_{Rein} = Reindichte ϕ = Porosität μ -Wert = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig φ = relative Luftfeuchte w = Wasseraufnahmekoeffizient D_{WS} = Flüssigtransportkoeffizient, Saugen D_{WW} = Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung u = Wassergehalt							



6.3 Bestimmung der Isothermen

Die Erstellung von Isothermen aus Regressionskurven ermöglicht das Abschätzen fehlender Daten aus den vorhandenen Messwerten. So kann mit Hilfe der Widerstandisotherme aus einem gemessenen Widerstand in einer Schicht die entsprechende Materialfeuchte oder relative Feuchte berechnet werden und umgekehrt. Die Sorptionsisotherme wiederum erlaubt die Umrechnung von der gemessenen relativen Feuchte zur entsprechenden Materialfeuchte.

Um die Güte der erstellten Regressionskurven zu prüfen wird einerseits der Standardfehler der Residuen, auch Residual standard error (RSE) genannt, angegeben und andererseits ein Hypothesentest, ein sogenannter t-Test, durchgeführt. Hierfür werden mit Hilfe einer Statistiksoftware [7] die Regressionsgüte selbst aber auch die Koeffizienten a_j der Regressionskurven aller untersuchten Materialien M_k , deren Standardabweichung (σ) sowie der t- und p-Wert nach einschlägiger Literatur ermittelt [8].

Der RSE gibt Auskunft über die Varianz der Residuen. D.h. er gibt Auskunft über die Streuung der Abweichungen der Ausgleichskurve von den Messpunkten. Je kleiner der RSE, desto gleichmässiger sind die Residuen verteilt.

Der t-Test (Hypothesentest) prüft, ob der geschätzte Regressionskoeffizient a_j in der Grundgesamtheit einen von Null verschiedenen Wert hat, also ob sich der Regressionskoeffizient signifikant von Null unterscheidet.

Der t-Wert gibt dabei das Verhältnis des Koeffizienten a_j zum Standardfehler an und wird mit einem kritischen Wert auf der t-Verteilung verglichen (der kritische t-Wert ist die Grenze, nach der entschieden wird). Die Bestimmung des kritischen Wertes erfordert die Freiheitsgrade (hier $n-2$) und das Signifikanzniveau α (hier 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit).

Die t-Verteilung ähnelt der Standardnormalverteilung, hat aber eine breitere Streuung als diese und nähert sich erst mit steigender Anzahl der Freiheitsgrade f der Normalverteilungskurve an.

Ist nun der Betrag dieses t-Werts grösser als der kritische Wert, unterscheidet sich der Regressionskoeffizient a_j auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ von Null.

Einfacher ist direkt das Signifikanzniveau α mit dem p-Wert zu vergleichen. Der p-Wert gibt dabei die Wahrscheinlichkeit an, dass der kritische Wert grösser als der Betrag des t-Werts ist. D.h. ist dieser p-Wert kleiner als 0.05, so liegt der Betrag des t-Werts auf einem Signifikanzniveau unter $\alpha=5\%$ oberhalb des kritischen Werts. Somit unterscheidet sich der Regressionskoeffizient a_j signifikant von Null und ist folglich massgebend für die Regressionsfunktion.

6.3.1 Bestimmung der Widerstands Isothermen

Zunächst werden die Prüfkörper der Mauersteine und der Putze in einem Klimaschrank eingebracht. Der Klimaschrank hält über einen längeren Zeitraum die Temperatur und die relative Luftfeuchte konstant. Nach Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte der Prüfkörper wird sowohl der Wassergehalt der Proben, als auch der elektrische Widerstand der Prüfkörper bestimmt. Durch das Anfahren von verschiedenen relativen Feuchten im Klimaschrank werden mehrere Wertepaare des elektrischen Widerstands und des zugehörigen Wassergehalts der Prüfkörper ermittelt.

Um aus diesen Messwertpaaren eine Umrechnungsfunktion vom elektrischen Widerstand in den Wassergehalt für den Prüfkörper abzuleiten, muss durch eine statistische Auswertung eine Ausgleichsfunktion an die Messwerte angepasst werden.

So ist es möglich, auf Basis der gemessenen Widerstände der Materialien im Labor (siehe Kapitel 6.1.2) eine Umrechnungsfunktion zu generieren, die den Verlauf des ohmschen Widerstandes in Abhängigkeit der Materialfeuchte, respektive der relativen Feuchte beschreibt.

Die Regressionsfunktion wird anhand der kleinsten Summe der quadrierten Residuen (Methode der kleinsten Summe der quadratischen Fehler) erstellt. Die Methode der kleinsten Quadrate besteht darin, die Kurvenparameter so zu bestimmen, dass die Summe der quadratischen Abweichungen (Residuen) der Ausgleichskurve von den Messpunkten minimiert wird.

In einem ersten Schritt muss hierfür eine zum Datenverlauf passende Funktionenklasse ausgewählt werden. Da der ohmsche Widerstand mit der Zunahme der relativen Luftfeuchte scheinbar exponentiell abnimmt, wurde folgende Exponentialfunktion gewählt.

$$R_{M_k}(\varphi) = a_1 * e^{(a_2 * \varphi)} + a_3 \quad \text{Formel 3}$$

mit:

R = Widerstand in Ω

φ = relative Feuchte, einheitslos

$a_{1...3}$ = Koeffizienten

M_k = Material

Die Koeffizienten $a_{1...3}$ werden so bestimmt, dass die Summe der Quadrate der Abweichungen, e , der gemessenen Widerstände, R_i , in $M\Omega$ zu den Funktionswerten $R_{M_k}(R\varphi)$ des entsprechenden Materials, M_k , minimiert wird.

Aufgrund des Hystereseeffekts müssten theoretisch für jedes Material, M_k , eine Regressionsfunktion für Adsorption und Desorption erstellt werden. Näherungsweise können aber auch nur die Werte für die Adsorption verwendet werden.

In der folgenden Tabelle 32 sind die ermittelten Koeffizienten $a_{1...3}$ aller untersuchten Materialien M_k , deren Standardabweichung (σ), der t- und p-Wert sowie der Standardfehler der Residuen, der sog. Residual standard error (RSE) aufgeführt. Der t-Wert gibt dabei das Verhältnis des Koeffizienten a_j zum Standardfehler an, der p-Wert die Wahrscheinlichkeit, dass der kritische Wert (der kritische t-Wert ist die Grenze, nach der entschieden wird) grösser ist als der Betrag des t-Werts ist. D.h. ist dieser p-Wert kleiner als 0.05, so liegt der Betrag des t-Werts auf einem Signifikanzniveau unter $\alpha=5\%$ oberhalb des kritischen Werts. Ist der p-Wert grösser als 0.05 aber kleiner als 0.1, so liegt der Betrag des t-Werts auf einem Signifikanzniveau unter $\alpha=10\%$ oberhalb des kritischen Werts.

Tabelle 32: Koeffizienten $a_{1...3}$ der im Labor der BFH untersuchten Materialien M_k .

Material	Koeff.	Schätzung von a_j	σ	t – Wert	p – Wert	RSE
$M_{1,1}$	a_1	600	138	4	0.008	1.59
	a_2	-8.3	0.75	-11	0.0001	
	a_3	-0.3	0.93	-0.3	0.75	
$M_{1,2}$	a_1	10'800	842	13	$5.21 \cdot 10^{-5}$	4.56
	a_2	-10.6	0.27	-40	$1.9 \cdot 10^{-7}$	
	a_3	4.6	2.3	2	0.1	
$M_{2,1}$	a_1	12'900	1'582	8	0.0005	0.32
	a_2	-18.4	0.41	-45	$9.8 \cdot 10^{-8}$	
	a_3	0.3	0.14	12	0.13	
$M_{2,2}$	a_1	30'900	3'515	9	0.0003	12.67
	a_2	-11.6	0.39	-30	$7.8 \cdot 10^{-7}$	
	a_3	10.7	6.1	2	0.14	
$M_{3,1}$	a_1	$1.495 \cdot 10^5$	4'780	31	$6.3 \cdot 10^{-7}$	1.82
	a_2	-17.4	0.11	-158	$1.9 \cdot 10^{-10}$	
	a_3	1.2	0.80	1.4	0.21	
$M_{3,2}$	a_1	44'633	1'730	26	$1.6 \cdot 10^{-6}$	0.81
	a_2	-16.9	0.13	-127	$5.8 \cdot 10^{-10}$	
	a_3	0.8	0.36	2	0.07	
$M_{4,1}$	a_1	8'300	1'972	10	0.0002	118.5
	a_2	-4.7	0.35	-21	$4.8 \cdot 10^{-6}$	
	a_3	-159	8.6	-2	0.14	
$M_{4,2}$	a_1	6'200	625	9	$8.6 \cdot 10^{-4}$	13.57
	a_2	-7.2	0.39	-17	$7.4 \cdot 10^{-5}$	
	a_3	-15	$1.27 \cdot 10^7$	-2	0.09	
$M_{5,1}$	a_1	11'700	1'002	12	$8.1 \cdot 10^{-5}$	3.91
	a_2	-11.3	0.29	-39	$2 \cdot 10^{-7}$	
	a_3	4.3	1.93	2	0.08	
$M_{5,2}$	a_1	$9.868 \cdot 10^5$	$3.111 \cdot 10^5$	3	0.0248	444.8
	a_2	-14	1.1	-13	$4.9 \cdot 10^{-5}$	
	a_3	420	206	2	0.1	
$M_{6,1}$	a_1	92'300	9'161	10	0.00017	24.1
	a_2	-12.3	0.33	-37	$2.8 \cdot 10^{-7}$	
	a_3	20	11.6	2	0.15	
$M_{6,2}$	a_1	$1.073 \cdot 10^5$	9'063	12	$7.6 \cdot 10^{-5}$	25.76
	a_2	-12.2	0.29	-42	$1.4 \cdot 10^{-7}$	
	a_3	23	12.4	2	0.13	
σ = Standardabweichung (1 Sigma) t – Wert = Verhältnis des Koeffizienten zum Standardfehler p – Wert = Wahrscheinlichkeit, dass sich der Regressionskoeff. signifikant von Null unterscheidet RSE = Residual standard error						

Aus diesen Koeffizienten a_j lassen sich die Regressions- oder Umrechnungsfunktionen, respektive Widerstands Isothermen aller gemessenen Materialien der Standorte Aarwangen, Brüttelen und Büttschwil erstellen und grafisch auftragen. Beispielsweise ergeben sich für das Material M_1 (Mauerwerk in Aarwangen) folgende Regressionskurven. Die restlichen Regressionskurven sind im Anhang E1 abgelegt.

$$R_{M_{1,1}}(\varphi) = (600 \pm 2 \cdot 140) * e^{((-8.3 \pm 2 \cdot 0.75) * \varphi)} + (-0.31 \pm 2 \cdot 0.93) \quad \text{Formel 4}$$

$$R_{M_{1,2}}(\varphi) = (10'800 \pm 2 \cdot 842) * e^{((-10.6 \pm 2 \cdot 0.27) * \varphi)} + (4.6 \pm 2 \cdot 2.3)$$

mit:

R = elektrischer Widerstand in Ω

φ = relative Feuchte, einheitslos

Die folgende Abbildung 58 stellt die Messwertpaare elektrischer Widerstand und relative Feuchte und die zugehörige Regressionskurve zusammen. Zusätzlich sind die 95 % Konfidenzintervalle der einzelnen Messpunkte als Whiskers dargestellt.

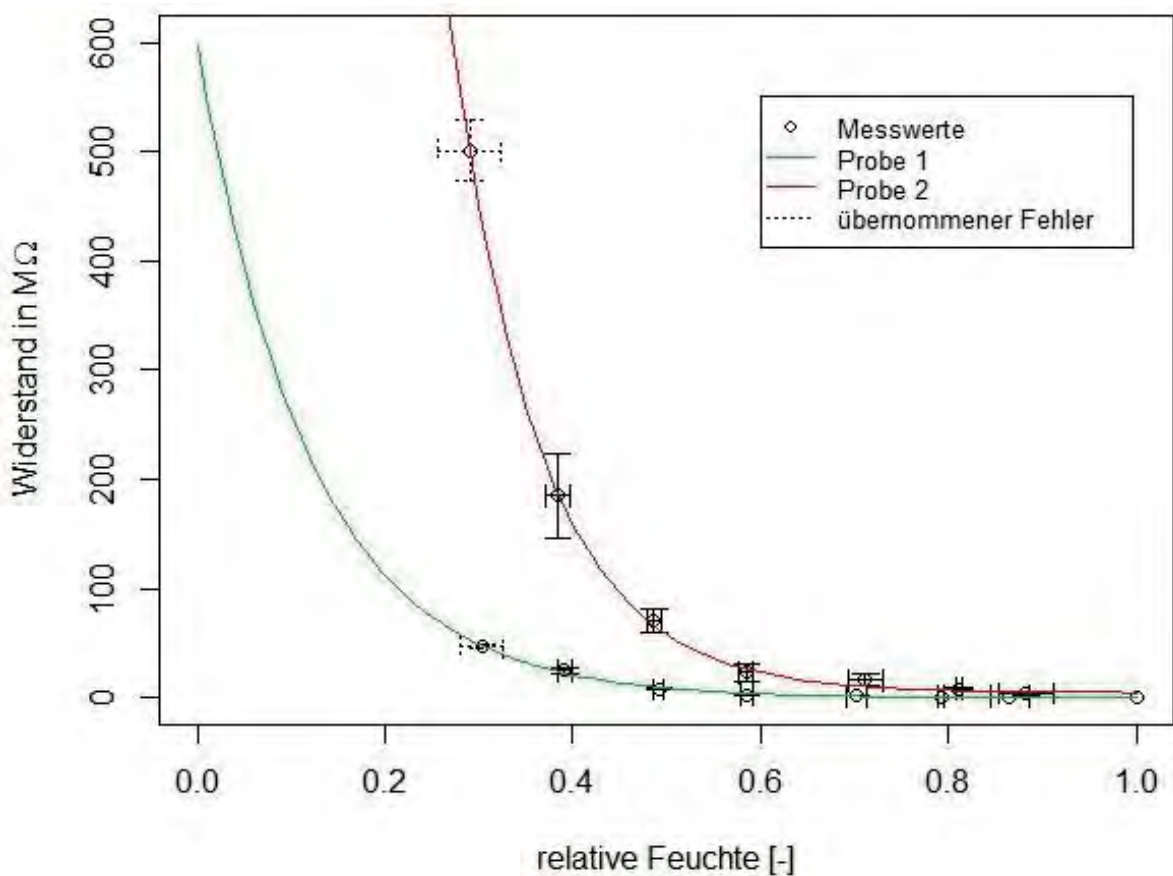


Abbildung 58: Widerstands Isothermen des Mauerwerksteins in Aarwangen (M_1) bei 30 ° C als Regressionskurven nach Formel 4.

In Abbildung 58 wird ersichtlich, dass sich die Messwerte der beiden Proben des Mauerwerks in Aarwangen und damit auch die beiden Regressionskurven, sehr stark voneinander unterscheiden. Je grösser der Widerstand, desto deutlicher ist der Unterschied feststellbar. Mögliche Ursachen der grossen Abweichungen zwischen den Proben können entweder Heterogenitäten des Baustoffs, aber auch des ganzen Mauerwerks sein. So verfälschen Schäden aber auch Materialunterbrüche durch Mörtelfugen die Messwerte der Widerstandsmessung. Diese Problematik konnte bei allen Objekten festgestellt werden.



6.3.2 Bestimmung der Sorptionsisothermen

Die Sorptionsisothermen werden einerseits über die Materialfeuchtebestimmung im Labor an der BFH (siehe 6.1.3) und andererseits mit Hilfe der gemessenen Materialkennwerte des Fraunhofer-Instituts, kurz IBP (siehe 6.2), ermittelt. Der grundlegende Unterschied liegt in den Messpunkten. Das IBP liefert insgesamt fünf Messwerte, die als Stützpunkte für die Regressionsfunktion verwendet werden können. Die Mehrheit der Messwerte des IBP liegt im Bereich zwischen 90 % und 100 % relativer Luftfeuchte, wo mit den grössten Änderungen der Materialfeuchte zu rechnen ist. Das hat den Vorteil, dass diese Messwerte die Regressionsfunktion massgebend beeinflussen, da sie sich im Bereich des sogenannten Kapillarwassers befinden. HÄUPL spricht ab einer relativen Luftfeuchte von 95 % vom Kapillarwasserbereich [9]. Hier wird der Wassertransport durch die ungesättigte Porenströmung bestimmt. Dabei beeinflussen die Oberflächenspannung des Wassers und der dadurch bedingte Kapillardruck den Transport entscheidend.

Am IBP wurden die Materialkennwerte des Aussenputzes und des Ziegels (Mauerwerk) in Aarwangen sowie des Muschelkalks (Mauerwerk) in Brüttelen ermittelt.

Im Labor der BFH wurden sechs oder sieben Messwerte angestrebt. Diese sollten, im Gegensatz zu den Messwerten des IBP, zwischen 30 % und 100 % relative Luftfeuchte liegen und somit auch den abflachenden Bereich der Sorptionsisothermen abbilden. Daher wurde auch eine Temperatur von 30° C im Klimaschrank eingestellt. Aufgrund eines Ausfalls des Klimaschranks konnten jedoch die tieferen relativen Feuchten (30 %, 40 % und 50 %) nicht angefahren werden.

Zusätzlich zu den drei Materialien, die ebenfalls am IBP gemessen wurden, werden im Labor der BFH noch der Aussenputz in Brüttelen und der Aussenputz sowie das Mauerwerk in Bütschwil untersucht.

Analog dem Vorgehen zur Bestimmung der Widerstandsisothermen werden die Regressionsfunktionen der Sorption anhand der kleinsten Summe der quadrierten Residuen erstellt. Im Fall der Sorptionsisotherme kommen insgesamt die folgenden drei Funktionsklassen in Frage:

1. HAILWOOD & HORROBIN - Modell [10]

Dieses Modell wurde speziell für die Erklärung der sigmoischen Form (S-Form) der Sorptionsisotherme von Polymeren entwickelt. Bei den untersuchten Materialien handelt es sich zwar nicht um Polymere, der Verlauf ihrer Sorption kann aber durchaus dieselbe S-Form aufweisen. Die Funktion für den Wassergehalt lautet:

$$u_{HH} = \frac{1'800}{b_1} * \left(\frac{b_2 * b_3 * \varphi}{100 + b_2 * b_3 * \varphi} \right) + \frac{1'800}{b_1} * \left(\frac{b_2 * \varphi}{100 - b_2 * \varphi} \right) \quad \text{Formel 5}$$

mit:

u_{HH} = Wassergehalt bei relativer Feuchte φ in kg/m^3

φ = relative Feuchte, einheitslos

$b_{1...3}$ = materialspezifische Koeffizienten

2. Approximation der Feuchtespeicherfunktion [11]

Beim Vorliegen nur weniger Messwerte approximiert das hygrothermische Simulationsprogramm WUFI Pro[®] die Sorptionsisotherme mit Hilfe einer analytischen Kurve, die durch die Wassergehalte für 0 %, 80 % und 100 % relative Feuchte gelegt wird. Der Wassergehalt bei 100 % relative Feuchte ist dabei der der freien Sättigung. Die Funktionsklasse lautet:

$$u_{approx} = w_f * \frac{(b - 1) * \varphi}{b - \varphi}$$

Formel 6

mit:

u_{approx} = Wassergehalt bei relativer Feuchte φ in kg/m^3

w_f = Wassergehalt bei freier Sättigung in kg/m^3

φ = relative Feuchte, einheitslos

b = Materialspezifischer Koeffizient

3. WUFI Pro[®]'s interne Feuchtespeicherfunktion [11]

Liegen genügend Messwerte eines Materials vor, ermittelt das Programm WUFI Pro[®] auf Basis folgender Funktion die Sorptionsisotherme:

$$u_{intern} = \frac{b_1}{b_2 - \varphi} + b_3$$

Formel 7

mit:

u_{intern} = Wassergehalt bei relativer Feuchte φ in kg/m^3

φ = relative Feuchte, einheitslos

$b_{1...3}$ = materialspezifische Koeffizienten

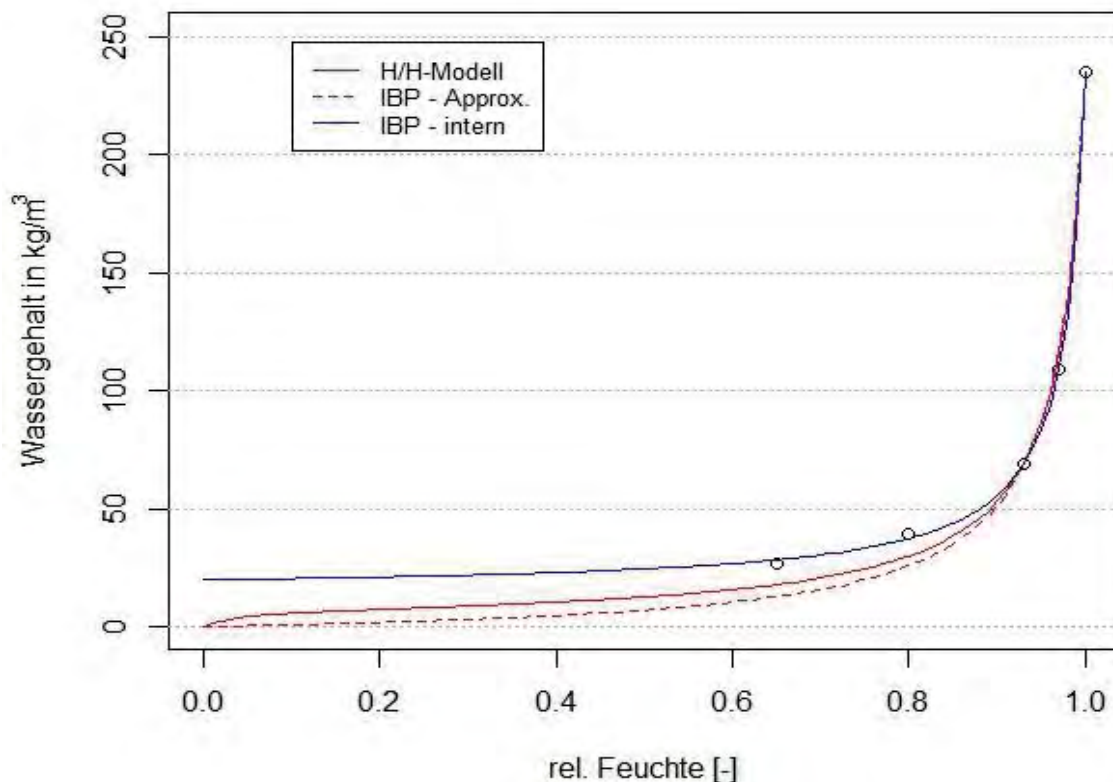


Abbildung 59: Ermittlung der Sorptionsisotherme des Aussenputzes in Aarwangen (M_2) auf Basis der Messwerte des Fraunhofer-Instituts mit den drei verschiedenen Funktionsklassen.

Abbildung 59 zeigt beispielhaft, dass WUFI Pro[®]'s interne Feuchtespeicherfunktion u_{intern} , respektive deren Funktionsklasse, die Messwerte des IBP am besten repräsentiert. Grund dafür ist der Umstand,



dass die Messpunkte alle oberhalb von 60 % relativer Feuchte liegen, bzw. die fehlenden Werte unterhalb der genannten Grenze. Der Nachteil dieser Funktionsklasse ist, dass die Sorptionsisotherme nicht durch den Ursprung des Diagramms verläuft. Dies widerspricht der physikalischen Erwartung, dass das Material bei einer relativen Feuchte von 0 % r. F. eine Materialfeuchte von 0 kg/m^3 aufweist. Bei den beiden anderen Funktionsklassen, die durch den Nullpunkt verlaufen, ergeben sich im Bereich von 20 % r. F. bis 85 % relativer Feuchte im Verhältnis zu den Messwerten zu tiefe Funktionswerte.

Ein Vergleich mit den gemessenen relativen Feuchten in den entsprechenden Schichten (Aussenputz und Mauerwerk) an den verschiedenen Standorten zeigt aber, dass die Messwerte in den untersuchten Schichten nie unter 50 % r. F. fallen und somit die Funktionswerte der Sorptionsisotherme unterhalb dieser Schwelle nicht erforderlich sind. Daher eignet sich die Funktionsklasse der internen Feuchtespeicherfunktion u_{intern} am besten zur Abschätzung der Materialfeuchten aus den relativen Feuchten, da hiermit die vorkommenden Messwerte am genauesten umgerechnet werden können.

Dasselbe Verhalten der Funktionen zeigt sich auch bei der Näherung der Sorptionsisothermen an die Messwerte aus dem Labor der BFH, wie Abbildung 60 zeigt.

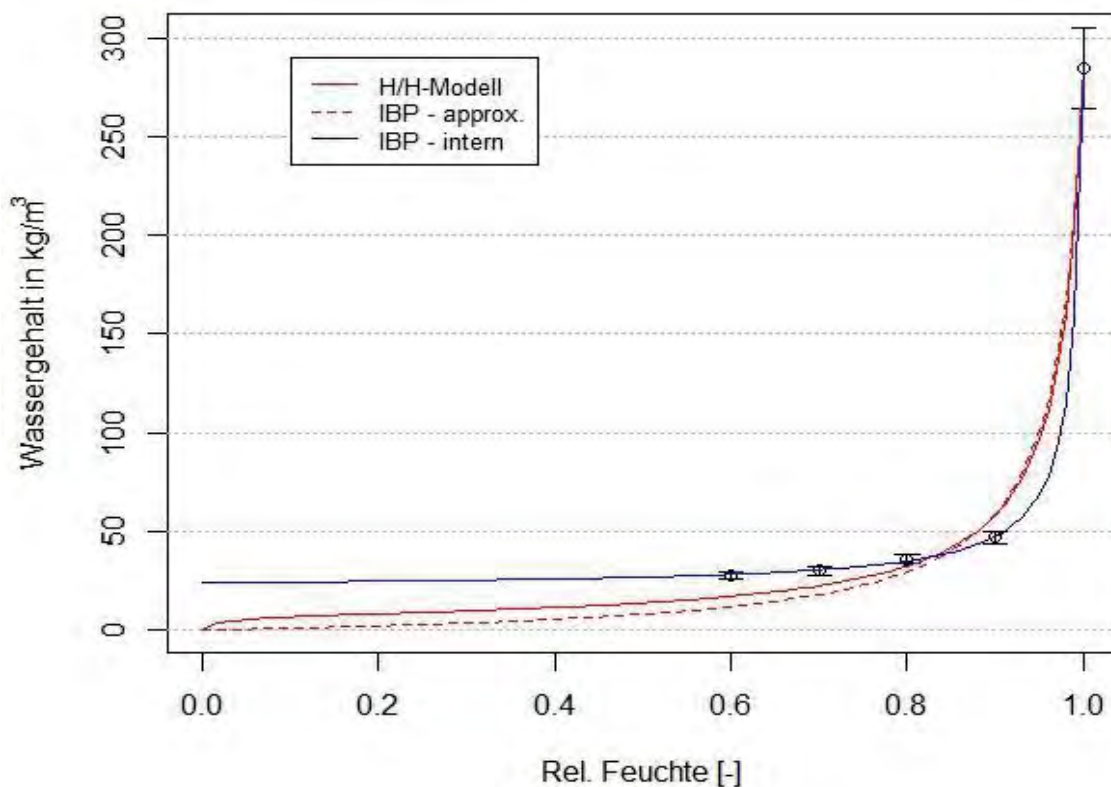


Abbildung 60: Ermittlung der Sorptionsisotherme des Aussenputzes in Aarwangen (M_2) auf Basis der Messwerte aus dem Labor der BFH mit den Regressionsgeraden der drei verschiedenen Funktionsklassen, inklusive des 95 % Konfidenzintervalls.

Es werden nun Regressionsfunktionen der Sorptionsisothermen aller Materialien, durch eine statistische Auswertung, wie in Kapitel 6.3.1 erläutert, für die Messwerte des IBP und für die eigenen Messwerte abgeleitet. Die folgenden Tabelle 33 und Tabelle 34 zeigen die Koeffizienten $b_{1..3}$, die Standardabweichung (1σ), der t- und p-Wert sowie der Standardfehler der Residuen, der sog. Residual standard error (RSE). Der RSE beschreibt die Varianz der Residuen. Der t-Wert gibt dabei das Verhältnis des Koeffizienten a_j zum Standardfehler an, der p-Wert die Wahrscheinlichkeit, dass der kritische Wert (der kritische t-Wert ist die Grenze, nach der entschieden wird) grösser ist als der Betrag des t-Werts ist. D.h. ist dieser p-Wert kleiner als 0.05, so liegt der Betrag des t-Werts auf einem Signifikanzniveau unter $\alpha=5 \%$ oberhalb des kritischen Werts. Ist der p-Wert grösser als 0.05 aber kleiner

als 0.1, so liegt der Betrag des t-Werts auf einem Signifikanzniveau unter $\alpha=10\%$ oberhalb des kritischen Werts.

Tabelle 33: Koeffizienten $b_{1...3}$ der Regressionsfunktionen auf Basis der internen Feuchtespeicherfunktion und den Messwerten des IBP.

Material	Koeff.	Schätzung von b_i	σ	t – Wert	p – Wert	RSE
M_1	b_1	0.18	0.004	46	$4.7 \cdot 10^{-4}$	0.09
	b_2	1.001	$1.2 \cdot 10^{-5}$	83'437	$1.4 \cdot 10^{-10}$	
	b_3	7.2	0.07	102	$9.5 \cdot 10^{-5}$	
M_2	b_1	5	0.25	20	0.003	1.83
	b_2	1.02	0.001	1'014	$9.7 \cdot 10^{-7}$	
	b_3	15	1.9	8	0.015	
M_3	b_1	0.5	0.11	5	0.04	1.29
	b_2	1.01	0.002	443	$5.1 \cdot 10^{-5}$	
	b_3	14	1.2	12	0.007	

σ = Standardabweichung (1 Sigma)
 t – Wert = Verhältnis des Koeffizienten zum Standardfehler
 p – Wert = Wahrscheinlichkeit, dass sich der Regressionskoeff. signifikant von Null unterscheidet
 RSE = Residual standard error

Tabelle 34: Koeffizienten $b_{1...3}$ der Regressionsfunktionen aller untersuchten Materialien auf Basis der internen Feuchtespeicherfunktion und den Messwerten aus dem Labor der BFH.

Material	Koeff.	Schätzung von b_i	σ	t – Wert	p – Wert	RSE
M_1	b_1	0.08	0.013	6	0.02	0.07
	b_2	1	$3.5 \cdot 10^{-5}$	28'552	$1.2 \cdot 10^{-9}$	
	b_3	2.1	0.08	27	0.001	
M_2	b_1	2.9	0.21	14	0.005	0.95
	b_2	1	$7.7 \cdot 10^{-4}$	1'313	$5.8 \cdot 10^{-7}$	
	b_3	21	1.1	20	0.003	
M_3	b_1	0.2	0.05	5	0.14	0.22
	b_2	1	$8.8 \cdot 10^{-4}$	1'142	$5.6 \cdot 10^{-4}$	
	b_3	6.4	0.32	20	0.03	
M_4	b_1	12	3.3	4	0.2	6.88
	b_2	1.0	0.01	119	0.005	
	b_3	-33	14	-2	0.25	
M_5	b_1	0.4	0.05	8	0.02	0.26
	b_2	1	$1.6 \cdot 10^{-4}$	6'074	$2.7 \cdot 10^{-8}$	
	b_3	16.5	0.27	61	$2.7 \cdot 10^{-4}$	
M_6	b_1	0.8	0.05	14	0.005	0.29
	b_2	1	$2.4 \cdot 10^{-4}$	4'152	$5.8 \cdot 10^{-8}$	
	b_3	16.5	0.31	53	0.0004	

σ = Standardabweichung (1 Sigma)
 t – Wert = Verhältnis des Koeffizienten zum Standardfehler
 p – Wert = Wahrscheinlichkeit, dass sich der Regressionskoeffizient signifikant von Null unterscheidet
 RSE = Residual standard error



Aus den Koeffizienten b_j in Tabelle 33 und Tabelle 34 lassen sich mit Hilfe der Formel 7 die Regressionsfunktionen, respektive Sorptionsisothermen aller gemessenen Materialien der Standorte Aarwangen, Brüttelen und Bütschwil erstellen und grafisch auftragen. Die untenstehenden Beispiele zeigen die Regressionsfunktionen der Sorptionsisothermen für den Aussenputz in Aarwangen (Material M_2), einerseits auf Basis der Messwerte des IBP (siehe Formel 8) und andererseits mit den im Labor der BFH gemessenen Werte als Grundlage (siehe Formel 9). Die zugehörigen grafisch dargestellten Sorptionsisothermen sind in Abbildung 59 und Abbildung 60 ersichtlich. Die restlichen Regressionskurven sind im Anhang E2 abgelegt.

$$u_{intern,M2,IBP} = \frac{(5 \pm 2 \cdot 0.25)}{(1.02 \pm 2 \cdot 0.001) - \varphi} + (15 \pm 2 \cdot 1.9) \quad \text{Formel 8}$$

mit:

u_{intern} = Feuchtegehalt bei relativer Feuchte φ in kg/m^3

φ = relative Feuchte, einheitslos

$b_{1...3}$ = materialspezifische Koeffizienten

$$u_{intern,M2,BFH} = \frac{(2.9 \pm 2 \cdot 0.21)}{(1 \pm 2 \cdot 7.7 \cdot 10^{-4}) - \varphi} + (21 \pm 2 \cdot 1.1) \quad \text{Formel 9}$$

mit:

u_{intern} = Feuchtegehalt bei relativer Feuchte φ in kg/m^3

φ = relative Feuchte, einheitslos

$b_{1...3}$ = materialspezifische Koeffizienten

6.4 Vergleich der Sorptionsisothermen Labor/IBP

6.4.1 Sorptionsisotherme Aarwangen

Die Abbildung 61, Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen die Sorptionsisothermen auf Basis der Messwerte des Fraunhofer-Instituts und des Labors an der BFH im Vergleich. Zusätzlich ist für jeden Messwert das 95 % Konfidenzintervall in Form von Antennen dargestellt. Wo keine Antennen sichtbar sind, ist das Konfidenzintervall vernachlässigbar klein oder nicht bekannt. Da im Kapitel 8 die simulierte Temperatur und relative Feuchte mit der in situ gemessenen Temperatur und relativen Feuchte, nicht aber die Wassergehalte verglichen werden, entfällt die Verwendung der ermittelten Sorptionsisothermen. Diese sind höchstens zum Vergleich der Güte der beiden Messungen im Labor der BFH sowie am IBP interessant.

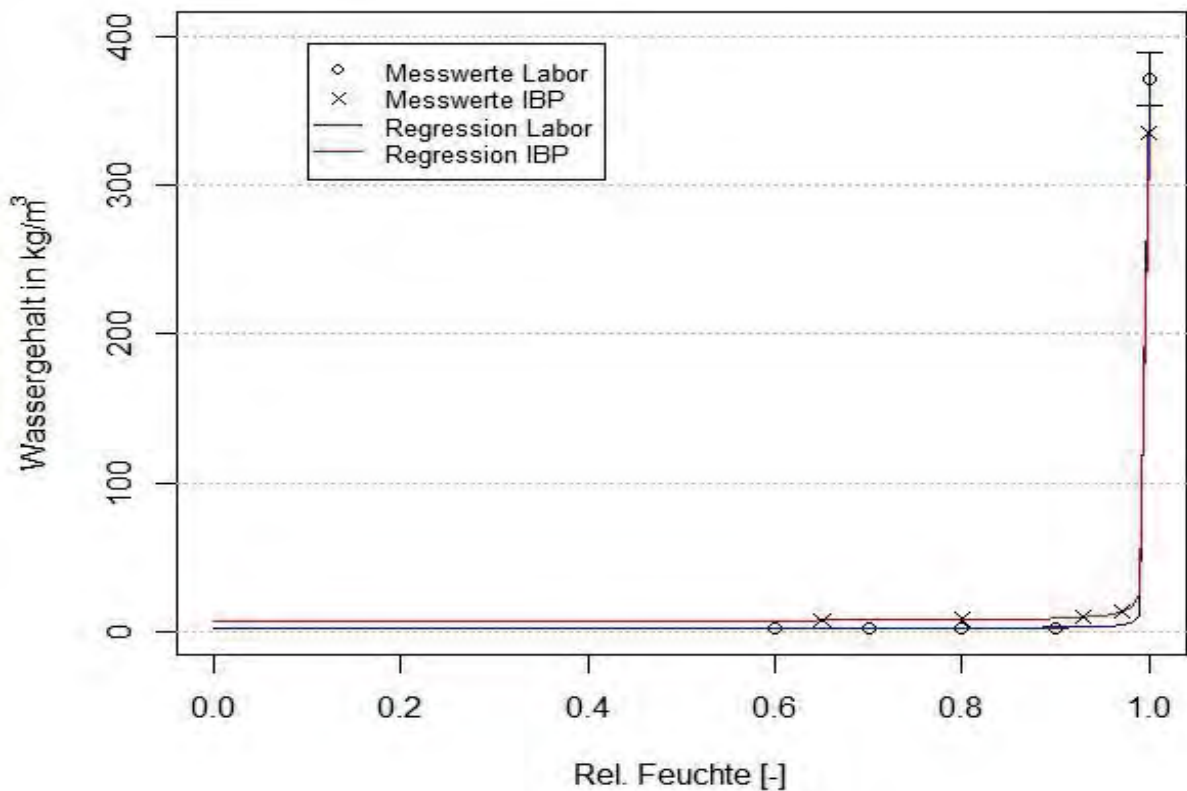


Abbildung 61: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Aarwangen auf Basis der Messwerte des IBP und des Labors an der BFH im Vergleich.

Alle drei Vergleiche zeigen eine Abweichung der gemessenen Wassersättigung. Dabei liegt die an der BFH gemessene Wassersättigung stets höher als jene, die am IBP ermittelt wurde.

Im tieferen Bereich des Wassergehaltes (> 0.9) unterscheiden sich die verglichenen Sorptionsisothermen ebenfalls. In der Abbildung 61 und Abbildung 62 ist der Unterschied jedoch nicht so deutlich erkennbar, wie in der Abbildung 63. Dies aufgrund der Skalierungen der y-Achse, resp. höheren Wassersättigungen der Materialien aus Aarwangen.

An dieser Stelle ist noch zu erwähnen, dass die Messwerte für die Sorptionsisothermen bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen wurden. Die Messung des Wassergehaltes am IBP wurden bei einer Temperatur von $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, jene im Labor der BFH bei einer Temperatur von $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ durchgeführt. Dieser Temperaturunterschied von ca. 7 K kann einen Einfluss auf die Messwerte und somit auf den Verlauf der Sorptionsisothermen haben.

In Anbetracht der Standardfehler der Regressionskurven aus Tabelle 33 und Tabelle 34 stimmen die Verläufe der Isothermen grundsätzlich nicht überein. Abweichungen der Kurven können gegebenenfalls darauf zurückgeführt werden, dass unterschiedlichen Proben bei den Messungen verwendet wurden, d.h. die Probenstücke die dem IBP zur Messung der Wassergehalte bei verschiedenen relativen Luftfeuchten zur Verfügung standen, waren nicht dieselben, wie die welche im Labor der BFH geprüft wurden.

Es konnte innerhalb des Projekts nicht endgültig geklärt werden, was die genaue Ursache dieser Abweichungen ist, insbesondere, ob es sich um Schwankungen der Materialeigenschaften, oder um Unterschiede der Messmethoden handelt.

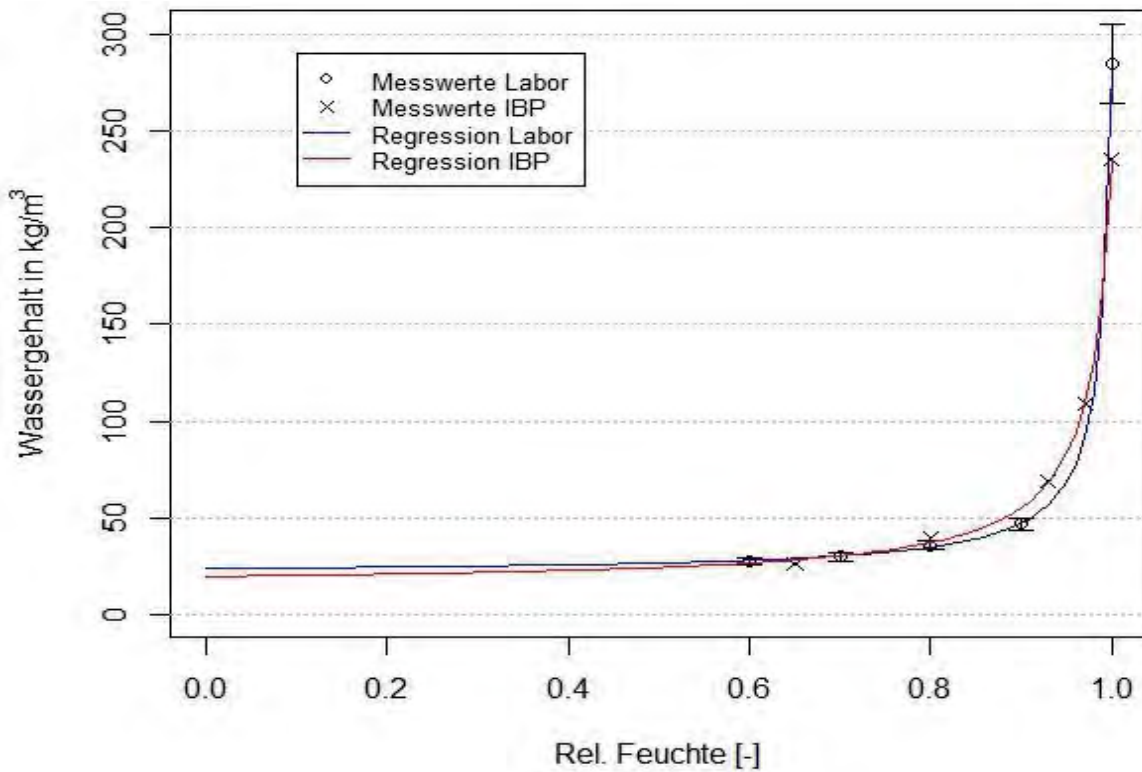


Abbildung 62: Sorptionsisothermen des Aussenputzes in Aarwangen auf Basis der Messwerte des IBP und des Labors an der BFH im Vergleich.

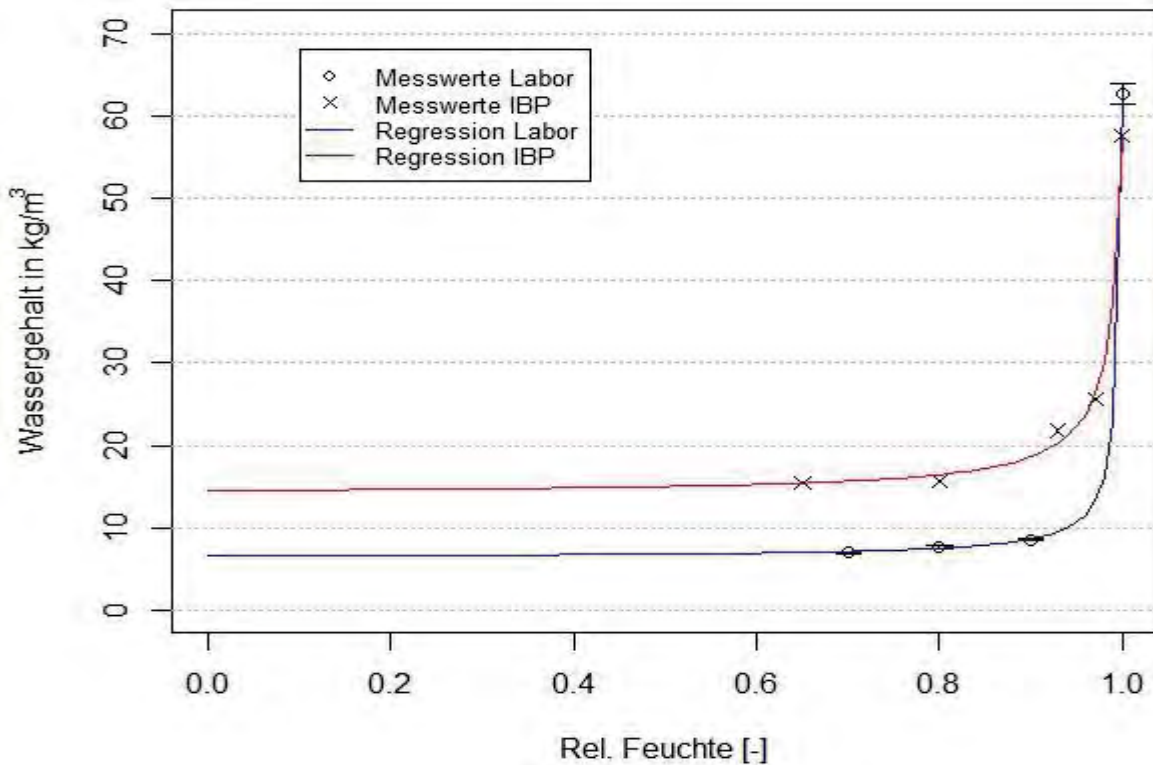


Abbildung 63: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Brüttelen auf Basis der Messwerte des IBP und des Labors an der BFH im Vergleich.

7 Numerische Simulation mit WUFI Pro®

7.1 Allgemein

Die Simulation der eindimensionalen Wärme- und Feuchteströme der Bauteilaufbauten erfolgt mit der Software WUFI Pro®. Das gemessene Raumklima wird in der Simulation als Randbedingung angesetzt. Die Aussenklimata stammen von drei ausgewählten Wetterstationen in der Nähe des Objekts, welche MeteoSchweiz auf dem Datenportal IDAweb zur Verfügung stellt [12]. Die Eingabe der Materialschichten und die Festlegung der Monitorpositionen erfolgen gemäss den tatsächlichen Wandaufbauten der Objekte im Kapitel 5.

Die Umgebungs- und Anfangsbedingungen variieren je nach Objekt, respektive dessen Ausrichtung.

7.2 Klimadaten

7.2.1 Wahl der Aussenklimadaten

Für die Aussenklimata der verschiedenen Standorte wird auf das Datenportal IDAweb zurückgegriffen. Dabei sind die Kriterien bei der Auswahl der Wetterstationen die Entfernung zum Messobjekt, die Höhenlage und nach Möglichkeit eine vergleichbare geographische Situation. Tabelle 35 gibt einen Überblick über die gewählten Wetterstationen und zeigt den Bezug zu den Messobjekten.

Tabelle 35: Details für die ausgewählten Wetterstationen zu den in situ Messobjekten.

Messobjekt	Höhe Messobjekt	Wetterstation	Höhe Wetterstation	Entfernung Messobjekt zu Wetterstation
Aarwangen	437 m ü.M.	Wynau	422 m ü.M.	ca. 7 km
Brüttelen	449 m ü.M.	Cressier	431 m ü.M.	ca. 12 km
Bütschwil	610 m ü.M.	Ebnat-Kappel	623 m ü.M.	ca. 12 km

Die Wetterdaten wurden am 15. Februar 2017 über das Datenportal IDAweb abgerufen [12].

7.2.2 Wahl der Innenklimadaten

Das Innenklima für die numerische Simulation mit WUFI Pro® wurde vor Ort an den Standorten Aarwangen, Brüttelen und Bütschwil gemessen. D.h., dass sowohl Messwerte der Raumtemperatur wie auch der relativen Luftfeuchte im Innenraum vorhanden sind, die für die Eingabe in WUFI Pro® verwendet werden können.

7.2.3 Aufbereitung der Klimadaten

Da die zur Verfügung gestellten Wetterdaten auf IDAweb weder lückenlos noch vollständig sind und die Stationen weder Diffus- noch Direktstrahlung vorweisen, müssen die Aussenklimadaten für die Simulation mit WUFI Pro® aufbereitet werden. D.h. fehlende Werte werden ergänzt, sei es durch in situ gemessene Werte oder durch Daten von Tagen mit ähnlichem Klimaverlauf, und die Anteile der Diffus-, respektive Direktstrahlung der Globalstrahlung werden mit Hilfe des Perez-Modells ermittelt. Mit diesem Modell lässt sich über die diffuse Strahlungsverteilung der diffuse Strahlungsanteil auf eine geneigte Ebene sehr genau bestimmen [14].

7.3 Bauteileingabe

7.3.1 Aarwangen

7.3.1.1 Bauteilaufbau

Die in den Simulationen verwendeten Modelle orientieren sich an den Aufbauten der untersuchten Aussenwände der jeweiligen Standorte Aarwangen, Brüttelen und Bütschwil im Kapitel 5. Die angesetzten Materialdaten stammen dabei entweder aus der WUFI Pro[®]-Datenbank und/oder wurden auf Basis dieser und den am Fraunhofer-Institut für Bauphysik gemessenen Materialkennwerte erstellt.

Im Folgenden ist das für das Objekt in Aarwangen in WUFI Pro[®] eingegebene Modell grafisch und tabellarisch dargestellt. Die Tabelle gibt dabei einen Überblick über die wärmeschutztechnischen Eigenschaften des Bauteils. Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke, s_d -Wert, und der Wärmedurchlasswiderstand, R , der einzelnen Schichten werden ermittelt. Summiert ergeben diese Kennwerte die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke und den Wärmedurchgangswiderstand, R_T , des ganzen Bauteils. Der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes, R_T , ergibt den Wärmedurchgangskoeffizienten, U-Wert.

Die Bauteilaufbauten in den Simulationen sind für beide untersuchten Himmelsrichtungen gleich.

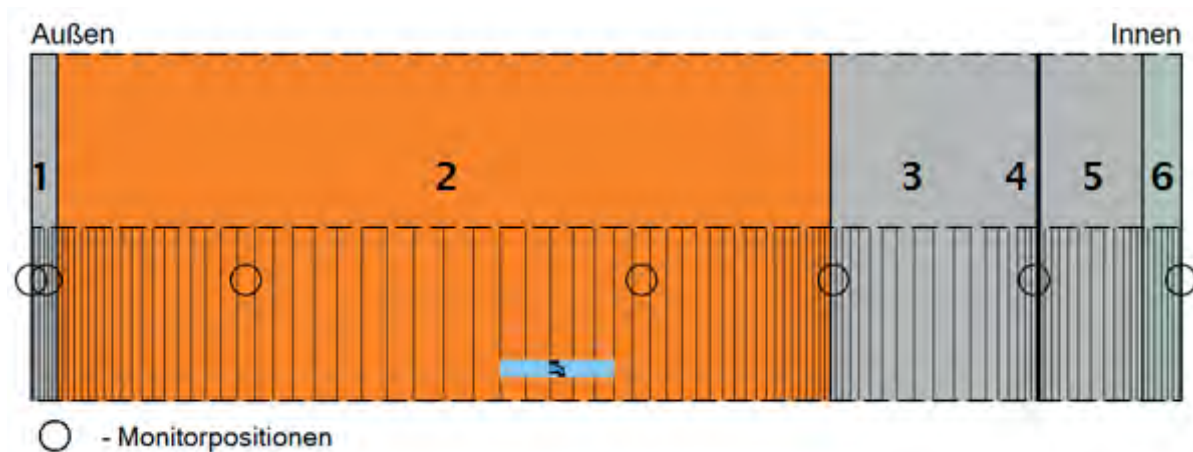


Abbildung 64: Wandaufbau und grafische Darstellung der Monitorpositionen für die WUFI Pro[®]-Simulation der Süd-West Wand in Aarwangen. Der Aufbau der Nord-West Wand ist gleich aber ohne Feuchtequelle (hellblau).

Tabelle 36: Tabellarische Darstellung des Wandaufbaus in Aarwangen mit den wärme- und feuchtetechnischen Kennwerten der Bauteilschichten.

Nr.	Bauteilaufbau Aarwangen	WUFI Pro [®] Material	d	μ	s_d	λ	R	U
			in m	-	in m	in W/mK	in (m ² K)/W	in W/(m ² K)
0	R _{si}	-	-	-	-	-	0.125	
1	Aussenputz	Aussenputz mit Farbe ¹	0.01	26/23	0.26	0.6	0.017	
2	Aussenwand	Hochlochziegel im Verbund ¹	0.3	7.8/17.5	2.34	0.14	2.143	
3	Wärmedämmung	Flumroc Dämmplatte 1	0.08	1	0.08	0.035	2.286	
4	Dampfbremse	INTELLO ²	0.001	26'000	26	2.4	0.0004	
5	Wärmedämmung	Flumroc Dämmplatte 3	0.04	1	0.04	0.033	1.212	
6	Verkleidung Innen	FERMACELL Gipsfaser-Platte ²	0.015	13	0.20	0.32	0.0469	
7	R _{se}	-	-	-	-	-	0.0588	
	Total		0.446					
	s _d				28.92			
	R _T						5.89	
	U							0.17

¹Neu erstelltes Material mit den am IBP gemessenen Materialkennwerten
²Material auf Basis der WUFI Pro[®]-Datenbank angepasst mit den Kennwerten des produktspezifischen Datenblattes

d = Schichtdicke
 μ = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (Dry-cup/Wet-cup)
s_d = Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke
 λ = Wärmeleitfähigkeit
R = Wärmedurchlasswiderstand
R_T = Wärmedurchgangswiderstand in (m²K)/W
U = Wärmedurchgangskoeffizient

7.3.1.2 Einlesen der IBP Daten, Generieren der Materialien

Um eine möglichst realitätsnahe hygrothermische Simulation mit WUFI Pro[®] durchzuführen, wird für den Aufbau auf die im Kapitel 6 dargestellten feuchtetechnischen Materialkennwerte sowie Produktdatenblätter im Anhang D zurückgegriffen.

Dabei wurden einerseits bereits vorhandene Materialdatensätze der WUFI Pro[®]-Datenbank entsprechend den jeweiligen Werten aus den produktspezifischen Datenblätter angepasst und andererseits neue Materialien generiert, die auf den Messwerten des IBP basieren. Folgende Tabellen zeigen alle veränderten sowie neu erstellten Materialien und deren Kennwerte, die für die WUFI Pro[®]-Simulationen verwendet wurden.

Im Verlauf der Auswertung hat sich gezeigt, dass der teilweise grosse Fugenanteil zwischen den Hochlochziegeln und/oder Natursteine einen massgebenden Einfluss auf den Feuchteverlauf in der Konstruktion ausübt. Da die am IBP gemessenen Materialkennwerte jedoch nur für das Gestein des Mauerwerks gelten, musste der Flüssigtransport durch das Mauerwerk so angepasst werden, dass der höhere Wassertransport über die Fuge, also den Mörtel, ebenfalls berücksichtigt wird. Diese Anpassung erreicht man, indem die Materialkennwerte Flüssigtransportkoeffizient Saugen und Weiterverteilung entsprechend verändert werden. Diese Anpassungen mussten bei den Objekten Aarwangen und Brüttelen, aufgrund der hohen Fugenanteile im Mauerwerk, vorgenommen werden. Somit weichen die Materialkennwerte der Mauerwerke in Aarwangen und Brüttelen in den folgenden Tabellen teils von den Werten aus dem Kapitel 6.2.2, respektive aus den Prüfberichten des Fraunhofer-Instituts im Anhang C, ab.



Zudem kann dieser Fugenanteil lokal stark variieren, weshalb sich die Eingaben der Materialkennwerte je Wand unterscheiden können.

Für die Simulationen mit WUFI Pro[®] wurden diese korrigierten Materialkennwerte verwendet.

Folgende Materialien wurden neu generiert oder die Kennwerte der entsprechenden Materialdatensätze für die hygrothermische Simulation des Objektes in Aarwangen angepasst.

Neu erstelltes Material mit am Fraunhofer-Institut für Bauphysik gemessenen Materialkennwerten:

- Aussenputz (Aussenputz mit Farbe)

Tabelle 37: Materialkennwerte des neu erstellten Materials, Aussenputz mit Farbe, des Objekts in Aarwangen für die Simulation mit WUFI Pro[®].

Kennwert	Einheit	Neuer Datensatz					
		Aussenputz mit Farbe					
ρ_{Roh}	kg/m ³	1716					
ϕ	m ³ /m ³	0.346					
μ -Wert	-	26 ¹			23 ²		
bei ϕ_i	-	0-0.5			0.5-0.93		
D_{WS}	m ² /s	0	$2.5 \cdot 10^{-11}$		$8 \cdot 10^{-9}$		
bei ϕ_i	-	0	0.8^3		1^4		
D_{WW}	m ² /s	0	$3.9 \cdot 10^{-10}$		$2.5 \cdot 10^{-9}$		
bei ϕ_i	-	0	0.8^3		1^4		
u	kg/m ³	0	26.6	39.1	69.1	108.9	235
bei ϕ_i	-	0	0.65	0.8	0.93	0.97	1
¹ Werte aus Dry-cup-Messungen ² Werte aus Wet-cup-Messungen ³ entspricht D_{W0} aus dem Prüfbericht des IBP ⁴ entspricht D_{Wf} aus dem Prüfbericht des IBP							
ρ_{Roh} = Rohdichte ϕ = Porosität μ -Wert = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig ϕ = relative Luftfeuchte D_{WS} = Flüssigtransportkoeffizient, Saugen D_{WW} = Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung u = Wassergehalt							

– Aussenwand (Hochlochziegel im Verbund)

Tabelle 38: Materialkennwerte des neu erstellten Materials, Hochlochziegel im Verbund, des Objekts in Aarwangen für die Simulation mit WUFI Pro®.

Kennwert	Einheit	Neuer Datensatz					
		Hochlochziegel im Verbund					
ρ_{Roh}	kg/m ³	1265					
ϕ	m ³ /m ³	0.52					
μ -Wert	-	17.8 ¹			17.6 ²		
bei ϕ_i	-	0-0.5			0.5-0.93		
D_{WS}	m ² /s	0	2.8*10 ⁻¹⁰ A	2.8*10 ⁻⁹ B	2.5*10 ⁻⁶		
bei ϕ_i	-	0	0.8 ³		1 ⁴		
D_{WW}	m ² /s	0	2.5*10 ⁻⁶ A	6.5*10 ⁻¹⁰ B	1.1*10 ⁻⁶ A	1.1*10 ⁻⁸ B	
bei ϕ_i	-	0	0.8 ³		1 ⁴		
u	kg/m ³	0	7.7	8.2	9.7	13.2	335
bei ϕ_i	-	0	0.65	0.8	0.93	0.97	1

¹Werte aus Dry-cup-Messungen
²Werte aus Wet-cup-Messungen
³entspricht D_{W0} aus dem Prüfbericht des IBP
⁴entspricht D_{Wf} aus dem Prüfbericht des IBP
^ANord-West-Wand
^BSüd-West-Wand

ρ_{Roh} = Rohdichte
 ϕ = Porosität
 μ -Wert = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig
 ϕ = relative Luftfeuchte
 D_{WS} = Flüssigtransportkoeffizient, Saugen
 D_{WW} = Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung
 u = Wassergehalt

Korrektur mit Materialkennwerten aus den Produktdatenblättern (PDB):

– Verkleidung Innen (FERMACELL Gipsfaser-Platte)

Tabelle 39: Materialkennwerte des angepassten Materials, FERMACELL Gipsfaser-Platte, des Objekts in Aarwangen für die Simulation mit WUFI Pro®.

Kennwert	Einheit	Alter Datensatz	Neuer Datensatz
		FERMACELL Gipsfaser-Platte	FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB
ρ_{Roh}	kg/m ³	1153	1150
c	J/(kg*K)	1200	1100
μ -Wert	-	16	13

ρ_{Roh} = Rohdichte
 c = spezifische Wärmekapazität
 μ -Wert = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig



7.3.1.3 Monitorpositionen

Passend zu den Messpositionen in den zu untersuchenden Aussenwänden werden in WUFI Pro[®] die Monitorpositionen gesetzt. Das Simulationsprogramm WUFI Pro[®] ermöglicht an diesen Monitorpositionen die Ausgabe verschiedenster Rechengrössen. Unter anderem die Temperatur, Taupunkttemperatur, Materialfeuchte und relative Luftfeuchte, die später für den Vergleich mit den in situ Messungen herangezogen werden.

Die Abbildung 64 sowie die Tabelle 40 zeigen für den Standort in Aarwangen die in WUFI Pro[®] verwendeten, respektive gesetzten Monitorpositionen.

Tabelle 40: Auflistung der Monitorpositionen für die WUFI Pro[®]-Simulation des Objekts in Aarwangen.

Nr.	Bezeichnung	Schichtdicke in m	Monitorpositionsnr.	in Schicht ¹	reale Tiefe ²
				in m	in m
1	Aussenputz mit Farbe	ca. 0.01	A.1.1	0	0
			A.1.2	0.005	0.005
2	Hochlochziegel im Verbund	ca. 0.23	A.2.1	0.07	0.073
			A.2.2	0.23	0.227
3	Flumroc- Dämmplatte 1	0.08	A.3.1	0	0.0011
			A.3.2	0.08	0.079
4	INTELLO-PDB	0.001	-	-	-
5	Flumroc- Dämmplatte 3	0.03	-	-	-
6	FERMACELL GFP	0.015	A.6.1	0.015	0.015

¹Angesetzte Tiefe der Monitorposition in der Schicht
²Aufgrund des Gitteraufbaus mögliche von WUFI Pro[®] verwendete Tiefe

7.3.2 Brüttelen

7.3.2.1 Bauteilaufbau

Analog dem Objekt in Aarwangen (Kapitel 7.3.1.1) ist nachfolgend das für das Objekt in Brüttelen in WUFI Pro[®] eingegebene Modell grafisch und tabellarisch dargestellt.

Die Bauteilaufbauten sind für beide untersuchten Himmelsrichtungen gleich.

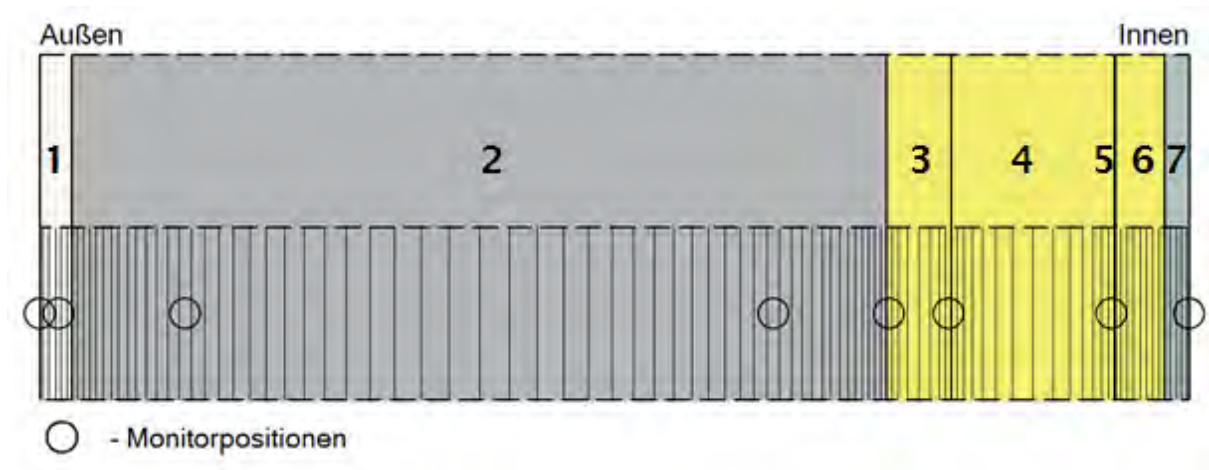


Abbildung 65: Wandaufbau mit Monitorpositionen für die WUFI Pro[®]-Simulation des Objekts in Brüttelen.

Tabelle 41: Tabellarische Darstellung des Wandaufbaus in Brüttelen mit den Wärme- und feuchtetechnischen Kennwerten der Bauteilschichten.

Nr.	Bauteilaufbau Brüttelen	WUFI Pro [®] Material	d	μ	s_d	λ	R	U
			in m	-	in m	in W/mK	in (m ² K)/W	in W/(m ² K)
0	R _{si}	-	-	-	-	-	0.125	
1	Aussenputz	Zementputz ²	0.02	25	0.5	1.2	0.0167	
2	Aussenwand	Muschelkalk ¹	0.5	203/67	101.5	2.25	0.222	
3	Wärmedämmung	ISOVER UNIROLL - 035	0.04	1	0.04	0.034	1.1765	
4	Wärmedämmung	ISOVER UNIROLL - 035	0.1	1	0.1	0.034	2.9412	
5	Dampfsperre	ISOVER Vario XtraSafe	0.001	27'000	27	2.3	0.00043	
6	Wärmedämmung	ISOVER UNIROLL - 035	0.03	1	0.03	0.034	0.8824	
7	Verkleidung Innen	FERMACELL Gipsfaser-Platte ²	0.015	13	0.20	0.32	0.0469	
8	R _{se}	-	-	-	-	-	0.0588	
	Total		0.706					
	S _d				129.37			
	R _T						5.47	
	U							0.183

¹Neu erstelltes Material mit den am IBP gemessenen Materialkennwerten
²Material auf Basis der WUFI-Datenbank angepasst mit den Kennwerten des produktspezifischen Datenblattes

d = Schichtdicke
 μ = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (Dry-cup/Wet-cup)
 s_d = Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke
 λ = Wärmeleitfähigkeit
R = Wärmedurchlasswiderstand
R_T = Wärmedurchgangswiderstand in (m²K)/W
U = Wärmedurchgangskoeffizient

7.3.2.2 Einlesen IBP Daten, Generieren der Materialien

Wie beim Objekt in Aarwangen (Kapitel 7.3.1.2) wird für den Aufbau in Brüttelen auf die im Kapitel 6 dargestellten feuchtetechnischen Materialkennwerte sowie Produktdatenblätter im Anhang D zurückgegriffen.

Bei der Süd-West Wand in Brüttelen musste nebst den korrigierten Flüssigtransportkoeffizienten noch die Feuchtespeicherfunktion des Mauerwerks angepasst werden. D.h. für die Berechnung wurden nicht die Messwerte des Fraunhofer-Instituts verwendet, sondern jene, die im Labor der BFH gemessen wurden (siehe Kapitel 6.1.3). Grund dieser zusätzlichen Anpassung sind einerseits die direkte Abhängigkeit der Flüssigtransportkoeffizienten von der Feuchtespeicherfunktion und andererseits der Einfluss des Fugenanteils auf die Feuchtespeicherfunktion des Mauerwerks. D.h. grundsätzlich müssten ebenfalls bei den restlichen Bauteilen (Aarwangen Nord-West und Süd-West sowie Brüttelen Nord-West) die Feuchtespeicherfunktion entsprechend dem Fugenanteil angepasst werden. Aufgrund des geringen Einflusses und aus zeitlichen Gründen wurde jedoch auf die Korrektur verzichtet.

Gemäss Tabelle 41 mussten folgende Materialien neu generiert oder die Kennwerte der entsprechenden Materialdatensätze für die hygrothermische Simulation des Objekts in Brüttelen angepasst werden.



Neu erstelltes Material mit am Fraunhofer-Institut für Bauphysik gemessenen Materialkennwerten für die Aussenwand (Muschelkalk).

Tabelle 42: Materialkennwerte des neu erstellten Materials, Hochlochziegel im Verbund, des Objekts in Brüttelen für die Simulation mit WUFI Pro®.

Kennwert	Einheit	Neuer Datensatz					
		Hochlochziegel im Verbund					
ρ_{Roh}	kg/m ³	2366					
ϕ	m ³ /m ³	0.11					
μ -Wert	-	203 ¹			67 ²		
bei φ_i	-	0-0.5			0.5-0.93		
D_{WS}	m ² /s	0	$5.8 \cdot 10^{-10}$		$8.3 \cdot 10^{-8}$		
bei φ_i	-	0	0.8 ³		1 ⁴		
D_{WW}	m ² /s	0	$4.2 \cdot 10^{-10}$ ^A		$8.7 \cdot 10^{-9}$ ^A		
bei φ_i	-	0	0.8 ³		1 ⁴		
u ^A	kg/m ³	0	15.4 ^A	15.7 ^A	21.8 ^A	25.6 ^A	57.6 ^A
bei φ_i	-	0	0.65	0.8	0.93	0.97	1
u ^B	kg/m ³	0	0.9 ^B	7 ^B	7.7 ^B	8.6 ^B	62.7 ^B
bei φ_i	-	0	0.2	0.7	0.8	0.9	1
¹ Werte aus Dry-cup-Messungen ² Werte aus Wet-cup-Messungen ³ entspricht D_{W0} aus dem Prüfbericht des IBP ⁴ entspricht D_{Wf} aus dem Prüfbericht des IBP ^A Nord-West-Wand ^B Süd-West-Wand							
ρ_{Roh} = Rohdichte ϕ = Porosität μ -Wert = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig φ = relative Luftfeuchte D_{WS} = Flüssigtransportkoeffizient, Saugen D_{WW} = Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung u = Wassergehalt							

Korrektur mit Materialkennwerten aus den Produktdatenblättern (PDB) für den Aussenputz (Zementputz).

Tabelle 43: Materialkennwerte des angepassten Materials, Zementputz, des Objekts in Brüttelen für die Simulation mit WUFI Pro®.

Kennwert	Einheit	Alter Datensatz			Neuer Datensatz		
		Zementputz (w-Wert: 0.51 kg/m ² h ^{0.5})			Zementputz		
w-Wert	kg/m ² √s	0.0085			0.014		
D _{ws}	m ² /s	0	9*10 ⁻¹²	2.9*10 ⁻⁹	0	9*10 ⁻¹²	3*10 ⁻¹⁰
bei φ _i	-	0	0.8	1	0	0.8	1
D _{ww}	m ² /s	0	2.3*10 ⁻¹¹	9.5*10 ⁻⁹	0	2.3*10 ⁻¹¹	9.5*10 ⁻¹⁰
bei φ _i	-	0	0.8	1	0	0.8	1
w-Wert = Wasseraufnahmekoeffizient φ = relative Luftfeuchte D _{ws} = Flüssigtransportkoeffizient, Saugen D _{ww} = Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung							

Die Änderung des w-Wertes des Aussenputzes zieht eine Veränderung der Flüssigtransportkoeffizienten nach sich, da diese auf Basis der Wasseraufnahme mit Hilfe einer Exponentialfunktion abgeschätzt werden.

Für die Verkleidung Innen (FERMACELL Gipsfaser-Platte) werden die Werte aus dem Produktdatenblatt verwandt.

Tabelle 44: Materialkennwerte des angepassten Materials, FERMACELL Gipsfaser-Platte, des Objekts in Brüttelen für die Simulation mit WUFI Pro®.

Kennwert	Einheit	Alter Datensatz		Neuer Datensatz	
		FERMACELL Gipsfaser-Platte		FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	
ρ _{Roh}	kg/m ³	1153		1150	
c	J/(kg*K)	1200		1100	
μ-Wert	-	16		13	
ρ _{Roh} = Rohdichte c = spezifische Wärmekapazität μ-Wert = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig					



7.3.2.3 Monitorpositionen

Wie in Aarwangen (Kapitel 7.3.1.3) werden in Brüttelen, passend zu den Messpositionen, in den zu untersuchenden Aussenwänden in WUFI Pro[®] die Monitorpositionen gesetzt.

Die Abbildung 65 sowie die Tabelle 45 zeigen für den Standort in Brüttelen die in WUFI Pro[®] verwendeten, respektive gesetzten Monitorpositionen.

Tabelle 45: Auflistung der Monitorpositionen für die WUFI Pro[®]-Simulation des Objekts in Brüttelen.

Nr.	Bezeichnung	Schichtdicke in m	Monitorpositionsnr.	in Schicht ¹	reale Tiefe ²
				in m	in m
1	Zementputz	0.02	B.1.1	0	0
			B.1.2	0.01	0.012
2	Krensheimer Muschelkalk	0.5	B.2.1	0.07	0.072
			B.2.2	0.43	0.428
3	ISOVER UNIROLL - 035	0.04	B.3.1	0	0.0017
			B.3.2	0.04	0.038
4	ISOVER UNIROLL - 035	0.1	B.4.1	0.1	0.098
5	ISOVER Vario XtraSafe	0.001	-	-	-
6	ISOVER UNIROLL - 035	0.03	-	-	-
7	FERMACELL GFP	0.015	B.7.1	0.015	0.015

¹Angesetzte Tiefe der Monitorposition in der Schicht
²Aufgrund des Gitteraufbaus mögliche von WUFI Pro[®] verwendete Tiefe

7.3.3 Bütschwil

7.3.3.1 Bauteilaufbau

Analog dem Objekt in Aarwangen (Kapitel 7.3.1.1) ist nachfolgend das für das Objekt in Bütschwil in WUFI Pro[®] eingegebene Modell grafisch und tabellarisch dargestellt.

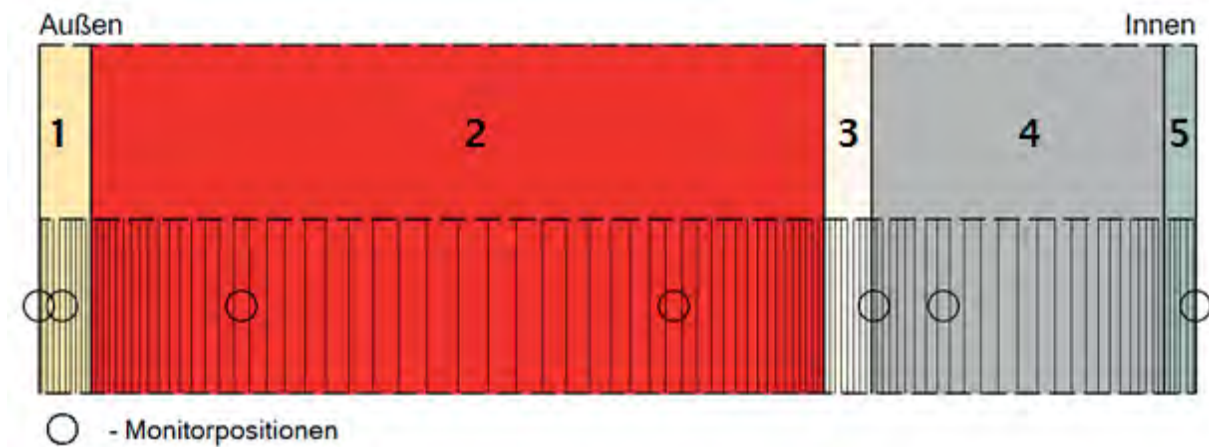


Abbildung 66: Wandaufbau und grafische Darstellung der Monitorpositionen für die WUFI Pro[®]-Simulation des Objekts in Bütschwil.

Tabelle 46: Tabellarische Darstellung des Wandaufbaus in Bütschwil mit den wärme- und feuchtetechnischen Kennwerten der Bauteilschichten.

Nr.	Bauteilaufbau Bütschwil	WUFI Pro [®] Material	d	μ	s_d	λ	R	U
			in m	-	in m	in W/mK	in (m ² K)/W	in W/(m ² K)
0	R _{si}	-	-	-	-	-	0.125	
1	Aussenputz	Mineralischer Aussenputz	0.0225	25	0.56	0.8	0.0281	
2	Aussenwand	Kellerziegel	0.35	15	5.25	0.18	1.94	
3	Innenputz	Innenputz (Gips)	0.0225	8.3	0.19	0.2	0.1125	
4	Wärmedämmung	Isofloc L ²	0.14	1.2	0.21	0.038	3.6842	
5	Verkleidung Innen	FERMACELL Gipsfaser-Platte ²	0.015	13	0.2	0.32	0.0469	
6	R _{se}	-	-	-	-	-	0.0588	
	Total		0.55					
	S _d				6.404			
	R _T					6		
	U							0.167

¹Neu erstelltes Material mit den am IBP gemessenen Materialkennwerten

²Material auf Basis der WUFI-Datenbank angepasst mit den Kennwerten des produktspezifischen Datenblattes

d = Schichtdicke

μ = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl

s_d = Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke

λ = Wärmeleitfähigkeit

R = Wärmedurchlasswiderstand

R_T = Wärmedurchgangswiderstand in (m²K)/W

U = Wärmedurchgangskoeffizient

7.3.3.2 Einlesen IBP Daten, Generieren der Materialien

Wie beim Objekt in Aarwangen (Kapitel 7.3.1.2) wird ebenfalls für den Aufbau in Bütschwil auf die im Kapitel 6 dargestellten feuchtetechnischen Materialkennwerte sowie Produktdatenblätter im Anhang D zurückgegriffen.

Gemäss Tabelle 46 mussten folgende Materialien neu generiert oder die Kennwerte der entsprechenden Materialdatensätze für die hydrothermische Simulation des Objektes in Bütschwil angepasst werden.

Korrektur mit Materialkennwerten aus den Produktdatenblättern (PDB):

- für die Wärmedämmung (Isfloc LM)

Tabelle 47: Materialkennwerte des angepassten Materials, Isfloc LM - PDB, des Objekts in Bütschwil für die Simulation mit WUFI Pro[®].

Kennwert	Einheit	Alter Datensatz	Neuer Datensatz
		Isfloc L	Isfloc LM - PDB
λ	W/mK	0.037	0.038
λ = Wärmeleitfähigkeit			



– für die Verkleidung Innen (FERMACELL Gipsfaser-Platte)

Tabelle 48: Materialkennwerte des angepassten Materials, FERMACELL Gipsfaser-Platte, des Objekts in Bütschwil für die Simulation mit WUFI Pro®.

Kennwert	Einheit	Alter Datensatz	Neuer Datensatz
		FERMACELL Gipsfaser-Platte	FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB
ρ_{Roh}	kg/m ³	1153	1150
c	J/(kg*K)	1200	1100
μ-Wert	-	16	13

ρ_{Roh} = Rohdichte
c = spezifische Wärmekapazität
 μ -Wert = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, feuchteabhängig

7.3.3.3 Monitorpositionen

Wie in Aarwangen (Kapitel 7.3.1.3) werden in Bütschwil, passend zu den Messpositionen, in den zu untersuchenden Aussenwänden in WUFI Pro® die Monitorpositionen gesetzt.

Die Abbildung 66 sowie die Tabelle 49 zeigen für den Standort in Bütschwil die in WUFI Pro® verwendeten, respektive gesetzten Monitorpositionen.

Tabelle 49: Auflistung der Monitorpositionen für die WUFI Pro®-Simulation und für die Messungen des Objekts in Bütschwil.

Nr.	Bezeichnung	Schichtdicke in m	Monitorpositionenr.	in Schicht ¹	reale Tiefe ²
				in m	in m
1	Mineralischer Aussenputz	0.025	Bu.1.1	0	0
			Bu.1.2	0.01125	0.01105
2	Kellerziegel	0.35	Bu.2.1	0.07	0.072
			Bu.2.2	0.28	0.278
3	Innenputz	0.0225	-	-	-
4	Isofloc L	0.14	Bu.4.1	0	0.0013
			Bu.4.2	0.04	0.041
5	FERMACELL GFP	0.015	Bu.5.1	0.015	0.015

¹Angesetzte Tiefe der Monitorposition in der Schicht
²Aufgrund des Gitteraufbaus mögliche von WUFI Pro® verwendete Tiefe

Die Öffnung der Wand in Bütschwil für einen notwendigen Sensortausch am 18. Januar 2017 zeigte, dass sich der Sensor N-8, also der Sensor in der Isofloc-Dämmung, nach aussen verschoben hatte. Entsprechend musste die Monitorposition Bu.4.2 angepasst werden.

7.4 Umgebungs-, Anfangs- und Steuerungsbedingungen

7.4.1 Eigenschaften der Oberflächen

In WUFI Pro[®] können eine Reihe von Oberflächeneigenschaften festgelegt werden. Die Oberflächenübergangskoeffizienten beschreiben, in welchem Umfang die Umgebungsbedingungen das Bauteil beeinflussen.

Folgende Tabelle 50 führt die verwendeten Oberflächenübergangskoeffizienten für die einzelnen Standorte auf.

Tabelle 50: Verwendete Oberflächenübergangskoeffizienten der untersuchten Standorte.

Standort	Orientierung	Aussenoberfläche						Innenoberfläche	
		R_{Se}	Sd-Wert ¹	a_s	ϵ	ρ_{terr}	a_{Regen} ²	R_{Si}	Sd-Wert ¹
Aarwangen	Nord-West	0.059	-	0.4	-	0.2	-	0.125	-
	Süd-West		-	0.4	-	0.2	0.7		-
Brüttelen	Nord-West		-	0.3	-	0.22	-		-
	Süd-West		-	0.3	-	0.25	0.1		-
Bütschwil	Nord	-	0.6	-	0.2	0.7	-		

R_{Se} = Wärmeübergangswiderstand in m^2K/W
 S_d -Wert = Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke in m
 a_s = kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl, einheitslos
 ϵ = langwellige Strahlungsemissionszahl, einheitslos
 ρ_{terr} = Terrestrischer kurzwelliger Reflexionsgrad, einheitslos
 a_{Regen} = Regenabminderungsfaktor, einheitslos

¹ Der s_d -Wert einer Oberflächenbeschichtung (z.B. Anstriche), welcher deren diffusionsverzögernde Wirkung zu berücksichtigen erlaubt, ohne dass die jeweiligen Schichten extra in den Bauteilaufbau eingefügt werden müssen. Falls aber bereits eine eigene Schicht in den Bauteilaufbau (z.B. Aussenputze, Aussenverkleidung, etc.) eingefügt wurde, kann dieser Parameter vernachlässigt werden.

² Durch den a_{Regen} wird berücksichtigt, dass von dem auf geneigte Flächen auftreffenden Regen ein Teil sofort wegspritzt und nicht mehr für den kapillaren Saugvorgang zur Verfügung steht

7.4.2 Anfangsbedingungen und Simulationsperiode

Die Anfangsbedingungen, d.h. die relative Anfangsfeuchte und Anfangstemperatur der Schichten im Bauteil, sind bei allen durchgeführten Berechnungen unterschiedlich. Wie die Tabelle 51 zeigt, weisen die Bauteile oder jeweils einzelne Schichten in Aarwangen und Brüttelen eine erhöhte Materialfeuchte auf. Ursache hierfür sind in Aarwangen wahrscheinlich die Einbaufeuchte der Mauerwerksergänzungen und in Brüttelen die Ausbetonierung der Kappendecke.

Der Start des Berechnungszeitraums wird für alle Objekte auf das Datum des Beginns der in situ Messungen gelegt. Dabei wird nicht zwischen Nord-West und Süd-West Wand unterschieden. Die Tabelle 51 zeigt für alle Objekte die Anfangsbedingungen der Simulation.

Das Ende des Berechnungszeitraums ist der 01.02.2017. Ziel ist es, einen möglichst großen Messzeitraum analysieren zu können.



Tabelle 51: Für die WUFI Pro[®]-Simulationen verwendeten Anfangsfeuchten und –Temperaturen, sowie der Start des Berechnungszeitraums.

Standort	Orientierung	Relative Feuchte	Temperatur	Start der Simulation
			in ° C	
Aarwangen	Nord-West	0.82 ¹	20	15.10.2014
	Süd-West	0.80 ¹	20	“
Brüttelen	Nord-West	0.92 ¹	15	01.10.2014
	Süd-West	0.89 ¹	15	“
Bütschwil	Nord	0.65 ²	20	01.06.2015

¹ Anpassung für Mauerwerk, restliche Schichten 0.80
² Anpassung gilt für alle Schichten

7.5 Ergebnisse der numerischen Simulationen mit WUFI Pro[®]

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen werden im folgenden Kapitel 8 im direkten Vergleich mit den in situ Messungen diskutiert. Die vollständigen und detaillierten Ausgabedaten der Simulationen sind im Anhang F abgelegt.

8 Ergebnisse der in situ Messungen im Vergleich mit den numerischen Simulationen

In diesem Kapitel werden die in situ Messungen an den Objekten mit den numerischen Simulationsergebnissen von WUFI Pro[®] verglichen.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Rekonstruktion der Temperaturen und der relativen Feuchten in den Bauteilen.

Aus Platzgründen wird in diesem Kapitel 8 nur die sensibelste Schicht, also die Übergangsschicht Mauerwerk/Innendämmung, diskutiert, ausser beim Objekt in Bütschwil. Aufgrund vieler Ausfälle, die wahrscheinlich auch auf eine erhöhte Feuchte zurückzuführen sind, fehlt an diesem Standort in der besagten Schicht einen Grossteil der Messwerte. Zur Kompensation werden zusätzlich die Messwerte der Messposition in der Wärmedämmung abgebildet.

Die restlichen Vergleiche der in situ Messungen mit der Simulation der anderen Schichten sind im Anhang G abgelegt.

8.1 Aarwangen

8.1.1 Legende Sensoranordnung

Um in den folgenden Darstellungen der Messergebnisse des Messobjektes Aarwangen die einzelnen Messergebnisse den jeweiligen Sensoren zuzuordnen zu können, sind in Abbildung 67 nochmals deren Positionen und Bezeichnungen dargestellt.

Die roten Punkte stellen dabei Temperatursensoren, die blauen Punkte Temperatur- und Feuchte-sensoren und die grünen Punkte Widerstandssensoren für die Bestimmung der Materialfeuchte dar. Die Beschriftung der Punkte gibt Auskunft über die Orientierung der Wand (NW = Nordwest und SW = Südwest) und über die Position des Sensors im Bauteil.

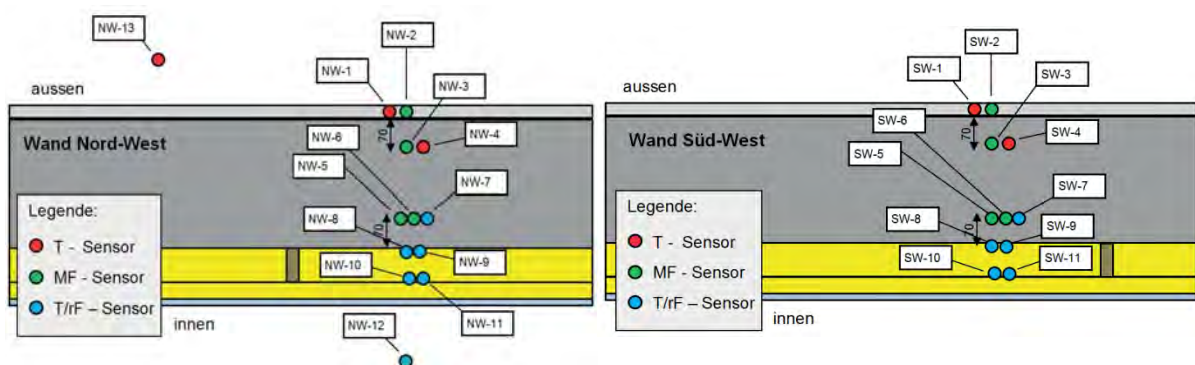


Abbildung 67: Sensoranordnung im Wandquerschnitt mit Bezeichnung der Sensoren für das Messobjekt Aarwangen.

8.1.2 Vergleich in situ Messungen und Simulation des Objektes in Aarwangen

Die Abbildung 68 zeigt einerseits den Vergleich der Temperaturverläufe der in situ Messungen (blau) und der Simulation mit WUFI Pro[®] (rot) und andererseits die Aussen- und Innenklimabedingungen (grau und schwarz). Für eine übersichtlichere Darstellung sind die stark fluktuierenden Klimabedingungen (Aussen- und Innenklima) geglättet dargestellt, d.h. es werden jeweils die gleitenden Mittelwerte von gleich grossen Untermengen der ursprünglichen Datenpunktmengen abgebildet.



Die Abbildung 69 stellt die Differenz zwischen der gemessenen und der mit WUFI Pro[®] simulierten Temperatur als Balken dar. Positive Werte bedeuten, dass die berechnete Temperatur grösser als die gemessene ist.

Ausserdem wird die gemittelte Differenz über alle Messwerte angegeben, die sich aus der Summe aller negativen und positiven Differenzen ergeben. Ist die gemittelte Differenz positiv, so bedeutet dies, dass die simulierte Temperatur im Allgemeinen höher ausgefallen ist als die in situ gemessene Temperatur.

Dasselbe gilt für den Vergleich der relativen Feuchte der in situ Messungen (blau) und der Simulation mit WUFI Pro[®] (rot) in der Abbildung 70. Wiederum sind die stark fluktuierenden Klimabedingungen, Aussen- und Innenklima (grau und schwarz), für eine übersichtlichere Darstellung geglättet dargestellt.

Die Abbildung 71 stellt analog der Abbildung 69 die Differenz zwischen der gemessenen und der mit WUFI Pro[®] simulierten relativen Feuchten als Balken dar. So bedeutet auch hier eine positive gemittelte Differenz, dass die simulierte relative Feuchte im Allgemeinen höher liegt als die in situ gemessene relative Feuchte und umgekehrt.

Nord-West Wand in Aarwangen:

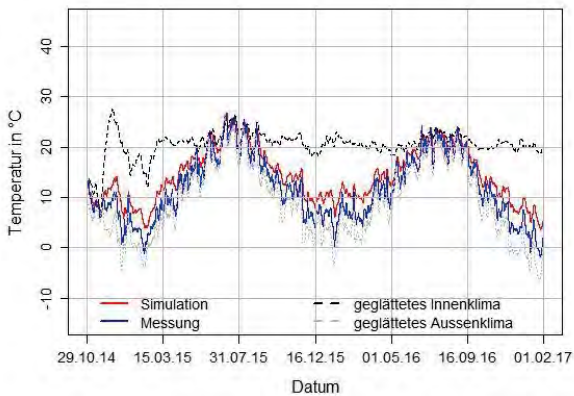


Abbildung 68: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.

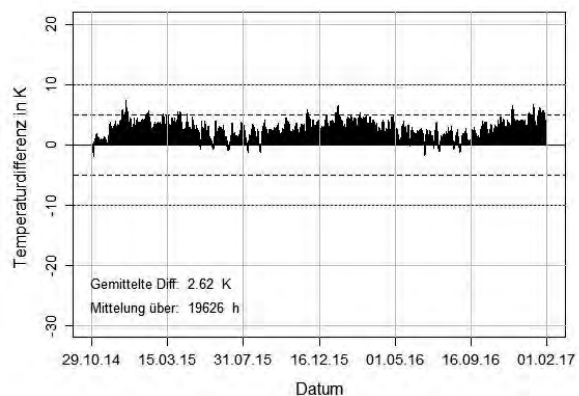


Abbildung 69: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.

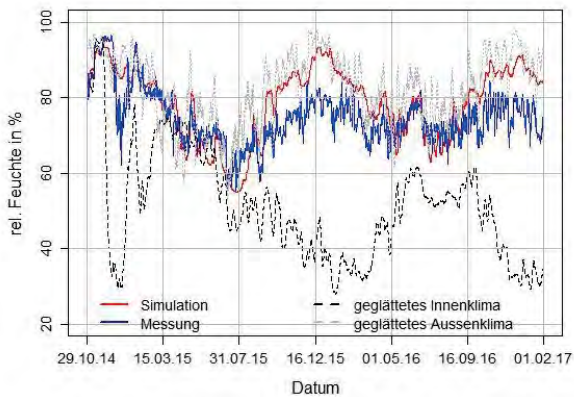


Abbildung 70: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.

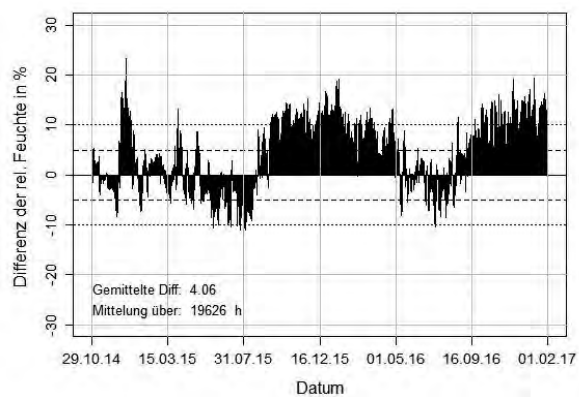


Abbildung 71: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.

Der Verlauf der simulierten Temperatur weicht nur geringfügig von der in situ gemessenen Temperatur ab. Insgesamt verläuft die simulierte Temperatur knapp oberhalb der gemessenen Temperatur. Daraus resultiert eine mittlere Abweichungen von (2.6 ± 2.8) K.

Der Verlauf der simulierten relativen Feuchte stimmt zu Beginn sehr gut mit den in situ Messungen überein. Im Winter 15/16 steigt sie jedoch stark über die Messwerte, pendelt sich jedoch im Frühjahr und Sommer wieder auf demselben Niveau ein. Der Grund für diese Abweichung konnte nicht ermittelt werden. Es ergibt sich eine mittlere Abweichungen von (4.1 ± 13) % r. F.

Abbildung 72 und Abbildung 74 zeigen einerseits den Vergleich der Temperaturverläufe, respektive den Vergleich der Verläufe der relativen Feuchte der in situ Messungen (blau) und der Simulation mit WUFI Pro[®] (rot) der Süd-West Wand in Aarwangen und andererseits die entsprechenden Aussen- und Innenklimabedingungen (grau und schwarz).

Abbildung 73 und Abbildung 75 stellen zudem die Differenzen zwischen der gemessenen und der mit WUFI Pro[®] simulierten Temperatur, respektive relativen Feuchte als Balken dar.

Süd-West Wand in Aarwangen:

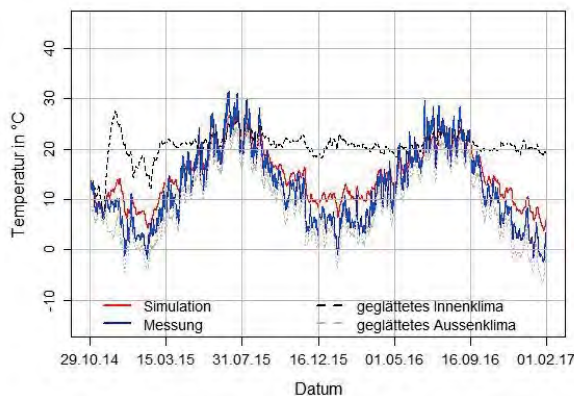


Abbildung 72: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.

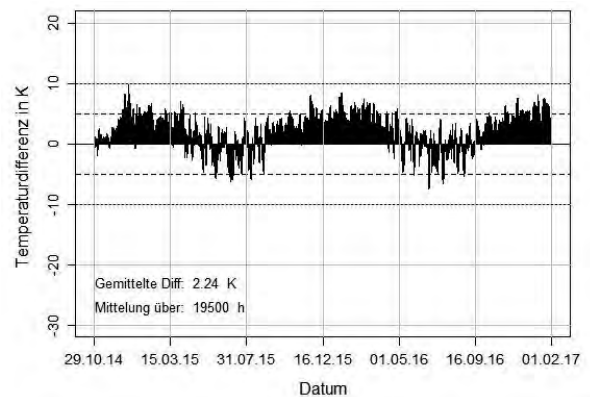


Abbildung 73: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.

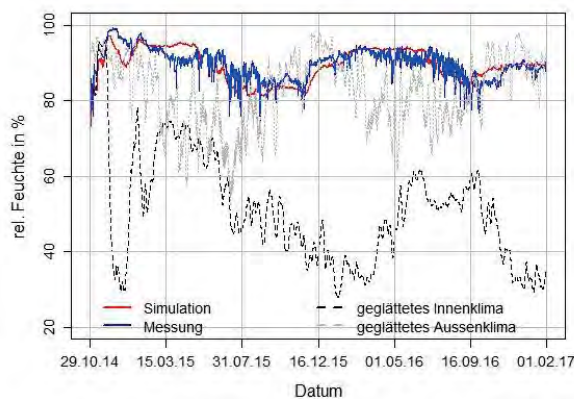


Abbildung 74: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.

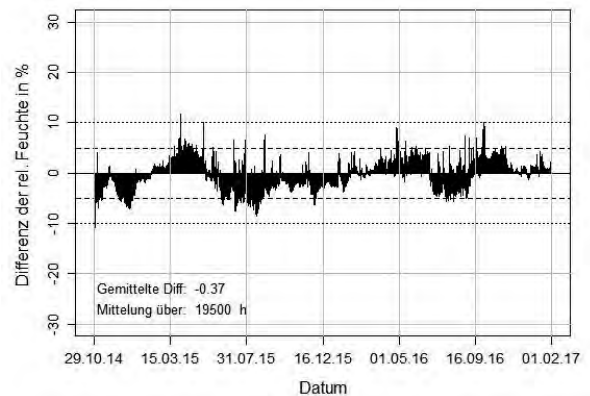


Abbildung 75: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.



Der Verlauf der simulierten Temperatur weicht nur geringfügig von der in situ gemessenen Temperatur mit einer mittleren Abweichung von (2.2 ± 5.5) K ab. Insgesamt verläuft die simulierte Temperatur oberhalb der gemessenen Temperatur.

Der Verlauf der simulierten relativen Feuchte stimmt mit einer mittleren Abweichung von (-0.4 ± 5.7) % über die ganze Messperiode sehr gut mit den in situ Messungen überein.

Die erhöhte relative Feuchte von über 90 % weisen auf in die Konstruktion eindringendes Wasser hin. So könnte eine Fehlstelle in der Dichtigkeitsebene im Bereich des Fensters das Vordringen von Schlagregen bis hin zum Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung den Eintritt von Meteorwasser ermöglichen. Entsprechend wurde zur Berücksichtigung dieser Undichtigkeit bei der Bauteileingabe der Süd-West Wand eine Feuchtequelle eingefügt (siehe Abbildung 64 und Abbildung 75). Diese fügt in der Simulation einen Anteil von 1.4 % des Schlagregens dem Material hinzu. Die Feuchtequelle ist gemäss Abbildung 64 im Mauerwerk in einer Tiefe von 18 cm bis 21 cm positioniert.



Abbildung 76: Rot: Vermutete Position der Undichtigkeit für den Eintritt des Schlagregens. Blau markiert ist der Bereich der installierten Messtechnik.

Betrachtet man den langfristigen Verlauf der Feuchte, ist (noch) keine Austrocknung der Wand feststellbar. Massgebend werden der Sommer 2017 und der Winter 2017/18 sein, um über die Entwicklung einer Trocknungstendenz abschliessend urteilen zu können.

8.2 Brüttelen

8.2.1 Legende Sensoranordnung

Wie beim Objekt in Aarwangen in Kapitel 8.1.1 sind in Abbildung 77 nochmals die Positionen und Benennungen der Sensoren für das Messobjekt in Brüttelen dargestellt.

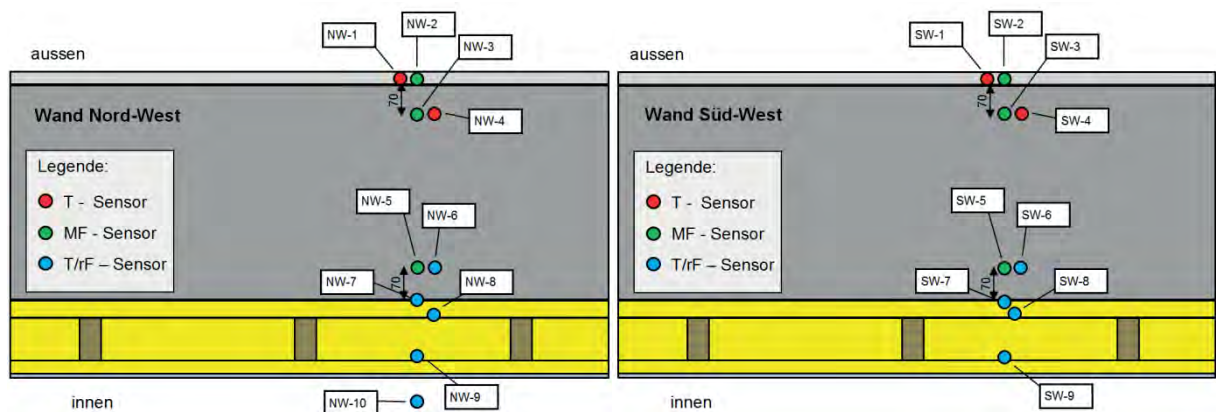


Abbildung 77: Sensoranordnung im Wandquerschnitt mit Bezeichnung der Sensoren für das Messobjekt Brüttelen.

8.2.2 Vergleich in situ Messungen und Simulation des Objektes in Brüttelen

Abbildung 78 zeigt einerseits den Vergleich der Temperaturverläufe der in situ Messungen (blau) und der Simulation mit WUFI Pro[®] (rot) und andererseits die Aussen- und Innenklimabedingungen (grau und schwarz). Für eine übersichtlichere Darstellung sind die stark fluktuierenden Klimabedingungen (Aussen- und Innenklima) geglättet dargestellt, d.h. es werden jeweils die Mittelwerte von Sequenzen abgebildet.

Abbildung 79 stellt die Differenz zwischen der gemessenen und der mit WUFI Pro[®] simulierten Temperatur als Balken dar. Positive Werte bedeuten, dass die berechnete Temperatur grösser als die gemessene Temperatur ist.

Ausserdem wird die gemittelte Differenz über alle Messwerte aufgetragen, die sich aus der Summe aller negativen und positiven Differenzen ergeben. Ist die gemittelte Differenz, positiv, so bedeutet dies, dass die simulierte Temperatur im Allgemeinen höher ausgefallen ist als die in situ gemessene Temperatur.

Dasselbe gilt für den Vergleich der relativen Feuchte der in situ Messungen (blau) und der Simulation mit WUFI Pro[®] (rot) in der Abbildung 80. Wiederum sind die stark fluktuierenden Klimabedingungen, Aussen- und Innenklima (grau und schwarz), für eine übersichtlichere Darstellung geglättet dargestellt, d.h. es werden jeweils die gleitenden Mittelwerte von gleich grossen Untermengen der ursprünglichen Datenpunktmenge abgebildet.

Die Abbildung 81 stellt die Differenz zwischen der gemessenen und der mit WUFI Pro[®] simulierten relativen Feuchten als Balken dar. So bedeutet auch hier eine positive gemittelte Differenz, dass die simulierte relative Feuchte im Allgemeinen höher liegt als die in situ gemessene relative Feuchte.



Nord-West Wand in Brüttelen:

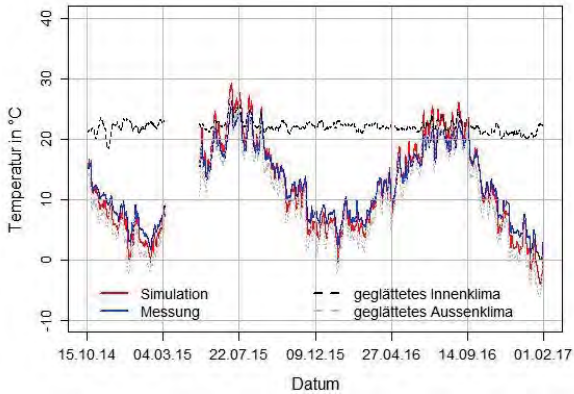


Abbildung 78: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.

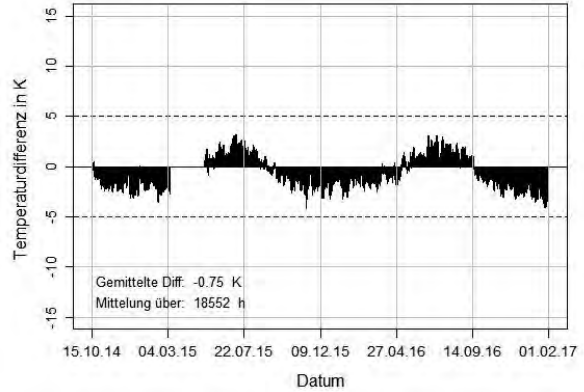


Abbildung 79: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.

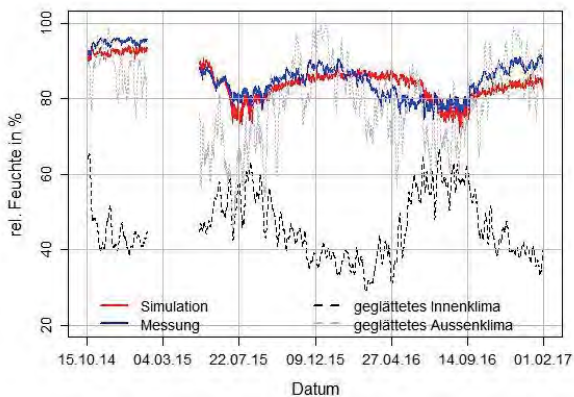


Abbildung 80: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.

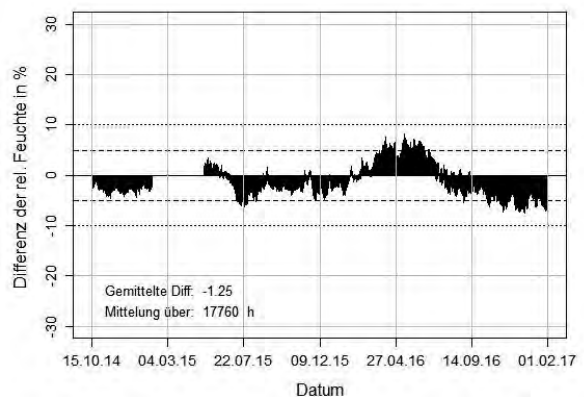


Abbildung 81: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.

Der Verlauf der simulierten Temperatur weicht nur geringfügig von der in situ gemessenen Temperatur mit einer mittleren Abweichung von (-0.8 ± 3.0) K ab.

Der Verlauf der simulierten relativen Feuchte stimmt mit einer mittleren Abweichung von (-1.3 ± 6.2) % über die ganze Messperiode gut mit den in situ Messungen überein. Die anfänglich erhöhte Feuchte von über 90 % konnte durch eine erhöhte Anfangsfeuchte, nicht aber durch die Verwendung einer Feuchtequelle, rekonstruiert werden. Diese erhöhte Feuchte kommt wahrscheinlich durch die Ausbetonierung der Kappendecke zustande, die kurz vor Einbau der Sensoren in dem dahinterliegenden Raum durchgeführt wurde und deren Auswirkung auf den Feuchtehaushalt in der Wand in absehbarer Zeit vermutlich nachlässt. Die Folge dieser erhöhten Anfangsfeuchte ist die langsame Zunahme und darauffolgenden Abnahme der simulierten relativen Feuchte im Jahr 2016, die aber nicht dem Verlauf der gemessenen relativen Feuchte entspricht. Betrachtet man den Verlauf der relativen Feuchte, ist (noch) keine Austrocknung der Wand feststellbar. Massgebend werden der Sommer 2017 und der Winter 2017/18 sein, um über die Entwicklung einer Tendenz abschliessend beurteilen zu können.

Abbildung 82 und Abbildung 84 zeigen einerseits den Vergleich der Temperaturverläufe, respektive den Vergleich der Verläufe der relativen Feuchte der in situ Messungen (blau) und der Simulation mit WUFI Pro[®] (rot) der Süd-West Wand in Brüttelen und andererseits die entsprechenden Aussen- und Innenklimabedingungen (grau und schwarz).

Abbildung 83 und Abbildung 85 stellen die Differenzen zwischen der gemessenen und der mit WUFI Pro[®] simulierten Temperatur, respektive der relativen Feuchte als Balken dar.

Süd-West Wand in Brüttelen:

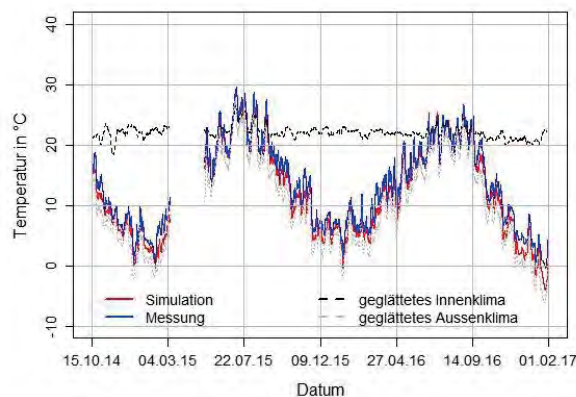


Abbildung 82: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.

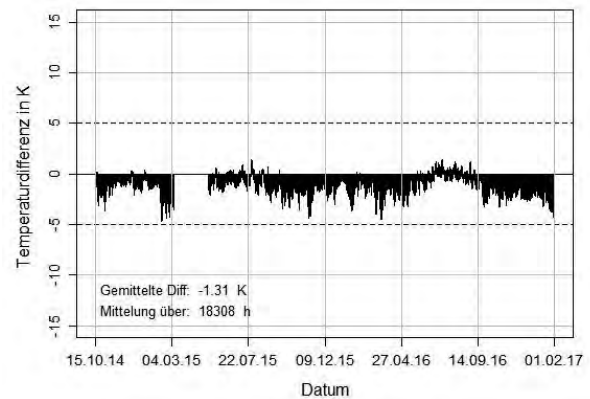


Abbildung 83: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.

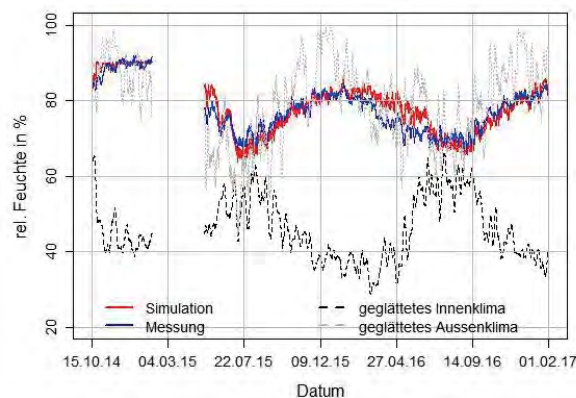


Abbildung 84: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.

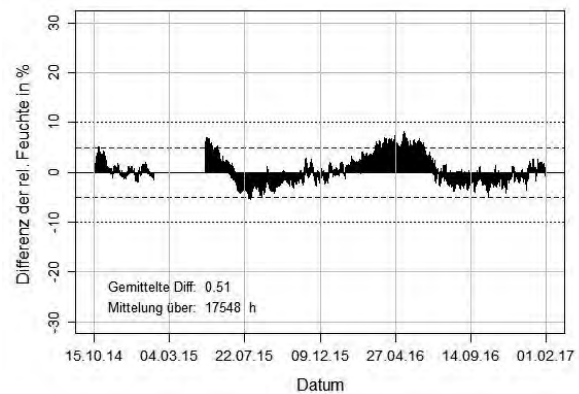


Abbildung 85: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.

Der Verlauf der simulierten Temperatur weicht nur geringfügig von der in situ gemessenen Temperatur mit einer mittleren Abweichung von (-1.3 ± 1.9) K ab.

Der Verlauf der simulierten relativen Feuchte stimmt mit einer mittleren Abweichung von (0.5 ± 5.2) % über die ganze Messperiode sehr gut mit den in situ Messungen überein. Da in der Süd-West Wand die Anfangsfeuchte relativ klein ist im Vergleich zur Nord-West Wand, musste diese nur minim für die Simulation angepasst werden. Somit hält sich der Effekt des Anstiegs und Abfalls der relativen Feuchte, wie bei der Nord-West Wand beschrieben, in Grenzen, was in der Abbildung 84 gut ersichtlich ist. Betrachtet man den Verlauf der Feuchte, ist noch keine Austrocknung der Wand feststellbar. Massgebend werden der Sommer 2017 und der Winter 2017/18 sein, um über die Entwicklung einer Tendenz abschliessend beurteilen zu können.

8.3 Bütschwil

8.3.1 Legende Sensoranordnung

Wie beim Objekt in Aarwangen in Kapitel 8.1.1 sind in Abbildung 86 nochmals die Positionen und Benennungen der Sensoren für das Messobjekt in Bütschwil dargestellt.

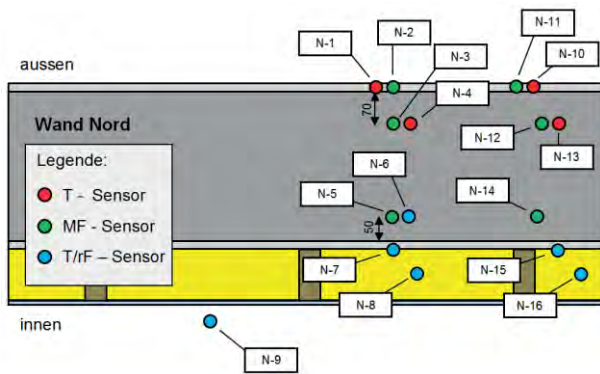


Abbildung 86: Sensoranordnung im Wandquerschnitt mit Bezeichnung der Sensoren für das Messobjekt Bütschwil.

8.3.2 Vergleich in situ Messungen und Simulation des Objektes in Bütschwil

Abbildung 87 zeigt einerseits den Vergleich der Temperaturverläufe der in situ Messungen (blau) und der Simulation mit WUFI Pro[®] (rot) und andererseits die Aussen- und Innenklimabedingungen (grau und schwarz). Für eine übersichtlichere Darstellung sind die stark fluktuierenden Klimabedingungen (Aussen- und Innenklima) geglättet dargestellt, d.h. es werden jeweils die gleitenden Mittelwerte von gleich großen Untermengen der ursprünglichen Datenpunktmenge abgebildet.

Abbildung 88 stellt die Differenz zwischen der gemessenen und der mit WUFI Pro[®] simulierten Temperatur als Balken dar. Positive Werte bedeuten, dass die berechnete Temperatur grösser als die gemessene Temperatur ist.

Ausserdem wird die gemittelte Differenz über alle Messwerte aufgetragen, die sich aus der Summe aller negativen und positiven Differenzen ergeben. Ist die gemittelte Differenz positiv, so bedeutet dies, dass die simulierte Temperatur höher ausgefallen ist als die in situ gemessene Temperatur.

Dasselbe gilt für den Vergleich der relativen Feuchte der in situ Messungen (blau) und der Simulation mit WUFI Pro[®] (rot) in der Abbildung 89. Wiederum sind die stark fluktuierenden Klimabedingungen, Aussen- und Innenklima (grau und schwarz), für eine übersichtlichere Darstellung geglättet dargestellt.

Die Abbildung 90 stellt die Differenz zwischen der gemessenen und der mit WUFI Pro[®] simulierten relativen Feuchten als Balken dar. So bedeutet auch hier eine positive gemittelte Differenz, dass die simulierte relative Feuchte im Allgemeinen höher liegt als die in situ gemessene relative Feuchte.

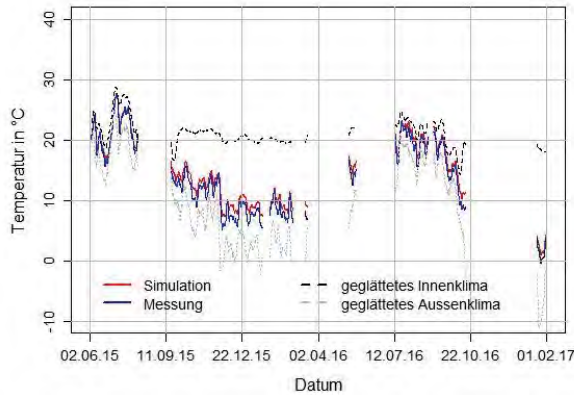


Abbildung 87: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.

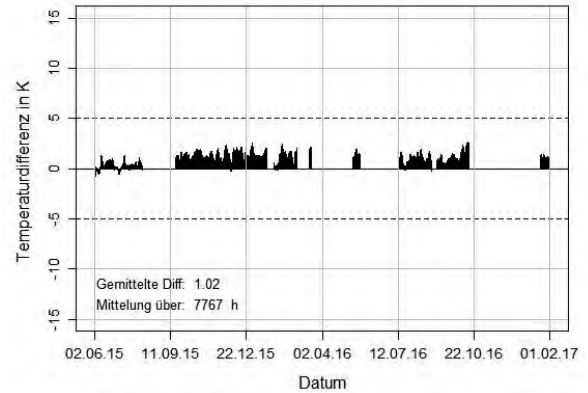


Abbildung 88: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.

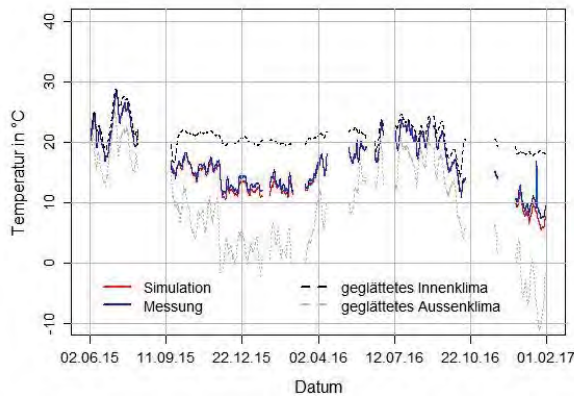


Abbildung 89: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.

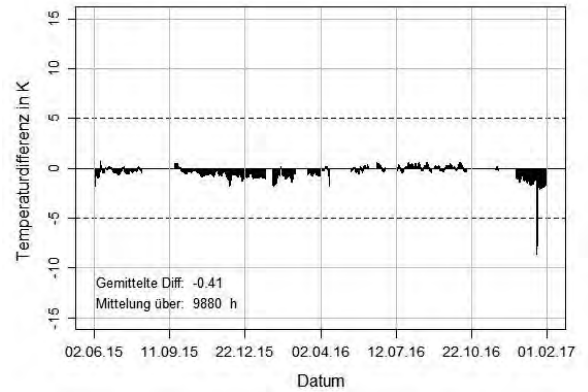


Abbildung 90: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.

Die Temperaturverläufe in Bütschwil sind mit Lücken durchzogen, die mit Ausfällen der Sensoren, wahrscheinlich aufgrund zu hoher Feuchtigkeit, begründet sind. Da vor allem die Übergangsschicht Mauerwerk/Wärmedämmung (N-7) davon betroffen ist, wird zur Kompensation zusätzlich der Messpunkt in der Wärmedämmung (N-8) analysiert. Um die Ausfälle zu minimieren, wurden im Januar 2017 die fehlerhaften Sensoren ausgetauscht.

Die Verläufe der simulierten Temperaturen in beiden Schichten weichen nur geringfügig von den in situ gemessenen Temperaturen mit einer mittleren Abweichung von (1 ± 1.2) K im Bereich des Übergangs Mauerwerk/Wärmedämmung und von (0.4 ± 1.1) K in der Innendämmung ab.

Der Austausch der Sensoren, respektive das Öffnen der Wand, ist in der Abbildung 89 und Abbildung 90 in Form eines Ausschlags der Messwerte gut ersichtlich.

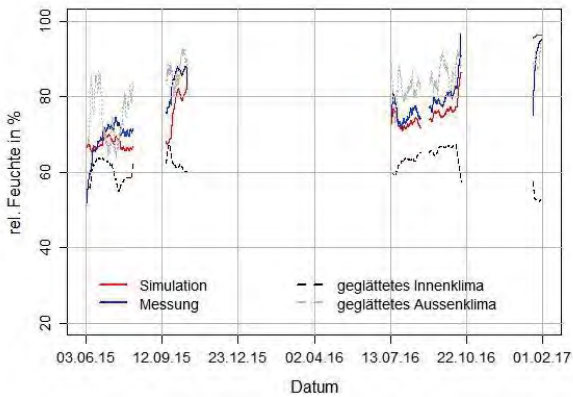


Abbildung 91: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.



Abbildung 92: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.

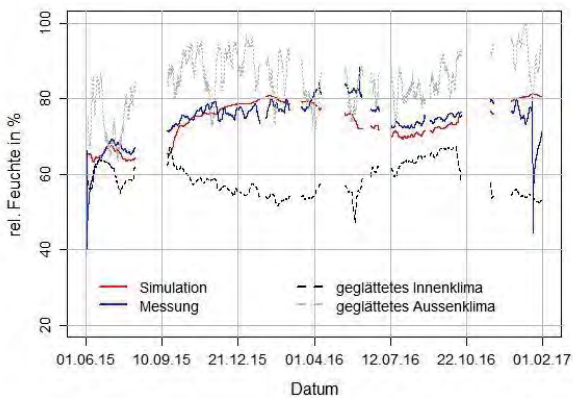


Abbildung 93: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.

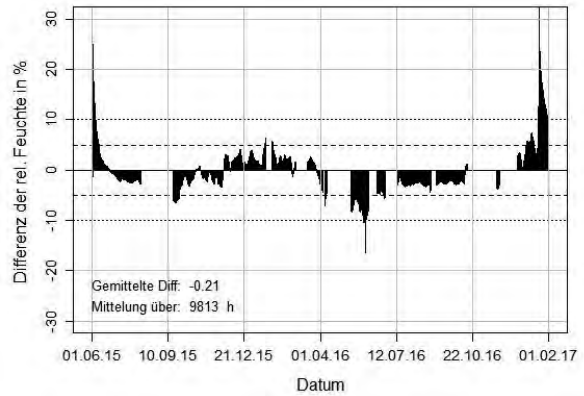


Abbildung 94: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.

Analog den Temperaturverläufen sind ebenfalls die Verläufe der relativen Feuchten in Bütschwil mit Lücken durchzogen. Im Fall der Übergangsschicht Mauerwerk/Dämmung (N-7) sind die Ausfälle noch markanter, da sich in den kalten Jahreszeiten Kondenswasser auf dem kalten Mauerwerk bildet.

Die Verläufe der simulierten relativen Feuchte in beiden Schichten stimmen mit einer mittleren Abweichung $(-2.5 \pm 8.2) \%$ im Bereich des Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung und von $(-0.2 \pm 9.2) \%$ in der Innendämmung sehr gut mit den in situ gemessenen relativen Feuchten überein.

In allen vier Abbildungen ist der Einbau der ganzen Messtechnik und der spätere Austausch der fehlerhaften Sensoren sehr gut sichtbar.

8.4 Differenzen zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur, resp. relativen Feuchte

Die Abbildung 95 bis Abbildung 100 zeigen die Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und simulierten Temperaturen, respektive die relativen Feuchten aller Messpositionen, Standorte sowie Wandausrichtungen. Zudem sind die arithmetischen Mittelwerte und die Anzahl analysierter Messwerte ersichtlich.

Das Kreuz (x) kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert, wohingegen die fetten horizontalen Balken in den Boxen den Median, respektive das 50 % Perzentil, darstellen. Die Boxen geben den Interquartilsabstand (IQR) an, also den Wertebereich, in dem sich die mittleren 50 % aller Daten befinden. Somit stellen die Unterkante der Boxen das 25 % Perzentil und die Oberkante das 75 % Perzentil, auch oberes und unteres Quantil genannt, dar. D.h. dass die kleinsten 25 % aller Messwerte unterhalb, respektive die grössten 25 % aller Messwerte oberhalb der Boxen liegen. Die Antennen (sog. Whiskers) kennzeichnen alle Werte, die innerhalb des 1,5-fachen des Interquartilsabstands liegen. Alle Werte ausserhalb der Grenzen dieser Antennen werden als Ausreisser bezeichnet und sind als Punkt (o) gekennzeichnet. Links oberhalb der Boxen ist zusätzlich die Anzahl (n) betrachteter Messwerte notiert.

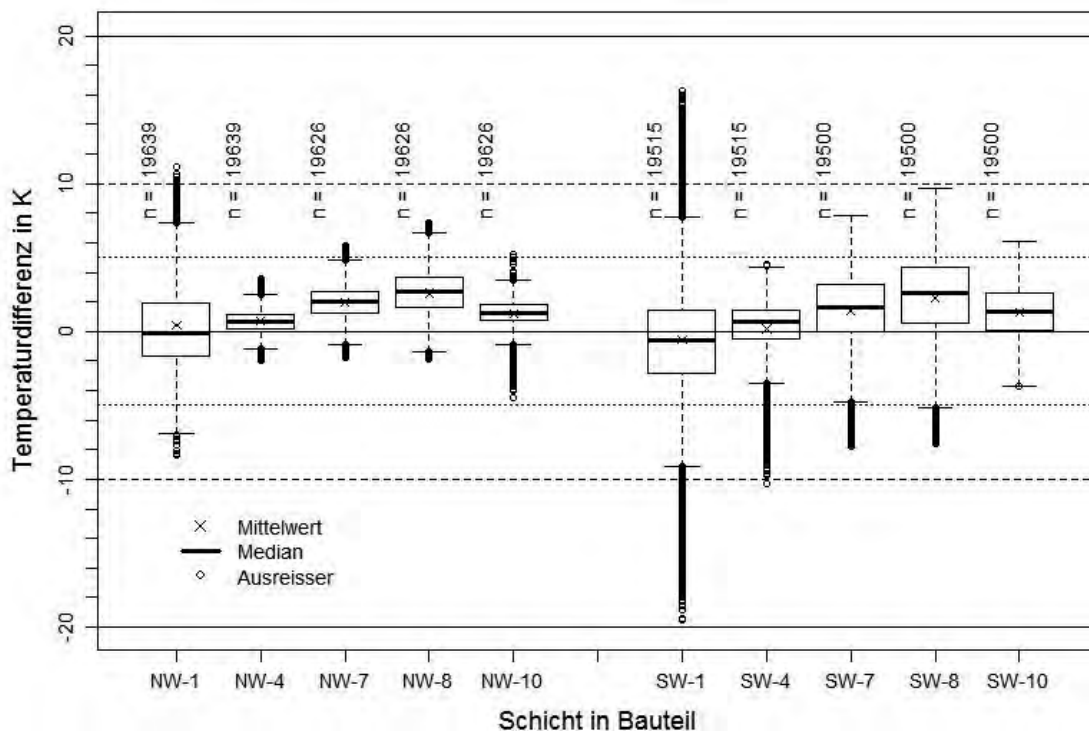


Abbildung 95: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten Temperaturen in Aarwangen sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.

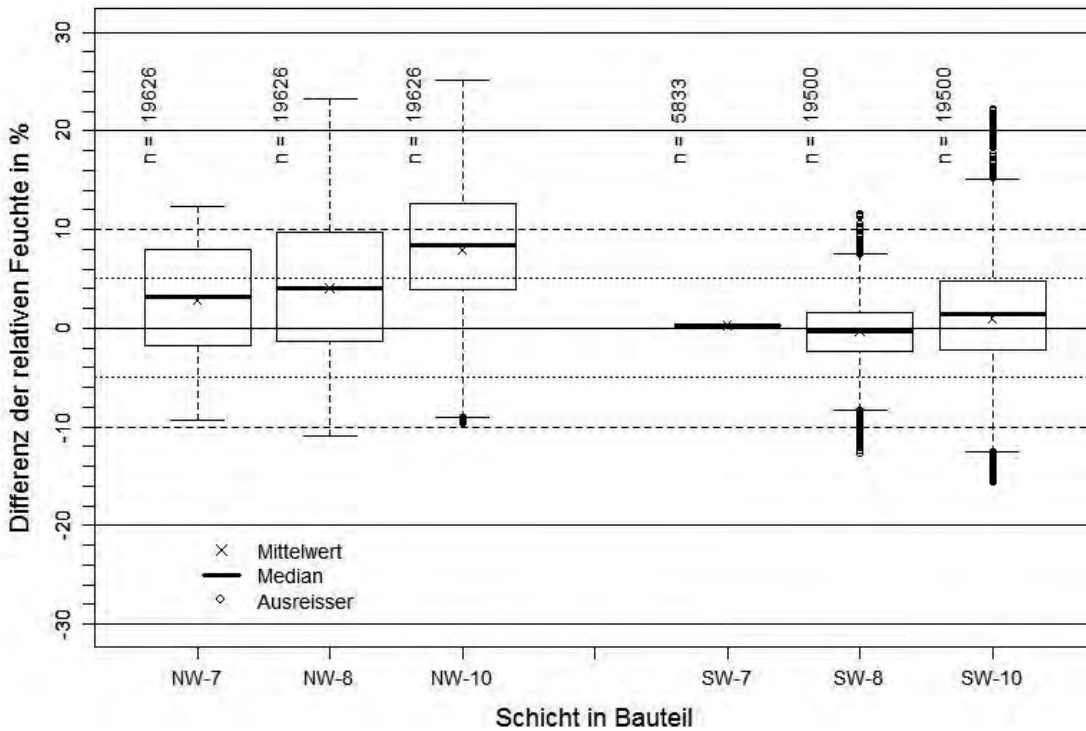


Abbildung 96: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten relativen Feuchten in Aarwangen sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.

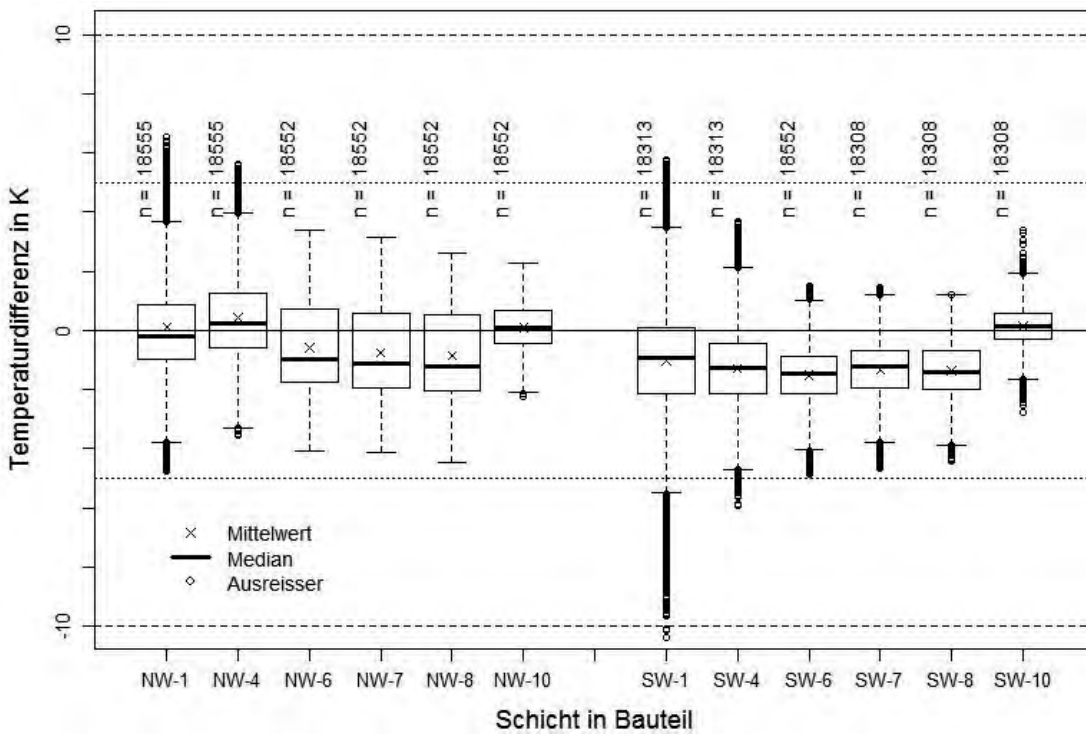


Abbildung 97: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten Temperaturen in Brüttelen sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.

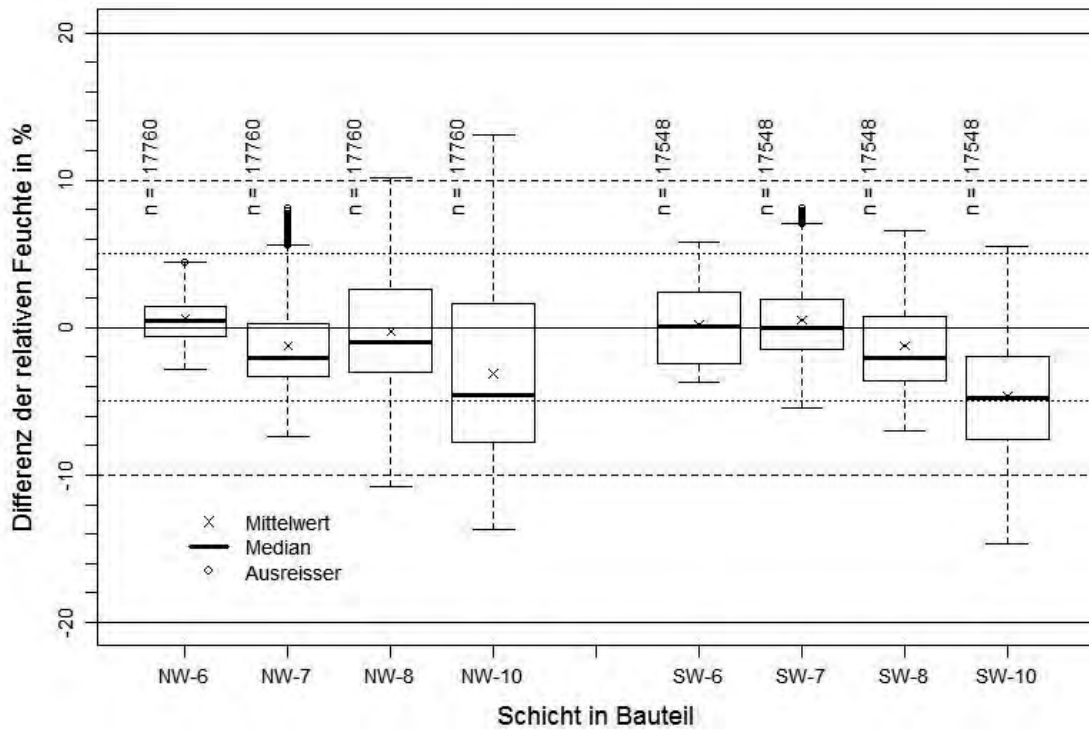


Abbildung 98: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten relativen Feuchten in Brüttelen sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.

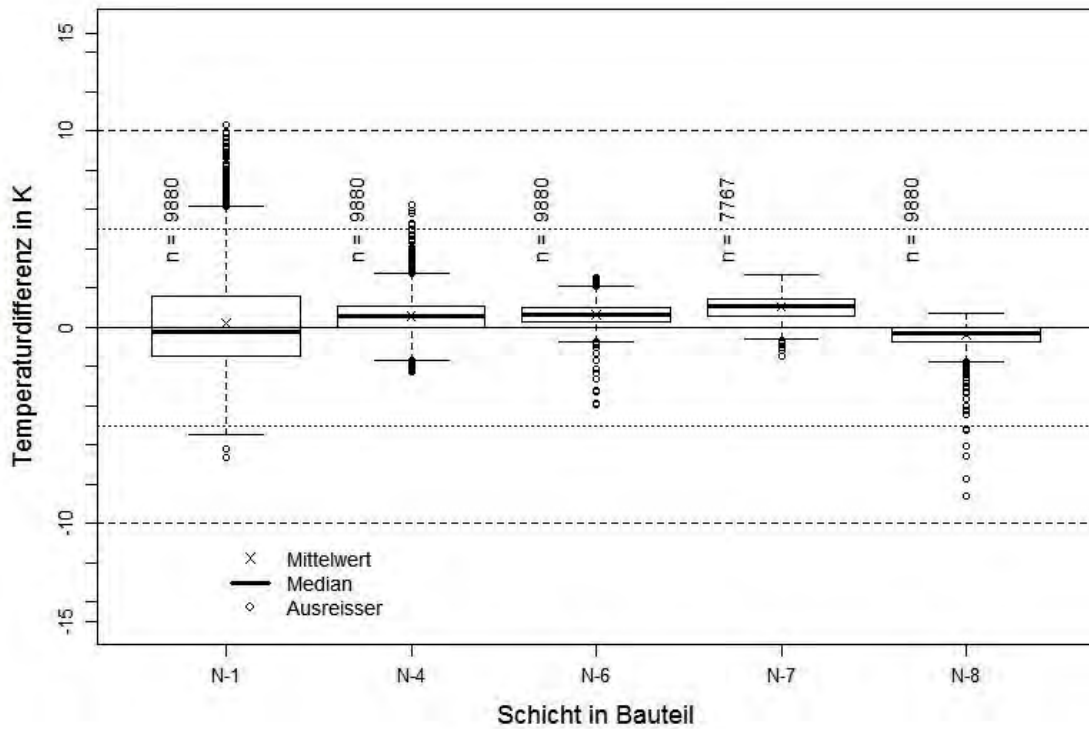


Abbildung 99: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten Temperaturen in Bütschwil sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.

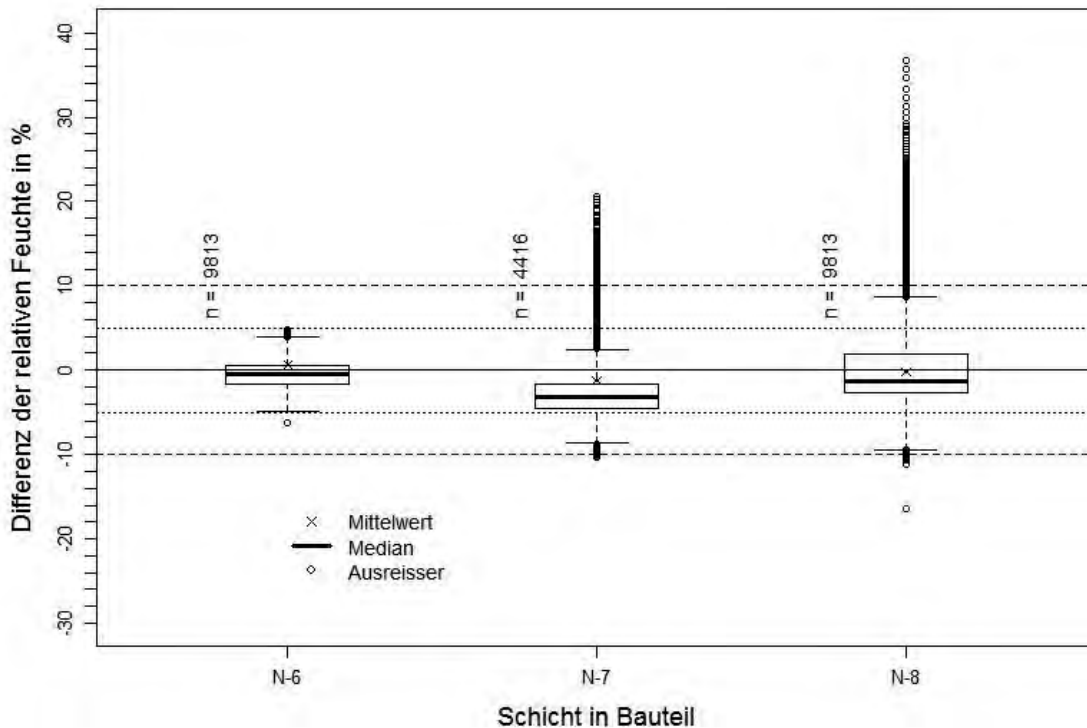


Abbildung 100: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten relativen Feuchten in Bütschwil sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.

In den obenstehenden Abbildungen ist gut ersichtlich, dass alle Differenzen um die Nulllinie streuen. Dabei fällt in der Abbildung 95 und Abbildung 97 auf, dass die Differenzen zwischen den gemessenen und simulierten Temperaturen der äussersten Schicht, also im Aussenputz, stärker streuen als jene der inneren Schichten sowie einen Unterschied in der Streuung zwischen der Nord-West und Süd-West Wand feststellbar ist. Dies liegt an der Ausrichtung der Wände. Die Aussenwände mit Süd-West Orientierung sind stärker den meteorologischen Bedingungen ausgesetzt, d.h. dem Schlagregen sowie der direkten Sonneneinstrahlung, und reagieren somit schneller und extremer mit Temperaturschwankungen. Kurzfristige und lokal unterschiedliche Temperaturschwankungen durch Sonneneinstrahlung oder Schlagregen weichen eher vom durch IDEweb gestellten Klimadatensatz für die Erstellung der Aussenklimafiles ab, was sich in den numerischen Berechnungen mit WUFI Pro[®] widerspiegelt. Die Fluktuationen sind ebenfalls bei einer direkten Gegenüberstellung der Verläufe der Temperatur und der relativen Feuchte in den Aussenputzen erkennbar (siehe Anhang G1 und G2).

Die Abbildung 96 beinhaltet einen Boxplot mit sehr kleiner Streuung. Hierbei handelt es sich um die Übergangsschicht Mauerwerk/Wärmedämmung der Süd-West Wand in Aarwangen (SW-7). Der Sensor an besagter Position ist bereits nach kurzer Zeit ausgefallen, weshalb nur eine geringe Anzahl Messwerte analysiert werden konnten. Entsprechend fällt eine kleine Streuung, respektive minimale Abweichung des simulierten vom gemessenen Verlauf der relativen Feuchte, aus.

Die extremen Ausreisser der Schicht N-8 in der Abbildung 100 sind auf den Sensortausch zurückzuführen. Durch das Öffnen der Wand und das Wechseln des isofloc-Flockenmaterials änderten sich ebenfalls die wärme- und feuchtetechnischen Bedingungen im Bauteil, was eine Änderung der Kurvenverläufe der in situ Messungen nach sich zog (siehe Abbildung 89, Abbildung 91 und Abbildung 93). Dieser einmalige konstruktive Eingriff in das Bauteil konnte mit dem Simulationsprogramm nicht berücksichtigt werden.

Die untenstehenden Tabelle 52 und Tabelle 53 zeigen die zuvor graphisch dargestellten gemittelten Differenzen zwischen den gemessenen und simulierten Temperaturen, respektive relativen Feuchten aller Messpositionen, Standorte sowie Wandausrichtungen in tabellarischer Form. Zudem sind das 95 % Konfidenzintervall, die Standardabweichung, Anzahl verfügbarer Messwerte sowie die grösste und kleinste Differenz angegeben.

Tabelle 52: Gemittelte Differenzen zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur sowie die zugehörigen 95 % Konfidenzintervalle. Alle Temperaturen sind in K angegeben.

Standort	AR.	Bez.	\bar{x}	dww	σ	n	$z_{0,975}$	max	min
Aarwangen	NW	NW-1	0.4	± 6.04	3.08	19'639	1.96	11.16	-8.36
		NW-4	0.7	± 1.54	0.78	19'639	1.96	3.57	-1.98
		NW-7	2.0	± 2.17	1.11	19'626	1.96	5.76	-1.76
		NW-8	2.6	± 2.84	1.45	19'626	1.96	7.4	-1.88
		NW-9	1.2	± 1.87	0.96	19'626	1.96	5.25	-4.53
	SW	SW-1	-0.5	± 9.02	4.6	19'515	1.96	16.28	-19.49
		SW-4	0.2	± 3.85	1.96	19'515	1.96	4.5	-10.3
		SW-7	1.4	± 4.86	2.48	19'500	1.96	7.87	-7.82
		SW-8	2.2	± 5.52	2.82	19'500	1.96	9.68	-7.55
		SW-10	1.3	± 3.29	1.68	19'500	1.96	6.07	-3.7
Brüttelen	NW	NW-1	0.1	± 3.30	1.68	18'555	1.96	6.55	-4.74
		NW-4	0.4	± 2.87	1.46	18'555	1.96	5.6	-3.57
		NW-6	-0.6	± 3.03	1.54	18'552	1.96	3.39	-4.1
		NW-7	-0.8	± 3.04	1.55	18'552	1.96	3.16	-4.12
		NW-8	-0.9	± 2.93	1.5	18'552	1.96	2.59	-4.47
		NW-10	0.1	± 1.43	0.73	18'552	1.96	2.25	-2.26
	SW	SW-1	-1.0	± 3.84	1.96	18'313	1.96	5.75	-10.38
		SW-4	-1.3	± 2.69	1.37	18'313	1.96	3.69	-5.92
		SW-6	-1.5	± 1.99	1.01	18'308	1.96	1.47	-4.88
		SW-7	-1.3	± 1.89	0.96	18'308	1.96	1.47	-4.65
		SW-8	-1.4	± 1.86	0.95	18'308	1.96	1.21	-4.42
Bütschwil	N	N-1	0.2	± 4.70	2.40	9'880	1.96	10.39	-6.66
		N-4	0.6	± 1.81	0.92	9'880	1.96	6.21	-2.26
		N-6	0.6	± 1.01	0.52	9'880	1.96	2.5	-3.6
		N-7	1.0	± 1.19	0.61	7'767	1.96	2.67	-1.48
		N-8	-0.4	± 1.10	0.56	9'880	1.96	0.71	-8.61

AR. = Ausrichtung der untersuchten Wand

Bez. = Bezeichnung des Sensors

\bar{x} = Mittelwert der Differenz in K

dww = 95 % Konfidenzintervall

σ = Standardabweichung in K

n = Anzahl Messwerte

$z_{0,975}$ = 97.5 % – Quantil für einen zweiseitigen Vertrauensbereich von P = 0.95

max = Grösste Differenz in K

min = Kleinste Differenz in K

NW = Nord – West

SW = Süd – West

N = Nord



Tabelle 53: Gemittelte Differenzen zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte sowie die zugehörigen 95 % Konfidenzintervalle. Die relativen Temperaturen sind in % r. F. angegeben.

Standort	AR.	Bez.	\bar{x}	dww	σ	n	$z_{0,975}$	max	min
Aarwangen	NW	NW-7	2.8	± 11.08	5.65	19'626	1.96	12.34	-9.38
		NW-8	4.1	± 12.74	6.50	19'626	1.96	23.26	-10.94
		NW-9	7.9	± 11.71	5.98	19'626	1.96	25.08	-9.59
	SW	SW-7	0.2	± 4.37	2.23	5'833	1.96	3.52	-5.53
		SW-8	-0.4	± 5.74	2.93	19'500	1.96	11.66	-12.71
		SW-10	1.0	± 10.79	5.51	19'500	1.96	22.16	-15.58
Brüttelen	NW	NW-6	0.6	± 3.45	1.76	17'760	1.96	4.48	-2.86
		NW-7	-1.3	± 6.21	3.17	17'760	1.96	8.12	-7.4
		NW-8	-0.3	± 7.94	4.05	17'760	1.96	10.17	-10.8
		NW-10	-3.1	± 11.48	5.86	17'760	1.96	13.11	-13.69
	SW	SW-6	0.2	± 5.13	2.62	17'548	1.96	5.81	-3.72
		SW-7	0.5	± 5.19	2.65	17'548	1.96	8.11	-5.42
		SW-8	-1.2	± 5.90	3.01	17'548	1.96	6.59	-6.97
		SW-9	-4.6	± 7.39	3.77	17'548	1.96	5.48	-14.66
Bütschwil	N	N-6	-0.5	± 3.48	1.77	9'813	1.96	4.81	-6.21
		N-7	-2.5	± 8.15	4.16	4'416	1.96	20.52	-10.36
		N-8	-0.2	± 9.18	4.68	9'813	1.96	36.73	-16.46

AR. = Ausrichtung der untersuchten Wand
 Bez. = Bezeichnung des Sensors
 \bar{x} = Mittelwert der Differenz in %
 dww = 95 % Konfidenzintervall
 σ = Standardabweichung in %
 n = Anzahl Messwerte
 $z_{0,975}$ = 97.5 % – Quantil für einen zweiseitigen Vertrauensbereich von P = 0.95
 max = Grösste Differenz in %
 min = Kleinste Differenz in %
 NW = Nord – West
 SW = Süd – West
 N = Nord

Wie bereits in der Abbildung 100 ist der Sensortausch ebenfalls in der Tabelle 53 in Form von sehr hohen Differenzen (siehe Spalte «max» und die untersten zwei Zeilen) erkennbar.

Die Gegenüberstellung der Tabellen zeigt, wie bereits die Boxplots, deutlich grössere 95 % Konfidenzintervalle, aber auch extremere Maximal- und Minimalwerte für die relativen Feuchte. Offensichtlich kann der Feuchtetransport in einem Bruchsteinmauerwerk in einem eindimensionalen Simulationsprogramm nicht so einfach dargestellt werden, wie der Temperaturverlauf.

Zudem ist ersichtlich, dass für den Standort Bütschwil auf deutlich weniger Messwerte zurückgegriffen werden konnte, als bei den zwei anderen Standorten, Aarwangen und Brüttelen. Diese Tatsache ist den immer wiederkehrenden Sensorausfällen aber auch dem späteren Messstart zuzuschreiben.



9 Fazit und Ausblick

Die numerischen Reproduktionen der Temperaturen in den einzelnen Bauteilschichten an den verschiedenen Standorten, Aarwangen, Brüttelen und Bütschwil passen sehr gut mit den in situ gemessenen Temperaturverläufen überein. Die mittleren Abweichungen in der sensibelsten Bauteilschicht, also in der Übergangsschicht Mauerwerk/Wärmedämmung, betragen in Aarwangen in der Nord-West Wand (2.6 ± 2.8) K, in der Süd-West Wand (2.2 ± 5.5) K, in der Nord-West Wand in Brüttelen (-0.8 ± 3.0) K und in der Süd-West Wand (-1.3 ± 1.9) K sowie in der Nordwand in Bütschwil (1 ± 1.2) K.

Grundsätzlich weichen auch die simulierten relativen Feuchten von den vor Ort gemessenen Werte um (4.1 ± 13) % r. F. in der Nord-West Wand und (-0.4 ± 5.7) % r. F. in der Süd-West Wand in Aarwangen, um (-1.3 ± 6.2) % r. F. in der Nord-West Wand und (0.5 ± 5.2) % r. F. in der Süd-West Wand in Brüttelen sowie um (-2.5 ± 8.2) % r. F. in der Nordwand in Bütschwil nur geringfügig von den Messwerten ab.

Es wird zur Diskussion gestellt, ob diese Abweichungen bzw. die Abweichungen plus deren Streuung nicht zukünftig als Sicherheitszuschlag bei der Beurteilung von Simulationsergebnissen herangezogen werden sollten.

Bei genauerer Betrachtung der verschiedenen Schichten in Kapitel 8 wird jedoch ersichtlich, dass die Abweichungen der relativen Feuchten wesentlich grösser sind als bei den Temperaturen. Dies obwohl manuelle Materialanpassungen (Flüssigtransportkoeffizienten) des Mauerwerkdatensatzes zur Berücksichtigung des Fugenanteils vorgenommen und andererseits hohe Einbaufeuchten und Undichtigkeiten in der Luftdichtheitsebene mit erhöhten Anfangsfeuchten und Feuchtequellen berücksichtigt wurden. So konnten die hohen gemessenen relativen Feuchten in der Schicht im Bereich des Übergangs Mauerwerk/Wärmedämmung in der Nord-West Wand in Aarwangen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eindringenden Schlagregen im Fenstersimsbereich zurückgeführt und mit Hilfe einer Feuchtequelle berücksichtigt werden. Zudem verursachte in Aarwangen wahrscheinlich die Einbaufeuchte der Mauerwerkergänzungen eine erhöhte Anfangsfeuchte der Wandschichten, die über die erhöhte Anfangsfeuchtegehalte in der Simulation angenähert wurden. Aber auch der Feuchtestrom durch das Bauteil, respektive durch das Mauerwerk musste durch Materialanpassungen während der Simulation berücksichtigt werden. So wurde versucht, den Feuchtetransport über die Fugen der Wand zu berücksichtigen. Diese Anpassungen wurden nötig, da bei den Materialmessungen im Labor des IBP nur die feuchtetechnischen Kennwerte des Gesteins selbst, nicht aber des zugehörigen Mörtels gemessen wurden. Ausserdem kann nur so mit dem eindimensionalen Programm WUFI Pro[®] der Fugenanteil berücksichtigt werden. Allerdings erfolgte diese Anpassung der Materialdaten für jeden Aufbau individuell. Es war nicht möglich, hieraus allgemeingültige Konstruktionsregeln zur Anpassung der Materialkennwerte des Mauerwerks aus den individuellen Materialkennwerten für Stein und Mörtel abzuleiten. Dies bleibt künftigen Forschungsvorhaben vorbehalten. Es sollte dann auch überprüft werden, inwieweit Simulationen mit zweidimensionalen Programmen, wie wufi 2D die Messdaten besser reproduzieren.

Die anfänglich hohen relativen Feuchten in den Bauteilen in Brüttelen sind wahrscheinlich der Ausbetonierung der Kappendecke zuzuschreiben und konnten nur über entsprechend angepasste Anfangsbedingungen in der Simulation berücksichtigt werden. Diese Anpassung hat zur Folge, dass die berechneten Werte der relativen Feuchte im Winter 15/16 länger auf einem höheren Niveau verbleiben, als dies bei den in situ Messungen der Fall ist. Dieser Effekt schlägt sich in einer grösseren Streuung der Differenzen zwischen der Simulation und den gemessenen relativen Feuchten nieder.

Die Ausfälle der Messsensoren in der Übergangsschicht Mauerwerk/Wärmedämmung in Bütschwil lassen nur bedingt einen Vergleich zwischen der simulierten und gemessenen relativen Feuchte zu. Die Öffnung des Bauteils und den Austausch der Sensoren zeigten, dass die Ausfälle höchstwahrscheinlich von erhöhten relativen Feuchten herrühren, die in den kalten Monaten ein besonders hohes Niveau erreichen. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass bei diesem Wandaufbau bewusst auf eine Dampfbremse verzichtet wurde, um die Robustheit des sorptionsfähigen und feuchteausgleichenden Dämmmaterials zu prüfen. Diese langfristige Entwicklung der Feuchtegehalte ist bei der Betrachtung

der wenigen zur Verfügung stehenden Messwerte noch nicht abschliessend zu beurteilen. Daher werden über das Projektende hinaus die Messungen fortgesetzt, um langfristige Entwicklungen ggf. feststellen zu können.

Die Messung der Feuchtegehalte in den Materialien mit der Widerstandsmethode ergab keine sinnvollen Messwerte der Materialfeuchte. Zum einen ergeben sich für verschiedene Materialproben sehr unterschiedliche Widerstandswerte. Zum anderen ergibt die Anwendung der Widerstands Isothermen, also die Umrechnung des Widerstandes in die relative Feuchte in den Bauteilschichten, in den Simulationen keine zufriedenstellende Reproduktion der Messwerte. Abbildung 101 zeigt den Vergleich der Messergebnisse der relativen Feuchte im Mauerwerk der Nordwestwand in Aarwangen mit den Simulationsergebnissen mit dem Programm WUFI Pro[®]. Die blaue Kurve stellt die Messwerte dar. Die rote Kurve wurde mit Hilfe von Messsensoren, welche die Temperatur und die relative Feuchte messen, mit WUFI Pro[®] erzeugt. Die grüne Kurve wurde auf der Grundlage der Widerstandsmessungen des Mauerwerks berechnet. Es ist deutlich zu sehen, dass es keine zufriedenstellende Übereinstimmung dieser Rechenwerte mit den Messwerten aus Widerstandsmessungen gibt.

Daher muss die Widerstandsmessmethode in zukünftigen Forschungsprojekten weiter untersucht und ggf. so weiterentwickelt werden, dass sie auch in Bruchsteinmauerwerk einsetzbar wird.

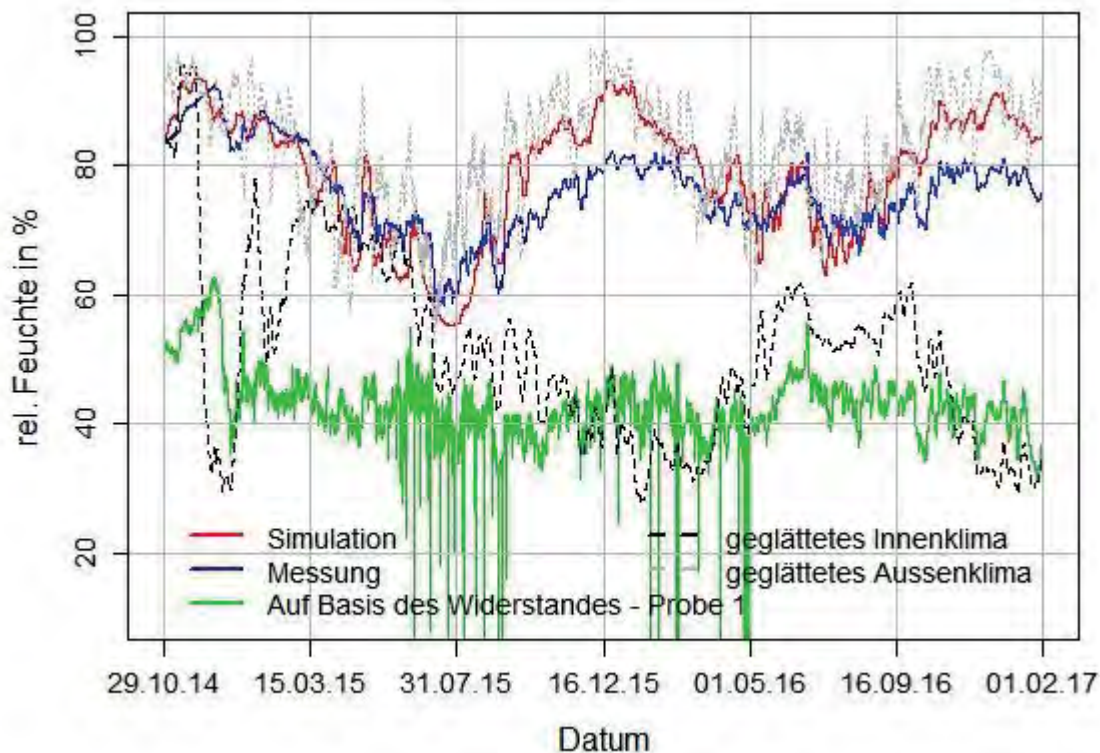


Abbildung 101: Umrechnung des gemessenen Widerstands im Mauerwerk der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen in die relative Feuchte mit Hilfe der Regressionsfunktion der Probe 1 des Mauerwerks und Vergleich mit den gemessenen und simulierten relativen Feuchten.

Besonders wird zu klären sein, ob die Abweichungen durch Inhomogenität des untersuchten Mauerwerks, auf den Einfluss des Fugenanteils und damit des Mörtels, oder auf Fehler der Messmethode zurückzuführen sind.

Abschliessend kann gesagt werden, dass die wärme- und feuchtetechnischen Bedingungen in historischen Aussenwänden mit nachträglich eingebauter innenliegenden Wärmedämmung in der sensiblen Schicht zwischen Mauerwerk und Wärmedämmung mit entsprechendem Aufwand und Kenntnissen gut mit numerischen Programmen reproduziert werden können. Die Ergebnisse begründen die



Annahme, dass der Einsatz innenliegender Wärmedämmung als denkmalgerechte Sanierungsmöglichkeit eine robuste Sanierungsart darstellt, auch bei anfänglich hohen relativen Feuchten.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, wie wichtig das Verhindern von zusätzlichen Wassereinträgen in innenliegende Wärmedämmsysteme durch bauliche Massnahmen für das Funktionieren dieser Sanierungsmassnahmen ist. So müssen Wassereinträge durch Undichtigkeiten der Fassade, Feuchtetransport durch Konvektion und durch Wasserdampfdiffusion durch entsprechende bauliche Massnahmen wie ein wetterdichte Fassade, eine funktionsfähige Luftdichtheitsschicht und eine Dampfbremse verhindert werden.

10 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für Holzbau, Tragwerke und Architektur und des Projektverantwortlichen gültig.

Verfasser

Federico Gariglio

Projektverantwortlicher

Prof. Dr. Christoph Geyer

Institutsleiter

Prof. Andreas Müller

10.1 Umfang des Berichts

Dieser Bericht besteht aus 201 Seiten inkl. Anhang.



11 Verzeichnisse

11.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die verwendete Messtechnik und ihre Funktion.	13
Tabelle 2: Steckbrief Messobjekt Aarwangen.	19
Tabelle 3: Sanierter Wandaufbau von aussen nach innen im Messobjekt Aarwangen.	21
Tabelle 4: Art und Anzahl der verwendeten Messtechnik am Messobjekt Aarwangen.	22
Tabelle 5: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 16 für die Südwestwand.	24
Tabelle 6: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 17 für Nordwestwand.	25
Tabelle 7: Steckbrief Messobjekt Brüttelen.	29
Tabelle 8: Sanierter Wandaufbau von aussen nach innen im Messobjekt Brüttelen.	30
Tabelle 9: Art und Anzahl der verwendeten Messtechnik am Messobjekt Brüttelen.	31
Tabelle 10: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 37 für Südwestwand.	33
Tabelle 11: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 38 für Nordwestwand.	34
Tabelle 12: Steckbrief Messobjekt Bütschwil.	36
Tabelle 13: Sanierter Wandaufbau von aussen nach innen im Messobjekt Bütschwil.	37
Tabelle 14: Art und Anzahl der verwendeten Messtechnik am Messobjekt Bütschwil.	38
Tabelle 15: Beschreibung Sensoranordnung zu Abbildung 51 für Nordwand.	40
Tabelle 16: Bezeichnung der gemessenen Materialien im Labor der BFH.	43
Tabelle 17: Widerstände der untersuchten Materialien Mk bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 30 %. Hier existiert nur ein Messwert, weshalb auch keine Fehlerrechnung möglich war.	44
Tabelle 18: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien Mk bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 40 %.	44
Tabelle 19: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien Mk bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 50 %.	45
Tabelle 20: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien Mk bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 60 %.	45
Tabelle 21: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien Mk bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 70 %.	46
Tabelle 22: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien Mk bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 80 %.	46
Tabelle 23: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien Mk bei einer Temperatur von 30 ° C und einer relativen Feuchte von 90 %.	47
Tabelle 24: Widerstände und deren 95 % Konfidenzintervalle der untersuchten Materialien Mk bei Raumtemperatur und einer relativen Feuchte von 100 %, respektive Wassersättigung.	47
Tabelle 25: Gemessene Massen m der Materialien Mk bei einer Temperatur von 30 ° C (der Index <i>i</i> bezeichnet die relative Feuchte in %-r. F.) sowie das gemittelte Volumen mit dem 95 % Konfidenzintervall.	48
Tabelle 26: Aus Masse m und Volumen V ermittelte Rohdichte ρ im Darrzustand sowie bei relativen Feuchten von 60 % und 70 %.	49
Tabelle 27: Aus Masse m und Volumen V ermittelte Rohdichte ρ bei relativen Feuchten von 80 % und 90 % sowie bei Wassersättigung.	49
Tabelle 28: Wassergehalt w bei verschiedenen relativen Feuchten.	49



Tabelle 29: Am IBP gemessene feuchtetechnische Materialkennwerte des Mauerwerks in Aarwangen.	51
Tabelle 30: Am IBP gemessene feuchtetechnische Materialkennwerte des Aussenputzes in Aarwangen.	52
Tabelle 31: Am IBP gemessene feuchtetechnische Materialkennwerte des Mauerwerks in Brüttelen.	53
Tabelle 32: Koeffizienten $a_1 \dots 3$ der im Labor der BFH untersuchten Materialien M_k	56
Tabelle 33: Koeffizienten $b_1 \dots 3$ der Regressionsfunktionen auf Basis der internen Feuchtespeicherfunktion und den Messwerten des IBP.	61
Tabelle 34: Koeffizienten $b_1 \dots 3$ der Regressionsfunktionen aller untersuchten Materialien auf Basis der internen Feuchtespeicherfunktion und den Messwerten aus dem Labor der BFH.	61
Tabelle 35: Details für die ausgewählten Wetterstationen zu den in situ Messobjekten.	65
Tabelle 36: Tabellarische Darstellung des Wandaufbaus in Aarwangen mit den wärme- und feuchtetechnischen Kennwerten der Bauteilschichten.	67
Tabelle 37: Materialkennwerte des neu erstellten Materials, Aussenputz mit Farbe, des Objekts in Aarwangen für die Simulation mit WUFI Pro°.	68
Tabelle 38: Materialkennwerte des neu erstellten Materials, Hochlochziegel im Verbund, des Objekts in Aarwangen für die Simulation mit WUFI Pro°.	69
Tabelle 39: Materialkennwerte des angepassten Materials, FERMACELL Gipsfaser-Platte, des Objekts in Aarwangen für die Simulation mit WUFI Pro°.	69
Tabelle 40: Auflistung der Monitorpositionen für die WUFI Pro°-Simulation des Objekts in Aarwangen.	70
Tabelle 41: Tabellarische Darstellung des Wandaufbaus in Brüttelen mit den Wärme- und feuchtetechnischen Kennwerten der Bauteilschichten.	71
Tabelle 42: Materialkennwerte des neu erstellten Materials, Hochlochziegel im Verbund, des Objekts in Brüttelen für die Simulation mit WUFI Pro°.	72
Tabelle 43: Materialkennwerte des angepassten Materials, Zementputz, des Objekts in Brüttelen für die Simulation mit WUFI Pro°.	73
Tabelle 44: Materialkennwerte des angepassten Materials, FERMACELL Gipsfaser-Platte, des Objekts in Brüttelen für die Simulation mit WUFI Pro°.	73
Tabelle 45: Auflistung der Monitorpositionen für die WUFI Pro°-Simulation des Objekts in Brüttelen.	74
Tabelle 46: Tabellarische Darstellung des Wandaufbaus in Bütschwil mit den wärme- und feuchtetechnischen Kennwerten der Bauteilschichten.	75
Tabelle 47: Materialkennwerte des angepassten Materials, Isofloc LM - PDB, des Objekts in Bütschwil für die Simulation mit WUFI Pro°.	75
Tabelle 48: Materialkennwerte des angepassten Materials, FERMACELL Gipsfaser-Platte, des Objekts in Bütschwil für die Simulation mit WUFI Pro°.	76
Tabelle 49: Auflistung der Monitorpositionen für die WUFI Pro°-Simulation und für die Messungen des Objekts in Bütschwil.	76
Tabelle 50: Verwendete Oberflächenübergangskoeffizienten der untersuchten Standorte.	77
Tabelle 51: Für die WUFI Pro°-Simulationen verwendeten Anfangsfeuchten und -Temperaturen, sowie der Start des Berechnungszeitraums.	78
Tabelle 52: Gemittelte Differenzen zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur sowie die zugehörigen 95 % Konfidenzintervalle. Alle Temperaturen sind in K angegeben.	93
Tabelle 53: Gemittelte Differenzen zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte sowie die zugehörigen 95 % Konfidenzintervalle. Die relativen Temperaturen sind in % r. F. angegeben.	94



Tabelle 54: Volumenmessung durch Wasserverdrängung. Mittelwerte, Fehler und 95 % Konfidenzintervall.....	136
--	-----

11.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 8-fach Erweiterungsmodul, Messleitung und Elektroden zur Messung der Materialfeuchte in Putz und Mauerwerk.....	14
Abbildung 2: Gerät zur Datenspeicherung.....	15
Abbildung 3: 4-fach Erweiterungsmodul mit angeschlossenem Thermo-Hygro-Sensor ohne Kabelverlängerung.....	15
Abbildung 4: Thermo-Hygro-Sensor mit Kabelverlängerung.....	16
Abbildung 5: Temperatursensor.....	16
Abbildung 6: Gerät zur Datenfernübertragung mit Batteriepack.....	16
Abbildung 7: Anschlussmöglichkeiten für Sensoren.....	16
Abbildung 8: Vogelperspektive Gebäudekomplex Aarwangen mit Messobjekt Wohnhaus (grün). Bild aus Google Earth aufgerufen am 24. November 2014.....	19
Abbildung 9: Ansicht Südwestwand des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen.....	20
Abbildung 10: Ansicht Nordwestwand des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen.....	20
Abbildung 11: Ansicht der Westecke des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen, an die links die nach Nordwest orientierte Wand anschliesst.....	20
Abbildung 12: Ansicht Westecke des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen, an die links die nach Südwest orientierte Wand anschliesst.....	20
Abbildung 13: Einbauorte der Sensoren für das Messobjekte Aarwangen. Blau: Nordwestwand. Rot: Südwestwand. Bild aus Google Earth aufgerufen am 20. November 2014.....	23
Abbildung 14: Detailansicht der Nordwestwand des Objekts in Aarwangen und Einbauort der Sensoren (Blau).....	23
Abbildung 15: Detailansicht der Südwestwand des Objekts in Aarwangen und Einbauort der Sensoren (Rot).....	23
Abbildung 16: Wandquerschnitt der Südwestwand mit Sensoranordnung des Messobjektes Aarwangen. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.....	24
Abbildung 17: Wandquerschnitt der Nordwestwand mit Sensoranordnung des Messobjekts Aarwangen. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.....	25
Abbildung 18: Oben von links: Temperatur/rel. Feuchte Sensor im Mauerwerk (70 mm Tiefe), Temperatur/rel. Feuchte Sensor Oberfläche Mauerwerk, Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe).....	26
Abbildung 19: Gesamtansicht Einbauort Sensoren Nordwestwand mit Kabeldurchführung nach aussen zu Messkiste (unten links).....	26
Abbildung 20: Einbauort Südwestwand mit 1x Temperatur/rel. Feuchte Sensor im Mauerwerk (70 mm Tiefe), 2x Temperatur/rel. Feuchte Sensor Oberfläche Mauerwerk, 2x Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe).....	26
Abbildung 21: Gesamtansicht Einbauort Sensoren Südwestwand mit Kabeldurchführung nach aussen zu externen Sensoren.....	26

Abbildung 22: Ansicht Westecke des Messobjekts Wohnhaus Aarwangen, an die links die nach Südwest orientierte Wand anschliesst. Die beiden Einbauorte der Sensoren befinden sich jeweils am linken und rechten Bildrand.	27
Abbildung 23: Ansicht Westecke nach Einbau der feuchtevariablen Dampfbremse und der neuen Fenster.	27
Abbildung 24: Aussenansicht Einbauort Sensoren Südwestwand. Temperatur Sensor Mauerwerk (70 mm Tiefe), Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe), Temperatur Sensor Oberfläche Mauerwerk, Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Aussenputz.	27
Abbildung 25: Endzustand Einbauort Sensoren Südwestwand.	27
Abbildung 26: Aussenansicht Einbauort Sensoren Nordwestwand. Temperatur Sensor Mauerwerk (70 mm Tiefe), Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe).	28
Abbildung 27: Endzustand Einbauort Sensoren Nordwestwand mit sichtbaren Sensoren zur Messung der Temperatur und Materialfeuchte im Aussenputz.	28
Abbildung 28: Aussenansicht Einbauort Sensoren Nordwestwand mit Temperatur Sensor Mauerwerk (70 mm Tiefe) und Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe).	28
Abbildung 29: Endzustand Einbauort Sensoren Nordwestwand mit Kabeldurchführung Aussenwand vor Einbau Messgeräte in Messkiste.	28
Abbildung 30: Luftdicht verschlossene Messkiste im weitestgehend witterungs- und sonnengeschützten Bereich der Nordwestwand.	28
Abbildung 31: Vogelperspektive Gebäudekomplex Brüttelen mit Messobjekt Wohnhaus (grün). Bild aus Google Earth aufgerufen am 20. November 2014.	29
Abbildung 32: Ansicht Südecke des Messobjekts Wohnhaus Brüttelen, an die links die nach Südwest orientierte Wand anschliesst.	29
Abbildung 33: Ansicht der Westecke des Messobjekts Wohnhaus Brüttelen, an die links die nach Nordwest orientierte Wand anschliesst.	30
Abbildung 34: Innenansicht der Westecke des Messobjekts Wohnhaus Brüttelen, an die links die nach Südwest orientierte Wand anschliesst.	30
Abbildung 35: Einbauorte der Sensoren für das Messobjekt Brüttelen. Blau: Nordwestwand. Rot: Südwestwand. Bild aus Google Earth aufgerufen am 20. November 2014.	32
Abbildung 36: Ansicht der Einbauorte der Sensoren für das Messobjekte Brüttelen. Blau: Nordwestwand. Rot: Südwestwand	32
Abbildung 37: Wandquerschnitt der Südwestwand (SW) mit Sensoranordnung des Messobjekts Brüttelen. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.	32
Abbildung 38: Wandquerschnitt der Nordwestwand (NW) mit Sensoranordnung des Messobjekts Brüttelen. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.	33
Abbildung 39: Einbau der Sensoren innen nach Installation der Wärmedämmung in der Installationsebene.	34
Abbildung 40: Einbauorte der Sensoren innen nach Installation der Dampfsperre.	34
Abbildung 41: Einbauorte Sensoren innen nach Installation der Dampfsperre und Vorbereitung der Lattung für Gipskartonplatten.	34
Abbildung 42: Situation aussen an der Nordwestwand nach Installation der Messsonden.	34
Abbildung 43: Temperatursensor und Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk (70 mm Tiefe) bei geöffnetem Putz.	35



Abbildung 44: Aussenwand Südwest nach Installation der Sonden zur Messung der Materialfeuchte und Temperatur im Aussenputz und Mauerwerk (70 mm Tiefe).	35
Abbildung 45: Situation aussen Südwestwand nach Installation der Sonden zur Messung der Materialfeuchte und Temperatur im Aussenputz und Mauerwerk (70 mm Tiefe). Die Sonden zur Messung der Materialfeuchte im Mauerwerk sind mit Lack isoliert, um nicht Widerstände im Putz zu messen.	35
Abbildung 46: Vogelperspektive Gebäudekomplex Soorpark Bütschwil mit Messobjekt Werkstatt (grünes Viereck). Bild aus Google Earth aufgerufen am 17. November 2015.	36
Abbildung 47: Aussenansicht Nordostecke des Messobjekts Soorpark Bütschwil, an die rechts die nach Nord orientierte Wand anschliesst.	37
Abbildung 48: Innenansicht der Nordwestecke des Messobjekts Soorpark Bütschwil, an die rechts die nach Nord orientierte Wand anschliesst.	37
Abbildung 49: Einbauort der Sensoren für das Messobjekt Bütschwil in der Nordwand (Blau). Bild aus Google Earth aufgerufen am 17. November 2015.	39
Abbildung 50: Detailansicht der Nordwand in Bütschwil und Einbauort der Sensoren (Blau).	39
Abbildung 51: Wandquerschnitt der Nordwand mit Sensoranordnung des Messobjektes Bütschwil. T bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur, MF Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung, T/rF Sensoren zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte.	39
Abbildung 52: Gesamtansicht der eingebauten Sensoren innen vor der Installation der Wärmedämmung.	41
Abbildung 53: Einbauorte der Sensoren N-14 bis N-16 innen mit Kabeldurchführung vor der Installation der Wärmedämmung.	41
Abbildung 54: Einbauorte der Sensoren N-5 bis N-8 innen vor der Installation der Wärmedämmung.	41
Abbildung 55: Situation innen nach Beendigung der Sanierungsarbeiten mit Raumsensor N-9 oben links und Kiste zur Aufbewahrung der Messtechnik unten links.	41
Abbildung 56: Aussenwand Nord mit Kabeldurchführung nach Installation der Sonden zur Messung der Materialfeuchte und Temperatur im Mauerwerk (70 mm Tiefe).	41
Abbildung 57: Aussenwand Nord mit Kabeldurchführung und wieder verschlossenen Putz zur Messung der Materialfeuchte und Temperatur im Putz und Mauerwerk.	41
Abbildung 58: Widerstandsisothermen des Mauerwerksteins in Aarwangen (M1) bei 30 °C als Regressionskurven nach Formel 4.	57
Abbildung 59: Ermittlung der Sorptionsisotherme des Aussenputzes in Aarwangen (M2) auf Basis der Messwerte des Fraunhofer-Instituts mit den drei verschiedenen Funktionsklassen.	59
Abbildung 60: Ermittlung der Sorptionsisotherme des Aussenputzes in Aarwangen (M2) auf Basis der Messwerte aus dem Labor der BFH mit den Regressionsgeraden der drei verschiedenen Funktionsklassen, inklusive des 95 % Konfidenzintervalls.	60
Abbildung 61: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Aarwangen auf Basis der Messwerte des IBP und des Labors an der BFH im Vergleich.	63
Abbildung 62: Sorptionsisothermen des Aussenputzes in Aarwangen auf Basis der Messwerte des IBP und des Labors an der BFH im Vergleich.	64
Abbildung 63: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Brüttelen auf Basis der Messwerte des IBP und des Labors an der BFH im Vergleich.	64
Abbildung 64: Wandaufbau und grafische Darstellung der Monitorpositionen für die WUFI Pro®-Simulation der Süd-West Wand in Aarwangen. Der Aufbau der Nord-West Wand ist gleich aber ohne Feuchtequelle (hellblau).	66
Abbildung 66: Wandaufbau mit Monitorpositionen für die WUFI Pro®-Simulation des Objekts in Brüttelen.	70

Abbildung 67: Wandaufbau und grafische Darstellung der Monitorpositionen für die WUFI Pro [®] -Simulation des Objekts in Bütschwil.	74
Abbildung 68: Sensoranordnung im Wandquerschnitt mit Bezeichnung der Sensoren für das Messobjekt Aarwangen.	79
Abbildung 69: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.	80
Abbildung 70: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.	80
Abbildung 71: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.	80
Abbildung 72: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.	80
Abbildung 73: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.	81
Abbildung 74: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.	81
Abbildung 75: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.	81
Abbildung 76: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.	81
Abbildung 76: Rot: Vermutete Position der Undichtigkeit für den Eintritt des Schlagregens. Blau markiert ist der Bereich der installierten Messtechnik.	82
Abbildung 77: Sensoranordnung im Wandquerschnitt mit Bezeichnung der Sensoren für das Messobjekt Brüttelen.	83
Abbildung 78: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.	84
Abbildung 79: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.	84
Abbildung 80: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.	84
Abbildung 81: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.	84
Abbildung 82: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.	85
Abbildung 83: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.	85
Abbildung 84: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.	85
Abbildung 85: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.	85
Abbildung 86: Sensoranordnung im Wandquerschnitt mit Bezeichnung der Sensoren für das Messobjekt Bütschwil.	86
Abbildung 87: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.	87
Abbildung 88: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.	87
Abbildung 89: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.	87



Abbildung 90: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.....	87
Abbildung 91: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/ Wärmedämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.....	88
Abbildung 92: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte am Übergang Mauerwerk/Wärmedämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.	88
Abbildung 93: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.	88
Abbildung 94: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.....	88
Abbildung 95: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten Temperaturen in Aarwangen sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.	89
Abbildung 96: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten relativen Feuchten in Aarwangen sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.	90
Abbildung 97: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten Temperaturen in Brüttelen sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.	90
Abbildung 98: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten relativen Feuchten in Brüttelen sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.	91
Abbildung 99: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten Temperaturen in Bütschwil sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.	91
Abbildung 100: Boxplots der Differenzen zwischen den gemessenen und den simulierten relativen Feuchten in Bütschwil sowie die arithmetischen Mittelwerte über die Messperiode für die verschiedenen Messpositionen.	92
Abbildung 101: Umrechnung des gemessenen Widerstands im Mauerwerk der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen in die relative Feuchte mit Hilfe der Regressionsfunktion der Probe 1 des Mauerwerks und Vergleich mit den gemessenen und simulierten relativen Feuchten.	96
Abbildung 102: Widerstandsisothermen des Mauerwerksteins in Aarwangen (M1) bei 30 °C als Regressionskurven.	133
Abbildung 103: Widerstandsisothermen des Aussenputzes in Aarwangen (M2) bei 30 °C als Regressionskurven.	133
Abbildung 104: Widerstandsisothermen des Mauerwerksteins in Brüttelen (M3) bei 30 °C als Regressionskurven.	134
Abbildung 105: Widerstandsisothermen des Aussenputzes in Brüttelen (M4) bei 30 °C als Regressionskurven.	134
Abbildung 106: Widerstandsisothermen des Mauerwerksteins in Bütschwil (M5) bei 30 °C als Regressionskurven.	135
Abbildung 107: Widerstandsisothermen des Aussenputzes in Bütschwil (M6) bei 30 °C als Regressionskurven.	135
Abbildung 108: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Aarwangen auf Basis der Messwerte des IBP.	137
Abbildung 109: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Brüttelen auf Basis der Messwerte des IBP.	137
Abbildung 110: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Aarwangen auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.	137



Abbildung 111: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Brüttelen auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.....	138
Abbildung 112: Sorptionsisothermen des Aussenputzes in Brüttelen auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.....	138
Abbildung 113: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Bütschwil auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.....	139
Abbildung 114: Sorptionsisothermen des Aussenputzes in Bütschwil auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.....	139
Abbildung 115: Bericht der WUFI Pro®-Simulation der Nord-West Wand des Objekts in Aarwangen mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.....	140
Abbildung 116: Bericht der WUFI Pro®-Simulation der Süd-West Wand des Objekts in Aarwangen mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.....	149
Abbildung 117: Bericht der WUFI Pro®-Simulation der Nord-West Wand des Objekts in Brüttelen mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.....	158
Abbildung 118: Bericht der WUFI Pro®-Simulation der Süd-West Wand des Objekts in Brüttelen mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.....	168
Abbildung 119: Bericht der WUFI Pro®-Simulation der Nordwand des Objekts in Bütschwil mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.....	178
Abbildung 120: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenputz der Nord-West Wand (NW-1) in Aarwangen.....	186
Abbildung 121: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Nord-West Wand (NW-1) in Aarwangen.....	186
Abbildung 122: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-4) in Aarwangen.....	186
Abbildung 123: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-4) in Aarwangen.....	186
Abbildung 124: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen.....	187
Abbildung 125: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen.....	187
Abbildung 126: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.....	187
Abbildung 127: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.....	187
Abbildung 128: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-10) in Aarwangen.....	187
Abbildung 129: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-10) in Aarwangen.....	187
Abbildung 130: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenputz der Süd-West Wand (SW-1) in Aarwangen.....	188
Abbildung 131: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Süd-West Wand (SW-1) in Aarwangen.....	188
Abbildung 132: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenbereich des Hochlochziegelverbunds der Süd-West Wand (SW-4) in Aarwangen.....	188
Abbildung 133: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Hochloch-ziegelverbunds der Süd-West Wand (SW-4) in Aarwangen.....	188
Abbildung 134: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Hochlochziegelverbunds der Süd-West Wand (SW-7) in Aarwangen.....	189



Abbildung 135: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Hochlochziegelverbunds der Süd-West Wand (SW-7) in Aarwangen.....	189
Abbildung 136: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.	189
Abbildung 137: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.	189
Abbildung 138: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-10) in Aarwangen.	189
Abbildung 139: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-10) in Aarwangen.	189
Abbildung 140: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Innenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen.	190
Abbildung 141: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen.	190
Abbildung 142: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.	190
Abbildung 143: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.	190
Abbildung 144: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-10) in Aarwangen.....	190
Abbildung 145: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-10) in Aarwangen.	190
Abbildung 146: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Innenbereich des Mauerwerks der Süd-West Wand (SW-7) in Aarwangen.	191
Abbildung 147: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Mauerwerks der Süd-West Wand (SW-7) in Aarwangen.....	191
Abbildung 148: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.....	191
Abbildung 149: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.	191
Abbildung 150: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-10) in Aarwangen.	191
Abbildung 151: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-10) in Aarwangen.	191
Abbildung 152: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenputz der Nord-West Wand (NW-1) in Brüttelen.	192
Abbildung 153: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Nord-West Wand (NW-1) in Brüttelen.	192
Abbildung 154: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-4) in Brüttelen.	192
Abbildung 155: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-4) in Brüttelen.....	192
Abbildung 156: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-6) in Brüttelen.	193
Abbildung 157: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-6) in Brüttelen.	193
Abbildung 158: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.....	193

Abbildung 159: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.....	193
Abbildung 160: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Brüttelen.....	193
Abbildung 161: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Brüttelen.....	193
Abbildung 162: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Nord-West Wand (NW-9) in Brüttelen.....	194
Abbildung 163: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Nord-West Wand (NW-9) in Brüttelen.....	194
Abbildung 164: Gemessener und simulierter Temperatur-verlauf im Aussenputz der Süd-West Wand (SW-1) in Brüttelen.....	194
Abbildung 165: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Süd-West Wand (SW-1) in Brüttelen.....	194
Abbildung 166: Gemessener und simulierter Temperatur-verlauf im Aussenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-4) in Brüttelen.....	194
Abbildung 167: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-4) in Brüttelen.....	194
Abbildung 168: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-6) in Brüttelen.....	195
Abbildung 169: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-6) in Brüttelen.....	195
Abbildung 170: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.....	195
Abbildung 171: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.....	195
Abbildung 172: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Brüttelen.....	195
Abbildung 173: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Brüttelen.....	195
Abbildung 174: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Süd-West Wand (SW-9) in Brüttelen.....	196
Abbildung 175: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Süd-West Wand (SW-9) in Brüttelen.....	196
Abbildung 176: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Innenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-6) in Brüttelen.....	196
Abbildung 177: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-6) in Brüttelen.....	196
Abbildung 178: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.....	196
Abbildung 179: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.....	196
Abbildung 180: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Brüttelen.....	197
Abbildung 181: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Brüttelen.....	197
Abbildung 182: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Nord-West Wand (NW-9) in Brüttelen.....	197



Abbildung 183: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Nord-West Wand (NW-9) in Brüttelen.	197
Abbildung 184: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Innenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-6) in Brüttelen.	197
Abbildung 185: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-6) in Brüttelen.	197
Abbildung 186: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.	198
Abbildung 187: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.	198
Abbildung 188: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Brüttelen.	198
Abbildung 189: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Brüttelen.	198
Abbildung 190: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Süd-West Wand (SW-9) in Brüttelen.	198
Abbildung 191: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Süd-West Wand (SW-9) in Brüttelen.	198
Abbildung 192: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenputz der Nordwand (N-1) in Bütschwil.	199
Abbildung 193: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Nordwand (N-1) in Bütschwil.	199
Abbildung 194: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenbereich des Backsteins der Nordwand (N-4) in Bütschwil.	199
Abbildung 195: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Backsteins der Nordwand (N-4) in Bütschwil.	199
Abbildung 196: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Backsteins der Nordwand (N-6) in Bütschwil.	200
Abbildung 197: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Backsteins der Nordwand (N-6) in Bütschwil.	200
Abbildung 198: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.	200
Abbildung 199: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.	200
Abbildung 200: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.	200
Abbildung 201: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.	200
Abbildung 202: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte im Innenbereich des Backsteins der Nordwand (N-6) in Bütschwil.	201
Abbildung 203: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Backsteins der Nordwand (N-6) in Bütschwil.	201
Abbildung 204: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.	201
Abbildung 205: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.	201
Abbildung 206: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.	201

Abbildung 207: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil. 201

11.3 Literaturverzeichnis

- [1] BFE, «Energiestrategie 2050 - Erstes Massnahmenpaket,» Bundesamt für Energie, 13.09.2012.
- [2] BFE, «Energiestrategie 2050 - Fakten zur Energie Nr. 5,» Bundesamt für Energie, 01.10.2015.
- [3] BFS, «Gebäude nach Kategorie, Bauperiode und Geschosshöhe,» Bundesamt für Statistik, [Online]. Available: <http://www.bfs.admin.ch/>. [Zugriff am 15.05.2013].
- [4] CCEM, «Sustainable Renovation of Historical Buildings SuRHIB - Project Description,» Competence Center Energy and Mobility, [Online]. Available: <http://www.ccem.ch/surhib>. [Zugriff am 15.05.2013].
- [5] IBP, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, [Online]. Available: <http://www.hoki.ibp.fraunhofer.de/wufi/faq.html#MeasMatD>. [Zugriff am 10.12.2014].
- [6] DIN EN 13755, «Prüfverfahren für Natursteine - Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck; Deutsche Fassung EN 13755:2008,» DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2008.
- [7] R. C. Team, «R,» R Foundation, Auckland, seit 1992.
- [8] D. MONTGOMERY und G. RUNGER, Applied Statistics and Probability for Engineers, Bde. 1 und 2, 6th edition - International Student Version, Wiley, 2014.
- [9] P. HÄUPL, Bauphysik - Klima, Wärme, Feuchte, Schall - Grundlagen, Anwendungen, Beispiele, Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co., 2008.
- [10] A. HAILWOOD und S. HORROBIN, «Absorption of water by polymers. Analysis in terms of a simple model,» Trans. Faraday Soc., 1946.
- [11] WUFI, «HTML Help,» [Online]. Available: Feuchtespeicherfunktion. [Zugriff am Juni 2016].
- [12] MeteoSchweiz, «Datenportal IDAweb,» Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, 01.12.2014. [Online]. Available: <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/service-und-publikationen/beratung-und-service/datenportal-fuer-lehre-und-forschung.html>. [Zugriff am 01.09.2016].
- [13] R. PEREZ, P. INEICHEN, R. SEAL, A. ZALENKA und E. MAXWELL, «Dynamic global-to-direct irradiance conversion models,» *ASHRAE Transactions*, Bd. vol. 98, Nr. no. 1, pp. 354-369, 1992.
- [14] DIN, «DIN EN 15026 - Wärme- und Feuchte-technisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation,» Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2007.
- [15] WUFI, «WUFI Hilfe intern». *Interne Feuchtespeicherfunktion*.



Anhang A1: Kalibrierschein der Firma Scantronik

Scantronik Mugrauer GmbH

Scantronik Mugrauer GmbH
Parkstraße 38
85604 Zorneding
Deutschland

**Kalibrierschein /
Certificate of Calibration**

Telefon: +49 (0)8106 22570
Fax: +49 (0)8106 29080
E-Mail: info@Scantronik.de
Internet: www.Scantronik.de

Hersteller: Scantronik Mugrauer GmbH
Produkt / Typ: Thermo-Hygro-Sensor (CMOS)
Seriennummer: Thermo-Hygro-Sensor - HSC025079

Kalibriervorgang:



Das oben aufgeführte Produkt wurde mit Hilfe ausgewählter, ISO/IEC 17025 konformer Messvorrichtungen kalibriert. Die während der Kalibrierung verwendeten Vergleichstandards sind rückführbar entsprechend dem NIST und NPL.

Der Sensor selbst wurde separat kontaktiert und in einer "Thunder Scientific" Präzisions Luftfeuchte-Kammer placiert. Als Referenz wurde ein MBW DP30 Präzisions-Taupunkt-Hygrometer (Chilled Mirror - Prinzip) verwenden.

Zwei unterschiedliche Temperaturen (25°C und 42°C) wurden für die Zweipunkt-Temperatur-Kalibrierung verwendet. Drei unterschiedliche Luftfechtigkeiten (22%RH, 67%RH und 82%RH) wurden für die Dreipunkt-Luftfeuchte-Kalibrierung verwendet.

Nach der Kalibrierung wurde der Sensor auf seine Genauigkeit hin überprüft. Hierfür durchlief der Sensor einen Zyklus von 20%RH, 50%RH, 90%RH, 50%RH und wieder 20%RH bei einer Temperatur von 25°C sowie 42°C. Die Messwerte wurden automatisch auf ihre Genauigkeit ausgewertet. Der im System eingesetzte Sensor hat alle diese Tests zu 100% bestanden.

Testergebnisse:

Referenzbedingung	Umgebung	Einheit	Sollwert	Erlaubte Toleranz	Typischer C_{pk}
Niedrige relative Feuchte	25°C	%RH	20.0	+/- 1.8	> 2.0
Relative Feuchte	25°C	%RH	50.0	+/- 1.8	> 2.0
Hohe relative Feuchte	25°C	%RH	90.0	+/- 2.0	> 2.0
Relative Feuchte	42°C	%RH	50.0	+/- 2.0	> 1.8
Niedrige Temperatur	20%RH	°C	25.0	+/- 0.3	> 2.0
Hohe Temperatur	20%RH	°C	42.0	+/- 0.4	> 1.5

SCANNTRONIK

Scantronik Mugrauer GmbH
Parkstraße 38
85604 Zorneding
Deutschland

Firmen-Stempel

15.01.2014

Datum

Andrea Theisinger
Andrea Theisinger

Bearbeiter

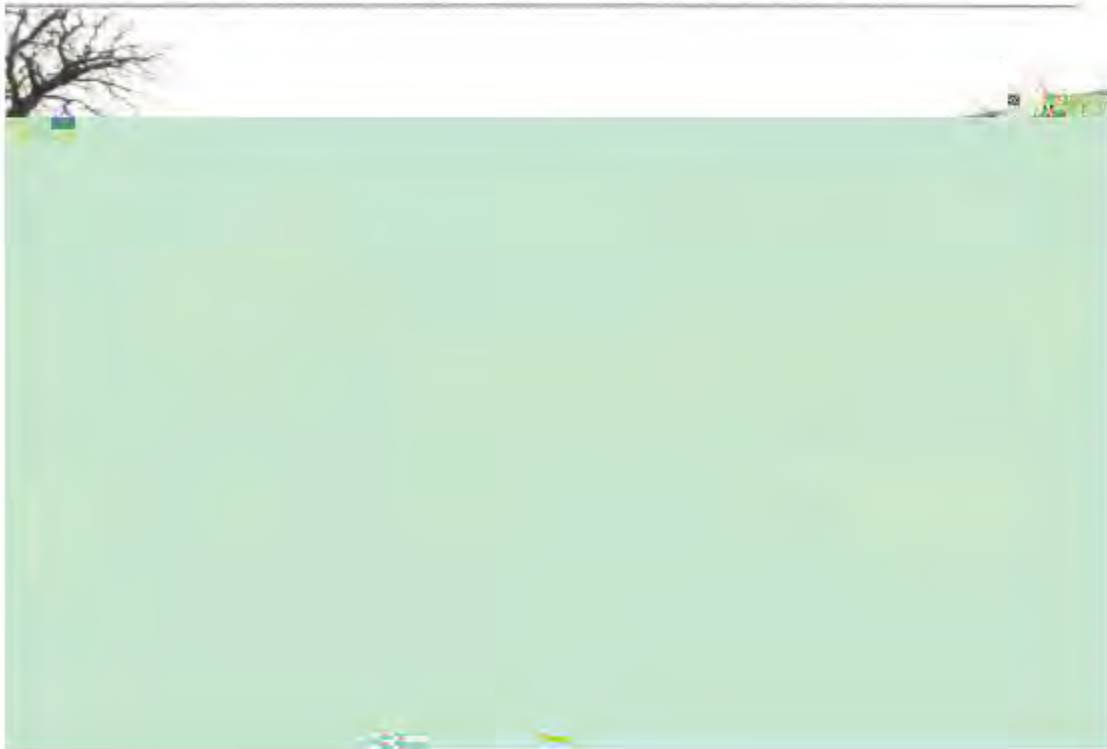
Anhang B1: Kurzbeschrieb Amt für Kultur/ Denkmalpflege Kanton Bern - Brüttelen

Gemeinde Brüttelen

Fluhweg 1

Bewertung erhaltenswert
Grundstücksnummer 358
Koordinaten 576880 / 207113

Erziehungsdirektion
des Kantons Bern
Amt für Kultur
Denkmalpflege
Münstergasse 32
3011 Bern
Telefon 031 633 40 30
denkmalpflege@erz.be.ch



Kurzbeschrieb

Bauernhaus, wohl 4. V. 19. Jh.

Sorgfältiger Putzbau mit schlichten, aber kräftigen Hausteingliederungen. Wohnteil mit asymmetrisch befensterten Fassaden und unter Querfirst. Giebelgeschoss in Rieg, mit nachträglicher (20. Jh.) Korbbogen-Rüdi. Ökonomieteil jünger erneuert. Bemerkenswertes Beispiel einer Brüttelenstein-Anwendung. Der Steinbruch befindet sich in unmittelbarer Nähe. Hauptbau des Gehöfts, das unweit des Kirchwegs nach Ins, in einem nicht mehr ausgebeuteten Teil des Muschelsandsteinbruchs liegt. Gewisse historische Bedeutung als Wohn- und Sterbeort des letzten Scharfrichters (Johann Moser) des Kantons Bern.

Dokument aufgerufen am 20. November 2014 unter
http://www.erz.be.ch/erz/de/index/kultur/denkmalpflege/bauinventar/bauinventar_online.html.

Anmerkung: Dokument derzeit nicht mit korrekter Abbildung herunterladbar.



Anhang B2: Kurzbeschrieb Amt für Kultur/ Denkmalpflege Kanton Bern - Aarwangen

Gemeinde Aarwangen

Meiniswilstrasse 51

Bewertung erhaltenswert, K-Objekt
Baugruppe D (Meiniswil)

Grundstücksnummer 779
Koordinaten 623157 / 231265

Erziehungsdirektion
des Kantons Bern
Amt für Kultur
Denkmalpflege
Münstergasse 32
3011 Bern
Telefon 031 633 40 30
denkmalpflege@erz.be.ch



Kurzbeschrieb

Bauernhaus von 1908, nach Brand auf Gewölbekeller von 1768 wiederaufgebaut
Grosses Mehrzweckhaus unter Viertelwalmdach. Gemauerter und verputzter Wohnteil mit 3-achsiger Front und Giebelfeld in Rieg. Kräftige Zementelemente rahmen die Tür- und Fensteröffnungen. Die Fensterbank-Konsolen mit floralem Motiv verziert. Die traufseitigen Lauben auf bugverstreute Holzpfosten abgestützt. Die NW-seitige Laube eingewandelt. Ökonomieteil mit erneuertem Stall und mächtiger, als Quergiebelanbau konzipierter Hocheinfahrt im SO. Zum Bauernhof gehört auch ein Speicher (Nr. 51A). Der Hof am O-Rand von Meiniswil steht etwas abgesetzt von den übrigen Höfen.

Anhang C1: IBP-Prüfbericht des Aussenputzes in Aarwangen



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

Institutsleiter
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Prüfbericht HoFM-25/2015

Bestimmung von feuchtetechnischen Materialkennwerten

Auftraggeber:

Berner Fachhochschule
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Solithurnerstraße 102
CH-2500 Biel 6
SCHWEIZ

Holzkirchen, 24. September 2015

Geprüftes Material: „Ziegel“**Probennahme**

Das zu prüfende Material wurde dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, vom Auftraggeber am 17. März 2015 persönlich übergeben. Es handelt sich um 3 Ziegelbruchstücke, welche vom Auftraggeber aus dem Abbruch eines alten Bauernhauses gesammelt wurden. Aus diesen Bruchstücken werden 5 rechteckige Proben für die Prüfungen heraus gesägt.

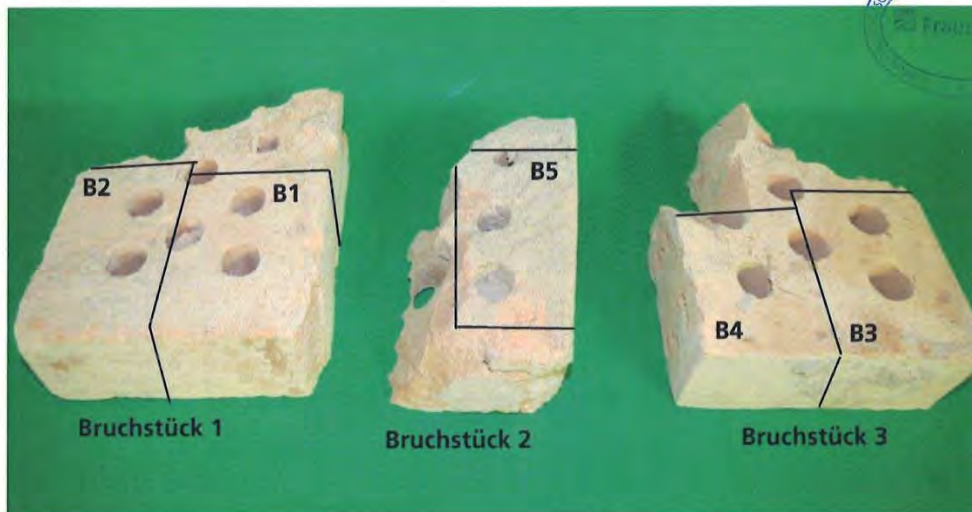


Bild 1: 3 Ziegelbruchstücke mit Kennzeichnung der gesägten Proben.

Probenbeschreibung und Probenbezeichnung

Probenbezeichnung:

F179_B1 und F179_B2	aus Bruchstück 1 gesägt.
F179_B3 und F179_B4	aus Bruchstück 3 gesägt.
F179_B5	aus Bruchstück 2 gesägt.
F179_B6 bis B179_18	Bruchstücke ohne spezielle Geometrie, nicht zuordenbar.
F179_B19	begradigte Probe aus F179_B2, Bruchstück 1.
F179_B20	begradigte Probe aus F179_B5, Bruchstück 2.

Prüfverfahren

- Bestimmung der Rohdichte nach DIN EN 772-4, Ausgabe: Oktober 1998; Trocknung bei 105 °C.
- Bestimmung der Reindichte mit dem Heliumpyknometer.
- Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 12572, Ausgabe September 2001. Trockenbereichsverfahren: 23 °C, 0-50 % r.F., Sorbens: Silicagel; Feuchtbereichsverfahren: 23 °C, 50-93 % r. F., Sorbens: gesättigter Ammoniumdihydrogenphosphat-Lösung.
- Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten nach EN ISO 15148, Ausgabe März 2003.
- Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften nach DIN EN ISO 12571, Ausgabe April 2000. Adsorptionsverfahren; Die Messungen erfolgen bei 23 °C und
 - 65 % r. F. in der Klimakammer
 - 80 % r. F. in der Klimakammer
 - 93 % r. F. in einem Exsikkator über gesättigter Ammoniumdihydrogenphosphat-Lösung
 - 97 % r. F. in einem Exsikkator über gesättigter Kaliumsulfat-Lösung.
- Bestimmung der freien Wasseraufnahme nach DIN 52103, Ausgabe April 1988.
- Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten aus dem w-Wert: M. Krus, A. Holm, T. Schmidt, Bauinstandsetzen 3 (1997), H.1, S. 219-234.
- Bestimmung der Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung: A. Holm, M. Krus, Bauinstandsetzen 4 (1998), H.1, S. 33-52.

Prüfergebnisse

Die Prüfungen wurden im Zeitraum von März bis September 2015 durchgeführt.

Materialkennwerte

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwerte	Mittelwert
F179_B1 F179_B2 F179_B5	Rohdichte	kg/m ³	1369 ¹⁾	1361
			1359 ¹⁾	
			1355 ¹⁾	
F179_B3 F179_B4			1280 ²⁾	1265
			1249 ²⁾	
F179_B18	Reindichte	kg/m ³	2771	2771
F179_B	Porosität	%	52	52
F179_B1 F179_B19 F179_B20	Diffusionswiderstandszahl μ (23-0/50)	-	7,8 ¹⁾	7,8
			7,9 ¹⁾	
			7,8 ¹⁾	
F179_B3 F179_B4			16,5 ²⁾	17,8
			19,0 ²⁾	
F179_B1 F179_B19 F179_B20	Diffusionswiderstandszahl μ (23-50/93)	-	7,4 ¹⁾	7,5
			7,6 ¹⁾	
			7,5 ¹⁾	
F179_B3 F179_B4			16,6 ²⁾	17,6
			18,5 ²⁾	

¹⁾ aus Bruchstück 1 bzw. 2

²⁾ aus Bruchstück 3





Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwerte	Mittelwert
F179_B1 F179_B2 F179_B5	Wasseraufnahme- koeffizient w_{1h}	kg/m ² √h	16,3 ¹⁾ 15,9 ¹⁾ 16,8 ¹⁾	16,4
F179_B3 F179_B4			6,9 ²⁾ 5,2 ²⁾	
F179_B1 F179_B2 F179_B5	Wasseraufnahme- koeffizient w_{4h}	kg/m ² √h	3)	3)
F179_B3 F179_B4			6,9 ²⁾ 5,2 ²⁾	6,1
F179_B6 F179_B7 F179_B8	Feuchtegehalt bei 23°C u. 65 % r.F.	[Vol. %]	0,90 0,68 0,73	0,77
F179_B9 F179_B10 F179_B11	Feuchtegehalt bei 23°C u. 80 % r.F.	[Vol. %]	0,74 0,92 0,80	0,82
F179_B12 F179_B13 F179_B14	Feuchtegehalt bei 23°C u. 93 % r.F.	[Vol. %]	1,10 0,87 0,94	0,97
F179_B15 F179_B16 F179_B17	Feuchtegehalt bei 23°C u. 97 % r.F.	[Vol. %]	1,24 1,28 1,46	1,32
F179_B1 F179_B2 F179_B5 F179_B3 F179_B4	Freie Wassersätti- gung	[Vol. %]	32,3 34,7 35,8 31,4 33,5	33,5

¹⁾ aus Bruchstück 1 bzw. 2

²⁾ aus Bruchstück 3

³⁾ Proben vorher durchfeuchtet.



Kapillartransportkoeffizienten

Kapillartransportkoeffizient für Saugen	D_{wo} [m^2/s]	80 % r. F.	$2,8 \cdot 10^{-9}$ ¹⁾ $3,8 \cdot 10^{-10}$ ²⁾
	D_{wf} [m^2/s]	100 % r. F.	$2,5 \cdot 10^{-6}$ ¹⁾ $3,4 \cdot 10^{-7}$ ²⁾
Kapillartransportkoeffizient für Weiterleiten	D_{wo} [m^2/s]	80 % r. F.	$8,5 \cdot 10^{-10}$ $2,4 \cdot 10^{-10}$ ²⁾
	D_{wf} [m^2/s]	100 % r. F.	$3,5 \cdot 10^{-6}$ ¹⁾ $1,1 \cdot 10^{-7}$ ²⁾

¹⁾ aus Bruchstück 1 bzw. 2

²⁾ aus Bruchstück 3

Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei Bruchstück 1 und 2 um gleiche Ziegel und bei Bruchstück 3 um einen anderen Ziegel handelt.

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das nach DIN EN ISO 17025 durch die DAkkS mit der Nr. D-PL-11140-11-02 akkreditiert ist.

Der Prüfbericht umfasst
5 Seiten Text mit 3 Tabellen und 1 Bild.

Holzkirchen, den 1. Oktober 2015

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Prüfstellenleiter:



Prof. Dr.-Ing. Martin Krus



Sachbearbeiter:



Kim Abenthum



Anhang C2: IBP-Prüfbericht des Mauerwerks in Aarwangen



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
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Prüfbericht HoFM-29/2015

Bestimmung von feuchtetechnischen Materialkennwerten

Auftraggeber:

Berner Fachhochschule
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Solothurnerstraße 102
CH-2500 Biel 6
SCHWEIZ

Holzkirchen, 29. Oktober 2015



Prüflabor durch die DAkks akkreditiert
nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005
Feuchte, Mörtel, Strahlung, Emissionen

Prüflabor Feuchte, Mörtel,
Strahlung, Emissionen
Institutsteil Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-0
Telefax +49 8024 643-366
www.ibp.fraunhofer.de

Seite 1 von 4

Geprüftes Material: „Außenputz mit Farbe“

Mittlere Dicke: 22,3 mm
 Mittlere Rohdichte: 1716 kg/m³

Probennahme

Das zu prüfende Material wurde dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, vom Auftraggeber am 17. März persönlich übergeben. Es handelt sich um 4 Bohrkern und kleinere Bruchstücke, die an zwei verschiedenen Stellen in einem alten Bauernhaus entnommen worden sind (Bild 1). Die Bohrkern haben einen Durchmesser von ca. 120 mm und bestehen aus Anstrich auf Putz mit anhaftendem Ziegelmauerwerk. Für die Untersuchungen ist von 2 Bohrkernen das Ziegelmauerwerk abgesägt worden.



Bild 1: Bohrkern bestehend aus Farbe, Putz und Ziegelmauerwerk.

Probenbeschreibung und Probenbezeichnung

Die Proben weisen durch die Entnahme in der Mitte der Probe ein Loch mit ca. 8 mm Durchmesser auf, das vor den Prüfungen mit Dichtmasse verfüllt wurde (Bild 2).

Probenbezeichnung:

- F179_A1, F179_A2: Bohrkern bestehend aus Putz mit Farbe.
- F179_A3, F179_A4: Bohrkern bestehend aus Putz mit Farbe und Ziegelmauerwerk.
- F179_A5 bis F179_A17: Teilstücke aus Putz mit Farbe ohne spezielle Geometrie.



Bild 2: Probe mit zentralem Loch; links: ohne Abdichtung, rechts: mit Dichtmasse verfüllt.

**Prüfverfahren**

- Bestimmung der Rohdichte nach DIN EN 1015-10, Ausgabe Mai 2007. Trocknung bei 40 °C mit trockener Umluft.
- Bestimmung der Reindichte mit dem Heliumpyknometer.
- Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 12572, Ausgabe September 2001. Trockenbereichsverfahren: 23 °C, 0-50 % r.F., Sorbens: Silicagel; Feuchtbereichsverfahren: 23 °C, 50-93 % r. F., Sorbens: gesättigter Ammoniumdihydrogenphosphat-Lösung.
- Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten nach EN ISO 15148, Ausgabe März 2003.
- Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften nach DIN EN ISO 12571, Ausgabe April 2000. Adsorptionsverfahren; Die Messungen erfolgen bei 23 °C und
 - 65 % r. F. in der Klimakammer
 - 80 % r. F. in der Klimakammer
 - 93 % r. F. in einem Exsikkator über gesättigter Ammoniumdihydrogenphosphat-Lösung
 - 97 % r. F. in einem Exsikkator über gesättigter Kaliumsulfat-Lösung
- Bestimmung der freien Wasseraufnahme nach DIN 52103, Ausgabe April 1988.
- Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten aus dem w-Wert: M. Krus, A. Holm, T. Schmidt, Bauinstandsetzen 3 (1997), H.1, S. 219-234.
- Bestimmung der Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung: A. Holm, M. Krus, Bauinstandsetzen 4 (1998), H.1, S. 33-52.

Prüfergebnisse

Die Prüfungen wurden im Zeitraum von März bis Juli 2015 durchgeführt.

**Materialkennwerte**

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwerte	Mittelwert
F179_A1 F179_A2	Rohdichte	kg/m ³	1718 1714	1716
F179_A17	Reindichte	kg/m ³		2625
	Porosität	%		34,6
F179_A1 F179_A2	Diffusionswiderstandszahl μ (23-0/50)	-	23 29	26
F179_A1 F179_A2	Diffusionswiderstandszahl μ (23-50/93)	-	21 24	23
F179_A1 F179_A2 F179_A3 F179_A4	Wasseraufnahmekoeffizient w_{1h}	kg/m ² √h	0,30 0,75 0,11 0,15	0,33
F179_A1 F179_A2 F179_A3 F179_A4	Wasseraufnahmekoeffizient w_{4h}	kg/m ² √h	0,84 1,24 0,23 0,29	0,65



Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwerte	Mittelwert
F179_A5 F179_A6 F179_A7	Feuchtegehalt bei 23°C u. 65 % r.F.	[Vol. %]	2,41 2,86 2,69	2,66
F179_A8 F179_A9 F179_A10	Feuchtegehalt bei 23°C u. 80 % r.F.	[Vol. %]	3,38 4,21 4,13	3,91
F179_A11 F179_A12 F179_A13	Feuchtegehalt bei 23°C u. 93 % r.F.	[Vol. %]	6,87 7,29 6,56	6,91
F179_A14 F179_A15 F179_A16	Feuchtegehalt bei 23°C u. 97 % r.F.	[Vol. %]	10,96 11,22 10,49	10,89
F179_A1 F179_A2	Freie Wassersättigung	[Vol. %]	24,8 22,3	23,5

Kapillartransportkoeffizienten

	Kapillartransportkoeffizient für Saugen	D_{w0} [m ² /s]	80 % r. F.	$2,5 \cdot 10^{-11}$
		D_{w1} [m ² /s]	100 % r. F.	$8,0 \cdot 10^{-9}$
	Kapillartransportkoeffizient für Weiterleiten	D_{w0} [m ² /s]	80 % r. F.	$3,9 \cdot 10^{-10}$
		D_{w1} [m ² /s]	100 % r. F.	$2,5 \cdot 10^{-9}$



Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das nach DIN EN ISO 17025 durch die DAkkS mit der Nr. D-PL-11140-11-02 akkreditiert ist.

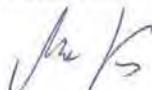
Der Prüfbericht umfasst
4 Seiten Text mit 3 Tabellen und 2 Bilder.

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

Holzkirchen, den 29. Oktober 2015

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Prüfstellenleiter:


Prof. Dr. Ing. Martin Krus

Sachbearbeiter:


rer. nat. Cornelia Fitz





Anhang C3: IBP-Prüfbericht des Mauerwerks in Brütten



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

Institutsleiter
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Prüfbericht HoFM-24/2015

Bestimmung von feuchtetechnischen Materialkennwerten

Auftraggeber:

Berner Fachhochschule
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Solothurnerstraße 102
CH-2500 Biel 6
SCHWEIZ

Holzkirchen, 24. September 2015

Prüflabor durch die DAkkS akkreditiert
nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005
Feuchte, Mörtel, Strahlung, Emissionen



Prüflabor Feuchte, Mörtel,
Strahlung, Emissionen
Institutsteil Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-0
Telefax +49 8024 643-366
www.ibp.fraunhofer.de

Seite 1 von 4

Geprüftes Material: „Muschelkalk“Mittlere Rohdichte: 2366 kg/m³**Probennahme**

Das zu prüfende Material wurde dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, vom Auftraggeber am 17. März 2015 persönlich übergeben. Es handelt sich um 7 Bohrkern, die an zwei verschiedenen Stellen in einem alten Bauernhaus entnommen worden sind. Die Proben haben alle einen Durchmesser von ca. 94 mm mit verschiedenen Höhen (10 mm – 115 mm) (Bild 1). Für die Untersuchungen sind aus den drei längsten Kernen Scheiben mit einer Dicke von ca. 20 mm für die Prüfungen herausgeschnitten worden.



Bild 1: Verschiedene Bohrkern aus Muschelkalk.

Probenbeschreibung und Probenbezeichnung

Das Material ist sehr inhomogen, wie für einen Naturstein typisch.

Probenbezeichnung:

F179_C1 bis F179_C4	Bohrkerne mit einer Höhe zwischen 21 und 115 mm
F179_C5 bis F179_C7	Scheiben mit einer Höhe von ca. 20 mm
F179_C8 bis F179_C20	Bruchstücke
F179_C21 bis F179_C23	Scheiben mit einer Höhe von ca. 20 mm

Prüfverfahren

- Bestimmung der Rohdichte nach DIN EN 772-4, Ausgabe: Oktober 1998; Trocknung bei 105 °C.
- Bestimmung der Reindichte mit dem Heliumpyknometer.
- Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 12572, Ausgabe September 2001. Trockenbereichsverfahren: 23 °C, 0-50 % r.F., Sorbens: Silicagel; Feuchtbereichsverfahren: 23 °C, 50-93 % r. F., Sorbens: gesättigter Ammoniumdihydrogenphosphat-Lösung.
- Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten nach EN ISO 15148, Ausgabe März 2003.
- Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften nach DIN EN ISO 12571, Ausgabe April 2000. Adsorptionsverfahren; Die Messungen erfolgen bei 23 °C und



- 65 % r. F. in der Klimakammer
- 80 % r. F. in der Klimakammer
- 93 % r. F. in einem Exsikkator über gesättigter Ammoniumdihydrogenphosphat-Lösung
- 97 % r. F. in einem Exsikkator über gesättigter Kaliumsulfat-Lösung.
- Bestimmung der freien Wasseraufnahme nach DIN 52103, Ausgabe April 1988.
- Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten aus dem w-Wert: M. Krus, A. Holm, T. Schmidt, Bauinstandsetzen 3 (1997), H.1, S. 219-234.
- Bestimmung der Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung: A. Holm, M. Krus, Bauinstandsetzen 4 (1998), H.1, S. 33-52.

Prüfergebnisse

Die Prüfungen wurden im Zeitraum von März bis Juli 2015 durchgeführt.

Materialkennwerte

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwerte	Mittelwert
F179_C5	Rohdichte	kg/m ³	2420	2366
F179_C6			2416	
F179_C7			2396	
F179_C21			2307	
F179_C22			2306	
F179_C23			2350	
F179_C20	Reindichte	kg/m ³	2708	2708
F179_C	Porosität	%	11,0	11,0
F179_C5	Diffusionswiderstandszahl μ (23-0/50)	-	622 ¹⁾	203
F179_C6			170	
F179_C7			236	
F179_C5	Diffusionswiderstandszahl μ (23-50/93)	-	296 ¹⁾	67
F179_C6			63	
F179_C7			70	
F179_C1	Wasseraufnahmekoeffizient w_{1h}	kg/m ² √h	0,60	0,57
F179_C2			0,65	
F179_C3			0,44	
F179_C4			0,60	
F179_C1	Wasseraufnahmekoeffizient w_{4h}	kg/m ² √h	0,59	0,51
F179_C2			0,58	
F179_C3			0,37	
F179_C4			-, ²⁾	
F179_C1	Wasseraufnahmekoeffizient w_{24h}	kg/m ² √h	-, ²⁾	0,52
F179_C2			0,52	
F179_C3			-, ²⁾	
F179_C4			-, ²⁾	

¹⁾ bei Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

²⁾ Probe durchfeuchtet



Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwerte	Mittelwert
F179_C8 F179_C9 F179_C10	Feuchtegehalt bei 23°C u. 65 % r.F.	[Vol. %]	1,32 1,48 1,80	1,54
F179_C11 F179_C12 F179_C13	Feuchtegehalt bei 23°C u. 80 % r.F.	[Vol. %]	1,24 1,65 1,82	1,57
F179_C14 F179_C15 F179_C16	Feuchtegehalt bei 23°C u. 93 % r.F.	[Vol. %]	2,24 2,46 1,85	2,18
F179_C17 F179_C18 F179_C19	Feuchtegehalt bei 23°C u. 97 % r.F.	[Vol. %]	2,21 2,91 -	2,56
F179_C21 F179_C22 F179_C23	Freie Wassersättigung	[Vol. %]	5,74 5,80 5,72	5,76



Kapillartransportkoeffizienten

Kapillartransportkoeffizient für Saugen	D_{w0} [m ² /s]	80 % r. F.	$5,8 \cdot 10^{-10}$
	D_{w1} [m ² /s]	100 % r. F.	$8,3 \cdot 10^{-9}$
Kapillartransportkoeffizient für Weiterleiten	D_{w0} [m ² /s]	80 % r. F.	$4,2 \cdot 10^{-9}$
	D_{w1} [m ² /s]	100 % r. F.	$8,7 \cdot 10^{-8}$



Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das nach DIN EN ISO 17025 durch die DAkkS mit der Nr. D-PL-11140-11-02 akkreditiert ist.

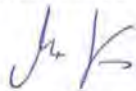
Der Prüfbericht umfasst
4 Seiten Text mit 3 Tabellen und 1 Bild.

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Holzkirchen, den 29. September 2015

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Prüfstellenleiter:



Prof. Dr.-Ing. Martin Krus



Sachbearbeiter:



Kim Abenthum



Anhang D1: Datenblatt Isover PB M 035



PB M 035 Kerndämmplatte



Beschreibung

Halbsteife Platten aus Glaswolle, wasserabweisend.
Palettenhöhe 2.55 m.

MW-EN 13162-T2-WS-MU1-AFr5

Anwendungsbereiche

Wärme- und Schalldämmung in Zweischalenmauerwerken,
Aussenwänden, Holzkonstruktionen und Dachböden.

Technische Daten

Kenngösse	Symbole	Einheiten	Messwerte	Normen
Nennwert der Wärmeleitfähigkeit	λ_D	[W/(m K)]	0.035	SIA 279
Rohdichte	ρ_s	[kg/m ³]	≈ 20	SIA 279.067
Brandverhalten	Euroklasse	[–]	A1	EN 13501-1
Spezifische Wärmekapazität	c	[J/(kg K)]	1030	SIA 381.101
Diffusionswiderstandszahl	μ	[–]	1	SIA 381.101
Längenbezogener Strömungswiderstand	r	[kPa s/m ²]	≥ 5	SIA 181.205

Anhang D2: Datenblatt Flumroc Dämmplatte 1

Flumroc-Dämmplatte 1



Vorteile

- Schmelzpunkt > 1000°C
- nicht brennbar
- Wasser abweisend
- diffusionsoffen
- schnell und einfach zu verarbeiten
- recycelbar

Produktbeschreibung

Die standfeste, elastische Steinwolldämmplatte 1 für den universellen Einsatz.

Anwendungsbereich

Wärme- und Schalldämmung im Zweischalenmauerwerk oder als Ausfachung in Holzkonstruktionen.

Physikalische Materialkennwerte	Zeichen	Beschreibung/Messwert	Norm/Vorschrift
Rohdichte	ρ_a	ca. 38 kg/m ³	EN 1602
Wärmeleitfähigkeit	λ_0	0.035 W/(m K)	SIA Merkblatt 2001
Spezifische Wärmekapazität	c	830 J/(kg K)	
Diffusionswiderstandszahl	μ	ca. 1	EN 12086
Brandverhalten – Euroklasse	EU	A1	EN 13501-1
Schweizerisches Brandschutz-Zertifikat		No. 14670	VKF
Maximale Anwendungstemperatur		250 °C*	
Schmelzpunkt der Steinwolle		> 1000 °C	DIN 4102 Teil 17
Längenbezogener Strömungswiderstand	kPa·s/m ²	6.2	
Konformitäts-Zertifikat	CE	No. K1-0751-CPD-087.0	
AS-Qualität		Anwendung in Verbindung mit austenitischen Stählen	AGI Q 132
<i>*darüber Bindemittelverflüchtigung</i>			



Anhang D3: Datenblatt Flumroc Dämmplatte 3

Flumroc-Dämmplatte 3



Vorteile

- Schmelzpunkt > 1000 °C
- nicht brennbar
- Wasser abweisend
- diffusionsoffen
- standfest
- hinterlüftungssicher
- schnell und einfach zu verarbeiten
- recycelbar

Produktbeschreibung

Die kompakte Steinwolldämmplatte 3 mit hohem Wärmedämmvermögen ist in vielen Bereichen einsetzbar.

Anwendungsbereich

Wärme- und Schalldämmung in hinterlüfteten Fassaden mit Holzunterkonstruktionen, in Blechkassetten bei Industriefassaden, als Schalldämmung in Trennwänden.

Physikalische Materialkennwerte	Zeichen	Beschreibung/Messwert	Norm/Vorschrift
Rohdichte im Mittel	ρ_a	ca. 60 kg/m ³	EN 1602
Wärmeleitfähigkeit	λ_D	0.033 W/(m K)	SIA Merkblatt 2001
Spezifische Wärmekapazität	c	830 J/(kg K)	
Diffusionswiderstandszahl	μ	ca. 1	EN 12086
Brandverhalten – Euroklasse	EU	A1	EN 13501-1
Schweizerisches Brandschutz-Zertifikat		No. 14671	VKF
Maximale Anwendungstemperatur		250 °C*	
Schmelzpunkt der Steinwolle		> 1000 °C	DIN 4102 Teil 17
Längenbezogener Strömungswiderstand	kPa·s/m ²	18.5	
Konformitäts-Zertifikat	CE	No. K1-0751-CPD-087.0	
AS-Qualität		Anwendung in Verbindung mit austenitischen Stählen	AGI Q 132
*darüber Bindemittelverflüchtigung			

Anhang D4: Datenblatt pro clima Intello

INTELLO

Hochleistungs-Dampfbremse für faserförmige Matten- und Plattendämmstoffe



Technische Daten

Stoff		
Vlies	Polypropylen	
Membran	Polyethylen-Copolymer	
Eigenschaft	Regelwerk	Wert
Farbe		weiß-transparent
Flächengewicht	DIN EN 1849-2	85 ± 5 g/m ²
Dicke	DIN EN 1849-2	0,20 ± 0,05 mm
Dampfdiffusionswiderstandszahl μ	DIN EN 1931	37.500
sd-Wert	DIN EN 1931	7,50 ± 0,25 m
sd-Wert feuchtevariabel	DIN EN ISO 12572	0,25 - >25 m
Brandverhalten	DIN EN 13501-1	E
Brandkennziffer (CH)	VKF	5.3
Höchstzugkraft längs/quer	DIN EN 12311-2	130 N/5 cm / 105 N/5 cm
Dehnung längs/quer	DIN EN 12311-2	90 % / 90 %
Weiterreißwiderstand längs/quer	DIN EN 12310-1	70 N / 70 N
Dauerhaftigkeit nach künstl. Alterung	DIN EN 1296 / DIN EN 1931	bestanden
Temperaturbeständigkeit		-40 °C bis +80 °C
Wärmeleitfähigkeit		0,17 W/mK
CE-Kennzeichnung	DIN EN 13984	vorhanden

Einsatzbereich

Als Dampfbremse und Luftdichtungsbahn bei allen außen diffusionsoffenen Konstruktionen z. B. mit Unterdeck- / Unterspannbahnen (pro clima SOLITEX) oder Holzfaser- und MDF-Platten einsetzbar. Für ein hohes Bauschadensfreiheitspotential bei bauphysikalisch anspruchsvollen Konstruktionen wie diffusionsdichten Flach-/Steildächern und Gründächern. Auch bei extremen Außenklimabedingungen wie im Hochgebirge. Weiterführende Informationen enthält die [Studie](#) „Berechnung des Bauschadensfreiheitspotentials von Wärmedämmkonstruktionen in Holzbau- und Stahlbauweise“.

Lieferformen

Artikelnummer	GTIN	Länge	Breite	Gefaltet	Inhalt	Gewicht	Verpackungseinheit
10077	4026639011985	50 m	3 m		150 m ²	14 kg	Rollen
10090	4026639011190	50 m	1,5 m		75 m ²	7 kg	Rollen
10091	4026639011176	20 m	1,5 m		30 m ²	3 kg	Rollen
12221	4026639122216	50 m	3 m		150 m ²	14 kg	Rollen

Vorteile

- ✓ Maximale Sicherheit für die Dämmkonstruktion
- ✓ Bester Schutz vor Bauschäden und Schimmel auch bei unvorhergesehenem Feuchteintrag
- ✓ Besonders großer, in allen Klimabereichen wirksamer, feuchtevariabler Diffusionswiderstand mit mehr als 100-facher Spreizung (s_d -Wert von 0,25 m bis über 25 m)
- ✓ Im Winter diffusionsdichter, für hohen Feuchteschutz
- ✓ Im Sommer s_d -Wert nur 0,25 m, für die Rücktrocknung

Die dargestellten Sachverhalte beziehen sich auf den Stand der aktuellen Forschung und der praktischen Erfahrung. Wir behalten uns Änderungen der empfohlenen Konstruktionen und der Verarbeitung sowie die Weiterentwicklung und die damit verbundene Qualitätsänderung der einzelnen Produkte vor. Wir informieren Sie gern über den aktuellen technischen Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Verlegung.

Weitere Informationen über die Verarbeitung und Konstruktionsdetails enthalten die pro clima Planungs- und Anwendungsempfehlungen. Bei Fragen erreichen Sie die technische Hotline von pro clima unter 0 62 02 - 27 82.45.

MOLL
bauböologische Produkte GmbH
 Rheinalstraße 35 - 43
 D-68723 Schwetzingen
 Fon: +49 (0) 62 02 - 27 82.0
 Fax: +49 (0) 62 02 - 27 82.21
 eMail: info@proclima.de





Anhang D5: Datenblatt Fermacell Gipsfaser-Platte

fermacell

FERMACELL Gipsfaser-Platten

Materialbeschreibung

Homogene gipsgebundene Trockenbauplatte mit Papierfasern, werkseitig hydrophobiert.

Einsatzbereiche

Innenanwendung für Wand, Decke und Boden.

Zulassungen

Bauaufsichtliche Zulassung	ETA-03/0050
Baustoffklasse gem. DIN EN 13501-1	nichtbrennbar, A2
Kennzeichnung gem. DIN EN 15283-2	GF-I-W2-C1
Plattendicke	10/12,5/15/18 mm

Maßtoleranzen bei Ausgleichsfeuchte für Standardplattenformate

Länge, Breite	+ 0 / - 2 mm
Diagonaldifferenz	≤ 2 mm
Dickentoleranz	± 0,2 mm

Kennwerte

Rohdichte	1150 ± 50 kg/m ³
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	μ = 13
Wärmeleitfähigkeit	λ = 0,32 W/mK
Spezifische Wärmekapazität	c = 1,1 kJ/kgK
Brinellhärte	30 N/mm ²
Dickenquellung nach 24h Wasserlagerung	< 2%
thermischer Ausdehnungskoeffizient	0,001 %/K
Dehnung/Schwindung bei Veränderung der rel. Luftfeuchtigkeit um 30% (20°C)	0,25 mm/m
Ausgleichsfeuchte bei 65% rel. Luftfeuchtigkeit und 20°C Lufttemperatur	1,3%
PH-Wert	7 – 8

Weitere Daten und Informationen entnehmen Sie bitte der Europäischen Technischen Zulassung ETA-03/0050

Oberflächen

Vorder- und Rückseiten geschliffen, mit Aufdruck der Produktionsdaten und Zulassungen auf der Rückseite.

FERMACELL Kundeninformation (freecall):

Telefon: 0800 - 5235665
 Telefax: 0800 - 5356578
 E-Mail: Info@xella.com
www.fermacell.de

Stand 12/2010. Technische Änderungen vorbehalten. Aktuelle Verarbeitungsanleitung beachten!
 Es gilt die jeweils aktuelle Auflage. FERMACELL® ist eingetragene Marke der XELLA-Gruppe.

Seite 1 von 1

Lagerung

Auf Paletten liegend verpackt, vor Feuchtigkeitseinflüssen, insbesondere Regen, zu schützen.

Verarbeitung

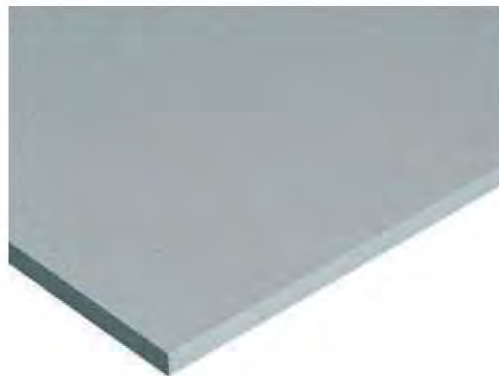
Mit herkömmlichen Holzbearbeitungsmaschinen, beim Zuschnitt sollten generell hartmetallbestückte Werkzeuge eingesetzt werden.

Unterkonstruktionsabstand

Wand	≤ Dicke der Platten [mm] x 50
Decke	≤ Dicke der Platten [mm] x 35

Beschichtung

Gespachtelte, gestrichene, verputzte oder geflieste Oberflächen.



Anhang D6: Datenblatt isofloc LM

isofloc® LM



ÜBERSICHT TECHNISCHE DATEN:

Zulassung	EU	Europäische Technische Zulassung ETA-05/0226
	D	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-280
Zusammensetzung	Fasern aus Zeitungspapier, Additive < 10 %	
Anwendung	Zellulosedämmstoff zur maschinellen Verarbeitung im Trocken- und Nassverfahren in Wärme- und Schallschutzkonstruktionen	
Holzschutz	D	einsetzbar in allen Konstruktionen nach DIN 68800-2
Fremdüberwachung	MPA NRW, EMPA	
Wärmeleitfähigkeit λ	EU	0,038 W/(m · K) bei 30-60 kg/m ³ Nennwert λ_0 nach ETA-05/0226
	CH	0,038 W/(m · K) bei 25-60 kg/m ³ SIA
	D	0,040 W/(m · K) bei 30-60 kg/m ³ Bemessungswert
Spezifische Wärmekapazität c	2150 J/(kg · K)	
Brandverhalten	EU	B-s2,d0 nach DIN EN 13501-1 und ETA-05/0226
	CH	BKZ 5,3 gem. VKF
	D	E gem. DIN EN 13501-1 entspricht B2 nach DIN 4102
Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ	1-2	
Resistenz gegen Schimmelwachstum	Keine Entwicklung nach ISO 846	
Längenspezifischer Strömungswiderstand r	≥ 5 kPa · s/m ² bei 30 kg/m ³ 18,5 kPa · s/m ² bei 40 kg/m ³ nach DIN EN 29053	
Gleichgewichtsfeuchte	Ca. 8 % bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit	
Treibhausgasemission*	0,392 kg/kg	
Primärenergieaufwand*	nicht erneuerbar	7,43 MJ/kg (Herstellung, Additive, Transport)
	gesamt	10,0 MJ/kg (inkl. Entsorgung)
Umweltbelastungspunkte*	1270 UBP/kg	
Lieferform	300 / 350 kg Grossballen, 12,5-kg-Säcke, palettiert	

* Weitere Informationen auch unter www.eco-bau.ch oder www.baubook.at



Ihre Vorteile mit isofloc®:

- hervorragende Werte im Wärme-, Kälte- und Schallschutz
- sorptionsfähig und feuchteausgleichend
- geprüfte Brandsicherheit
- mit einem Material alle Dämmstärken und Formen fugen- und schnittfrei realisierbar
- ausgezeichnete Wirtschaftlichkeit
- geringster Produktionsenergieverbrauch aller industriell gefertigten Dämmstoffe
- hochwertige Ausbildung der Fachbetriebe

Gerne beantworten wir Ihre Fragen zu isofloc® LM:

isofloc AG
Soorpark
CH-9606 Bütschwil
Telefon: +41 (0)71 313 91 00
Fax: +41 (0)71 313 91 09
E-Mail: info@isofloc.ch
Internet: www.isofloc.ch



Anhang D7: Datenblatt Fermacell Gipsfaser-Platte

FERMACELL Gipsfaser-Platten

FERMACELL Gipsfaser-Platten bestehen aus Gips und Papierfasern, die in einem Recyclingverfahren gewonnen werden. In computer-gesteuerten Fertigungsstraßen wird eine homogene Mischung dieser beiden natürlichen Rohstoffe nach Zugabe von Wasser – ohne weitere Bindemittel – unter hohem Druck zu stabilen und geruchsneutralen Platten gepresst, getrocknet und auf die jeweiligen Formate zugeschnitten.



Kenndaten				
Maßtoleranzen bei Ausgleichsfeuchte für Standardplattenformate				
Länge, Breite	±1 mm			
Diagonaldifferenz	≤2 mm			
Dicke: 10/12,5/15/18	±0,3 mm			
Kennwerte				
Rohdichte (Produktionsvorgabe)	1150 ± 50 kg/m ³			
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ	13			
Wärmeleitfähigkeit λ	0,32 W/mK			
spezifische Wärmekapazität c	1,1 kJ/kgK			
Brinellhärte	30 N/mm ²			
Dickenquellung nach 24 Std. Wasserlagerung	← 2%			
thermischer Ausdehnungskoeffizient	0,001 %/K			
Dehnung/Schwindung bei Veränderung der rel. Luftfeuchte um 30 % (20 °C)	0,25 mm/m			
Ausgleichsfeuchte bei 65 % rel. Luftfeuchte und 20 °C Lufttemperatur	1,3 %			
Baustoffklasse gemäß DIN EN 13501-1 (nicht brennbar)	A2			
Brandkennziffer nach VKF	6q,3			
pH-Wert	7-8			
Rechenwerte der Moduln in N/mm ²				
[Zulassungsnummer: Z-9.1-434 / ETA-03/0050]				
E-Modul Biegung rechtwinklig zur Plattenebene $E_{Dy} / E_{m,mean}$	3800			
E-Modul Biegung in Plattenebene $E_{Bz} / E_{m,mean}$	3800			
E-Modul Zug $E_z / E_{t,mean}$	3800			
E-Modul Druck $E_D / E_{c,mean}$	3800			
Schubmodul G Biegung rechtwinklig zur Plattenebene G_{xy} / G_{mean}	1600			
Schubmodul G Biegung in Plattenebene G_{xz} / G_{mean}	1600			
Zulässige Spannungen in N/mm ² für Berechnungen nach DIN 1052				
[Zulassungsnummer: Z-9.1-434]				
Biegung rechtwinklig zur Plattenebene zul σ_{Dy}	1,2			
Biegung in Plattenebene zul σ_{Bz}	1,1			
Zug in Plattenebene zul σ_{zx}	0,5			
Druck in Plattenebene zul σ_{Dx}	2,0			
Druck rechtwinklig zur Plattenebene zul σ_D	2,5			
Abscheren in Plattenebene zul τ_{zx}	0,3			
Abscheren rechtwinklig zur Plattenebene zul τ_{xy}	0,6			
Charakteristische Festigkeiten in N/mm ² in Abhängigkeit von der Nenndicke der Platten für Berechnungen nach DIN 1052 [Zulassungsnummer: Z-9.1-434 / ETA-03/0050]				
	Nenndicke der Platten in mm			
	10	12,5	15	18
Plattenbeanspruchung				
Biegung $f_{m,k}$	4,6	4,3	4,0	3,6
Schub $f_{v,k}$	1,9	1,8	1,7	1,6
Scheibenbeanspruchung				
Biegung $f_{m,k}$	4,3	4,2	4,1	4,0
Zug $f_{t,k}$	2,5	2,4	2,4	2,3
Druck $f_{c,k}$	8,5	8,5	8,5	8,5
Schub $f_{v,k}$	3,7	3,6	3,5	3,4

Anhang E1: Widerstandsisotherme

Aarwangen:

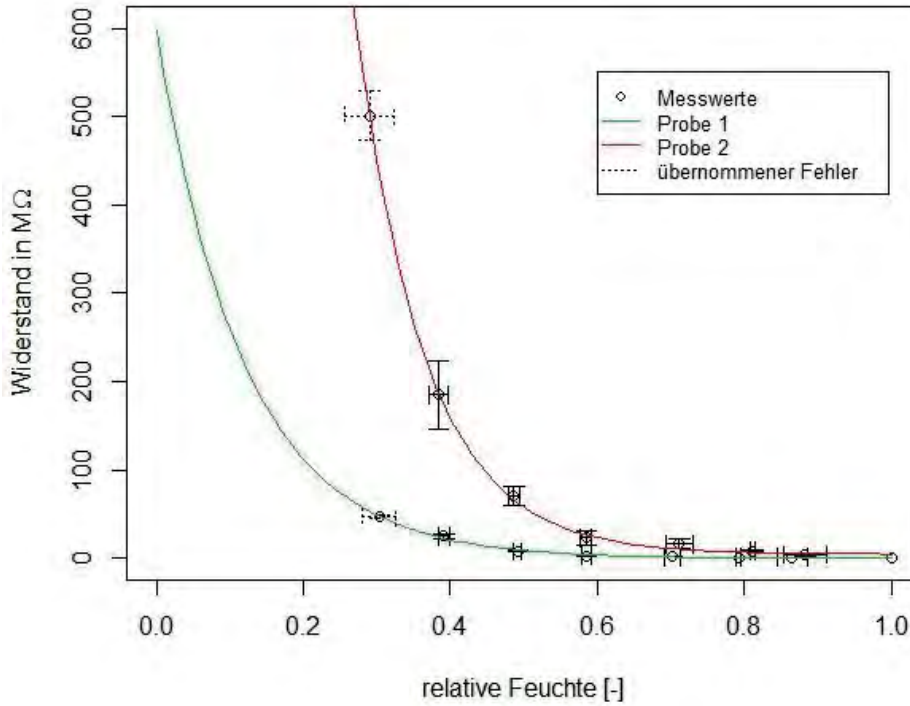


Abbildung 102: Widerstandsisothermen des Mauerwerksteins in Aarwangen (M_1) bei 30 °C als Regressionskurven.

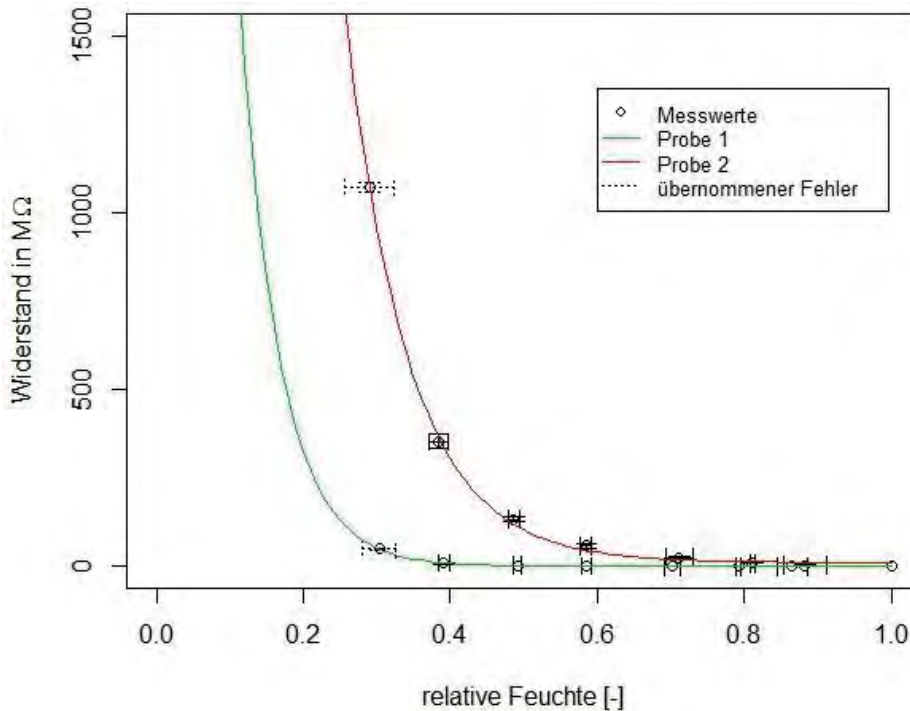


Abbildung 103: Widerstandsisothermen des Aussenputzes in Aarwangen (M_2) bei 30 °C als Regressionskurven.



Brütteln:

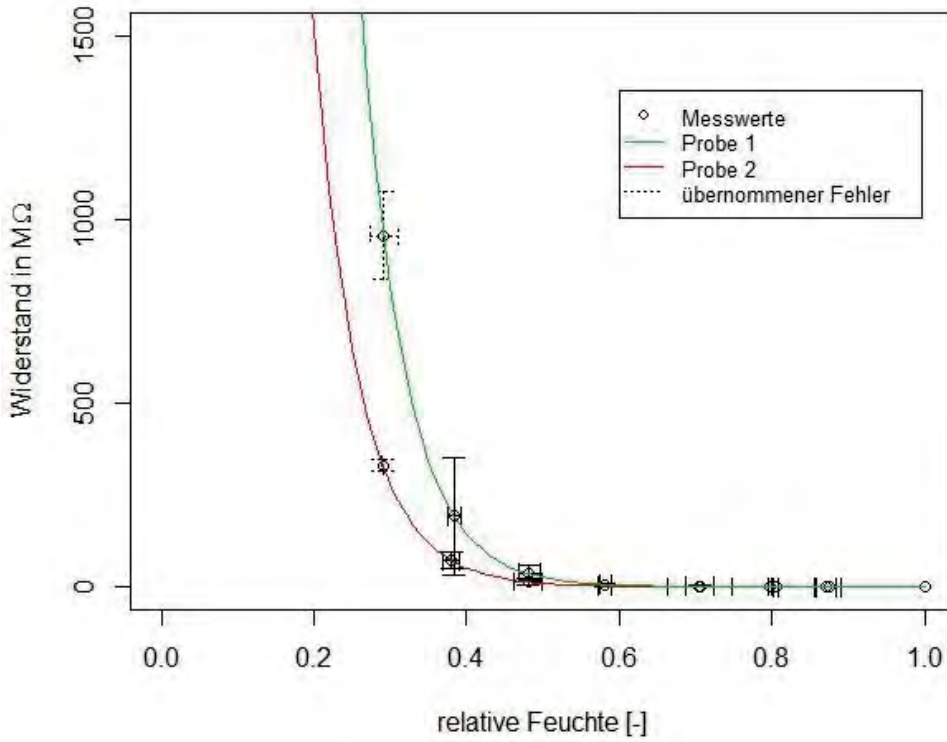


Abbildung 104: Widerstands Isothermen des Mauerwerksteins in Brütteln (M_3) bei 30 ° C als Regressionskurven.

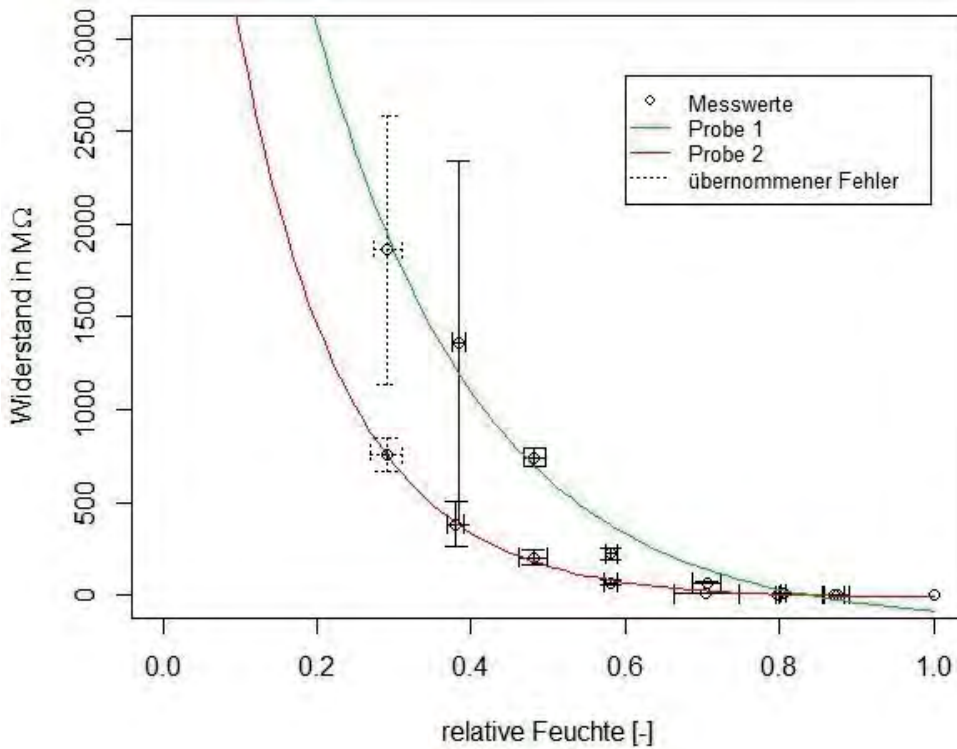


Abbildung 105: Widerstands Isothermen des Aussenputzes in Brütteln (M_4) bei 30 ° C als Regressionskurven.

Bütschwil:

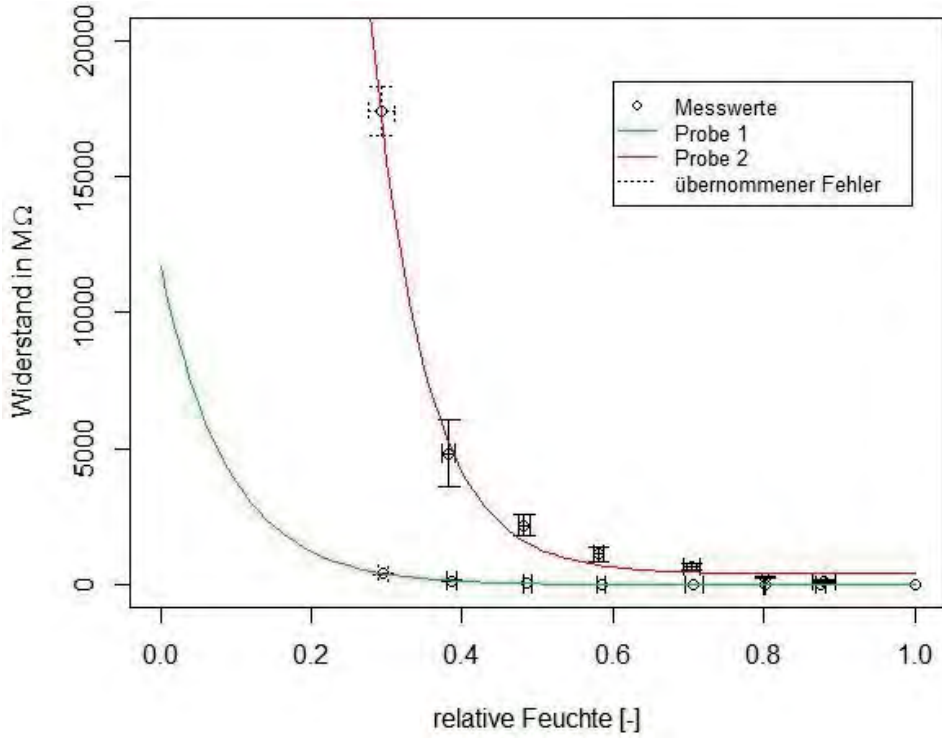


Abbildung 106: Widerstandsisothermen des Mauerwerksteins in Bütschwil (M_5) bei 30 ° C als Regressionskurven.

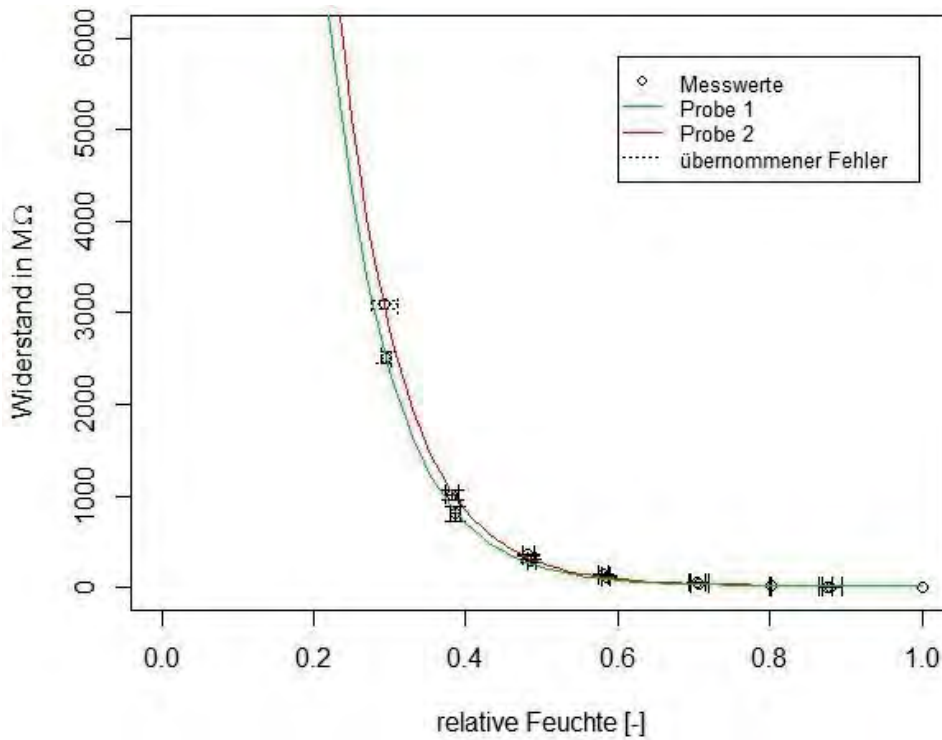


Abbildung 107: Widerstandsisothermen des Aussenputzes in Bütschwil (M_6) bei 30 ° C als Regressionskurven.



Anhang E2: Sorptionsisotherme

Tabelle 54: Volumenmessung durch Wasserverdrängung. Mittelwerte, Fehler und 95 % Konfidenzintervall.

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
V_1	138.3	73.632	114.9822	100.54	67.928	78.416
V_2	141.342	75.478	113.1787	101.355	68.049	80.906
V_3	139.374	78.785	114.091	101.979	65.982	80.693
V_4	144.088	77.086	114.288	100.173	64.822	79.99
V_5	141.543	76.442	114.101	103.19	69.946	81.691
\bar{x}	140.9294	76.2846	114.1282	101.4474	67.3454	80.3392
σ^2	4.96	3.65	0.41	1.44	3.96	1.52
σ	2.23	1.91	0.64	1.20	1.99	1.23
n	5	5	5	5	5	5
t – Quantil	2.776	2.776	2.776	2.776	2.776	2.776
dww	6.19	5.31	1.79	3.34	5.52	3.43

M_i = Bezeichnung des Materials

V_i = Verdrängtes Volumen in cm^3 ; der Index gibt Messnummer an

\bar{x} = Mittelwert in cm^3

σ^2 = Varianz in cm^3

σ = Standardabweichung in cm^3

n = Anzahl Messungen

t – Wert = t – Quantil für einen zweiseitigen Vertrauensbereich von $P = 0.95$

dww = 95 % Konfidenzintervall

IBP:

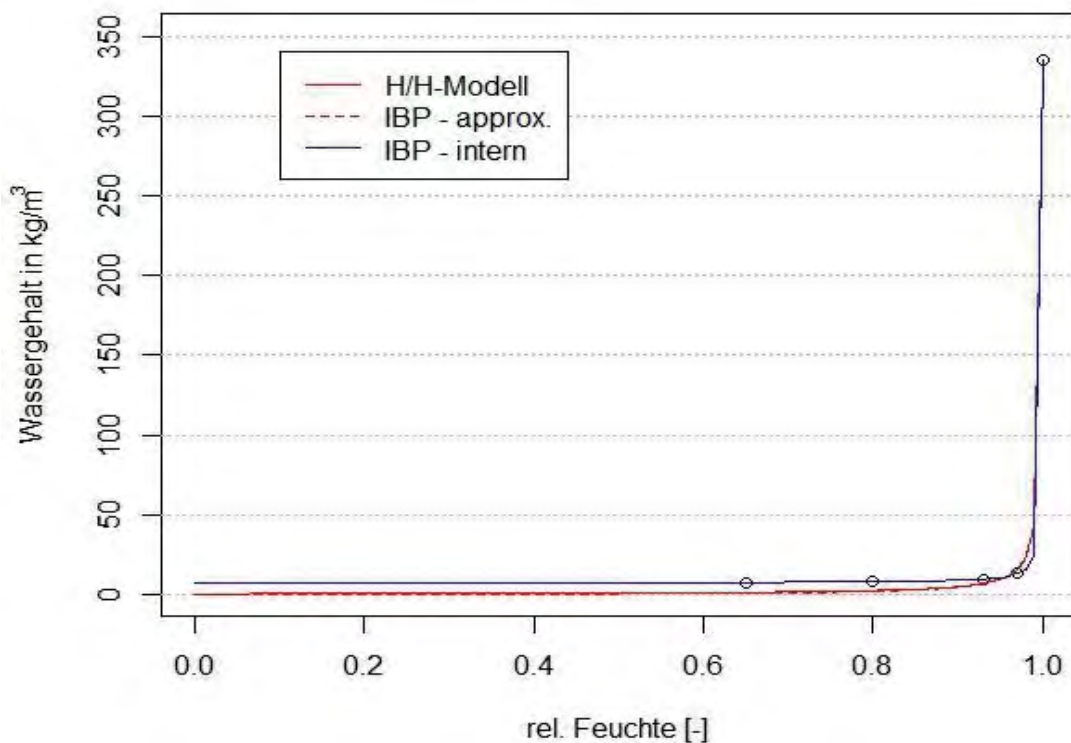


Abbildung 108: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Aarwangen auf Basis der Messwerte des IBP.

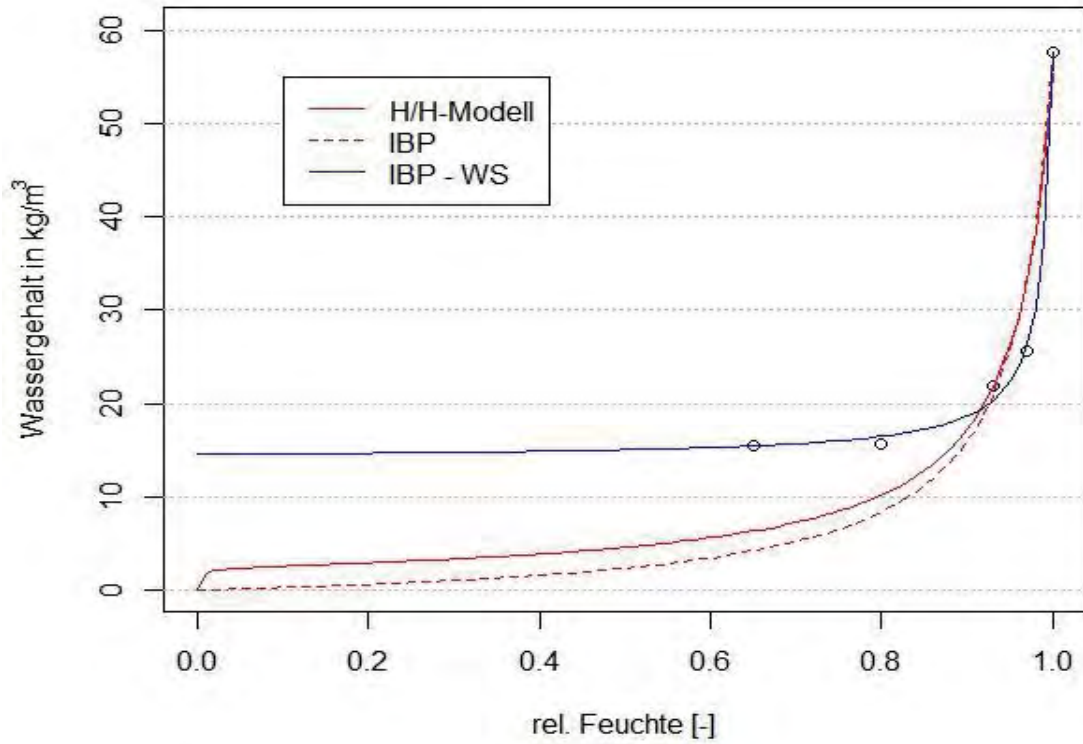


Abbildung 109: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Brüttelen auf Basis der Messwerte des IBP.

Labor an der BFH:

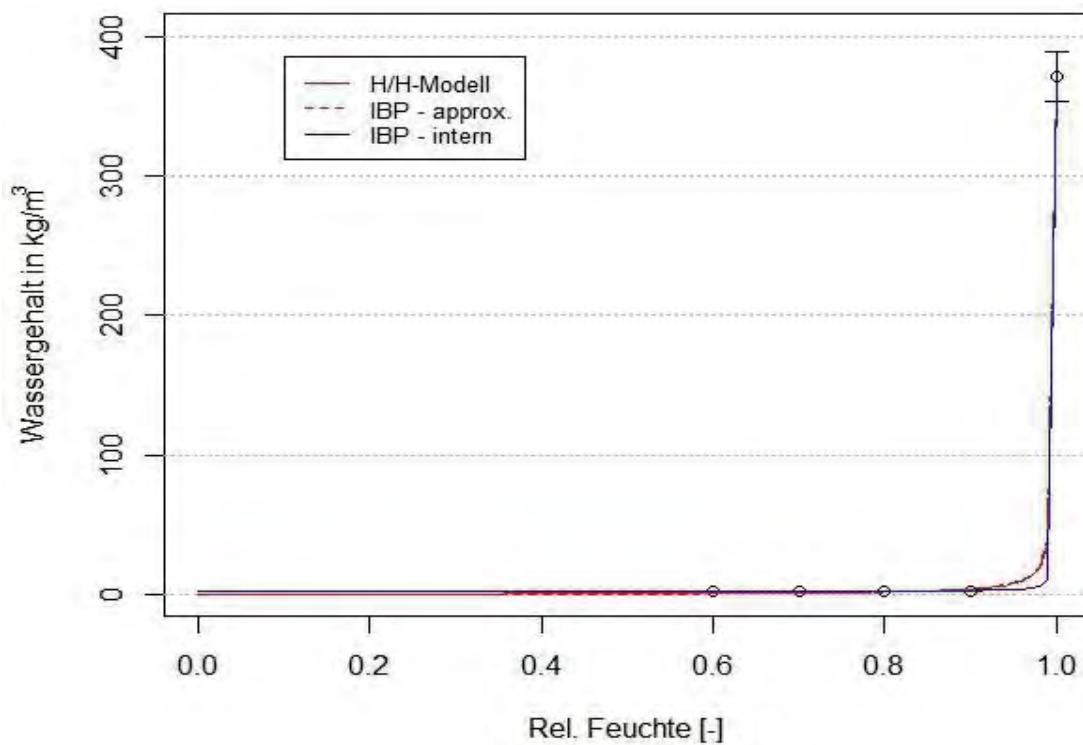


Abbildung 110: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Aarwangen auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.

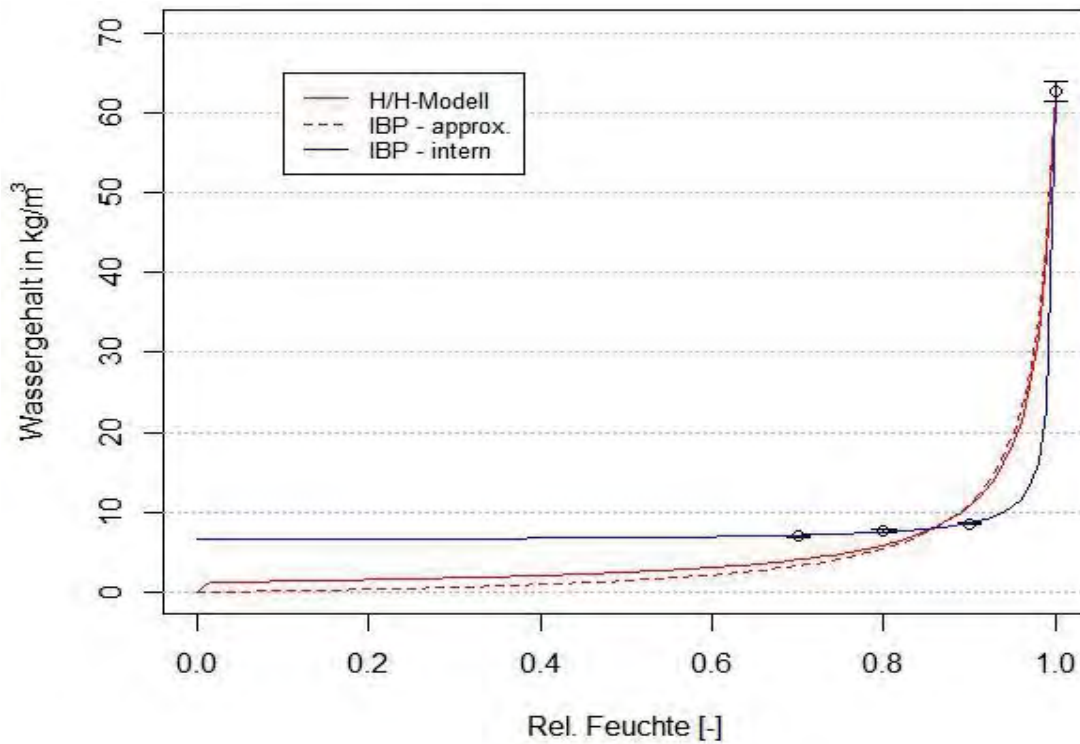


Abbildung 111: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Brüttelen auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.

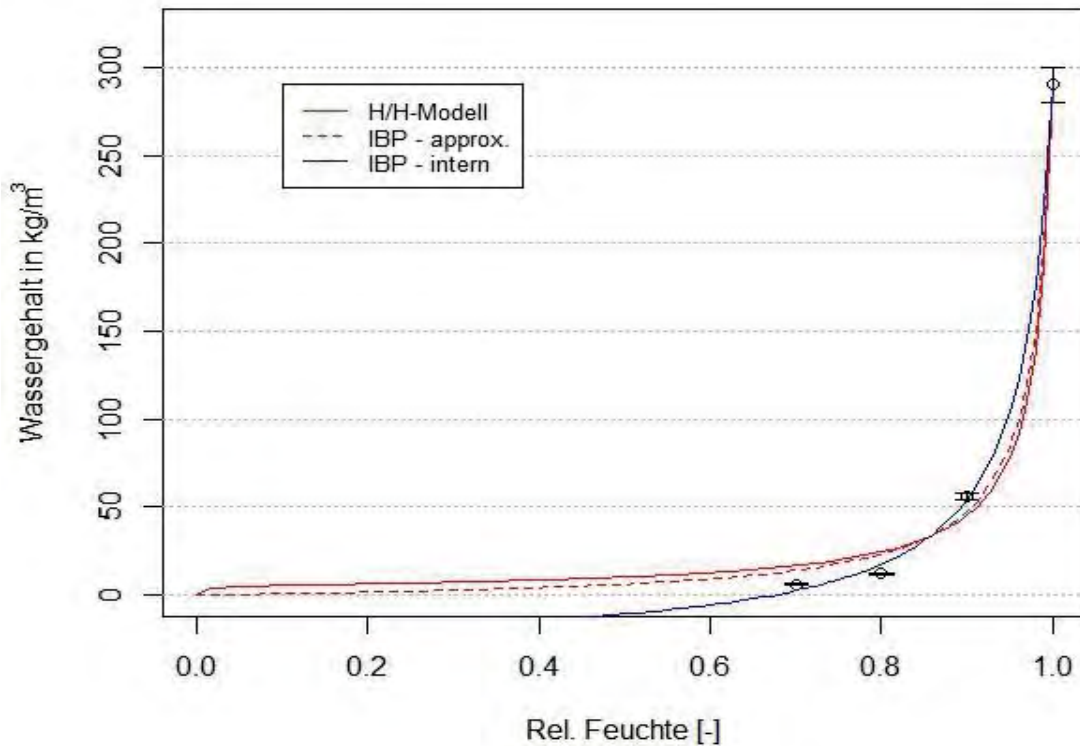


Abbildung 112: Sorptionsisothermen des Aussenputzes in Brüttelen auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.

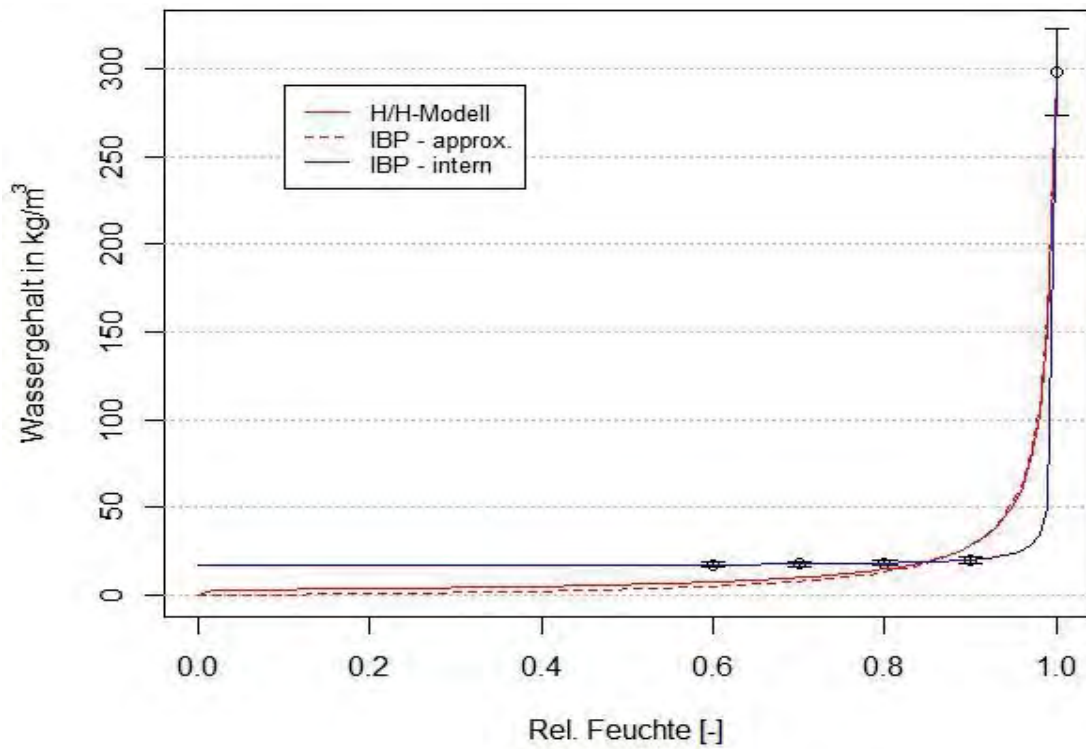


Abbildung 113: Sorptionsisothermen des Mauerwerks in Bütschwil auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.

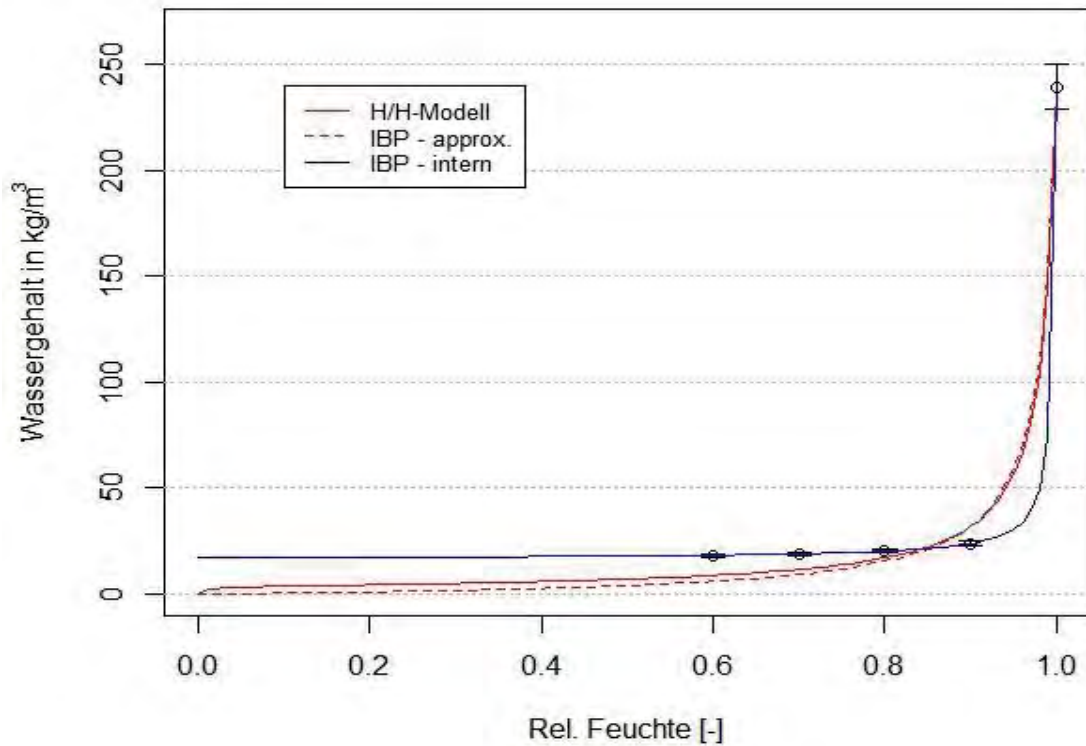


Abbildung 114: Sorptionsisothermen des Aussenputzes in Bütschwil auf Basis der Messwerte aus dem Labor an der BFH.



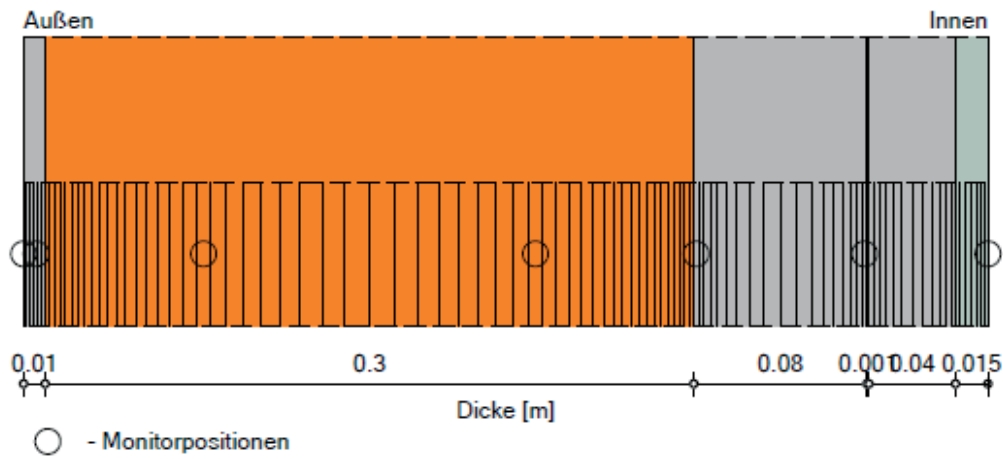
Anhang F1: WUFI Pro[®]-Bericht Aarwangen

Abbildung 115: Bericht der WUFI Pro[®]-Simulation der Nord-West Wand des Objekts in Aarwangen mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.

WUFI[®] Pro 5.3

Bauteilaufbau

Variante: Aarwangen Nord-West



Materialien:

	- *Aussenputz mit Farbe	0.01 m
	- *Hochlochziegel im Verbund	0.3 m
	- Flumroc-Dämmplatte 1	0.08 m
	- INTELLO	0.001 m
	- Flumroc-Dämmplatte 3	0.04 m
	- *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	0.015 m

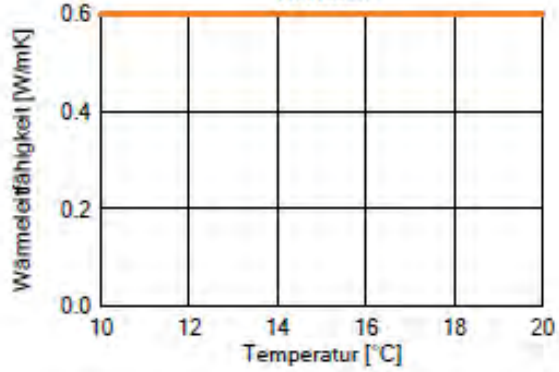
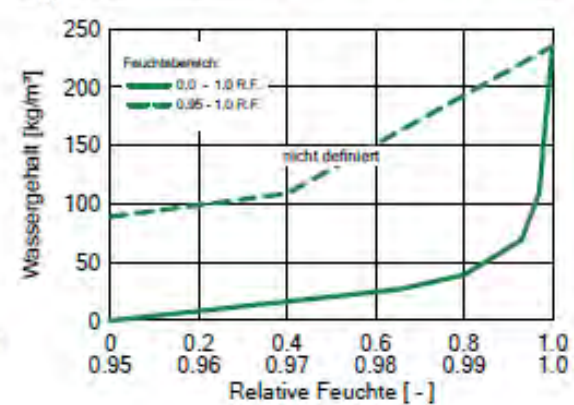
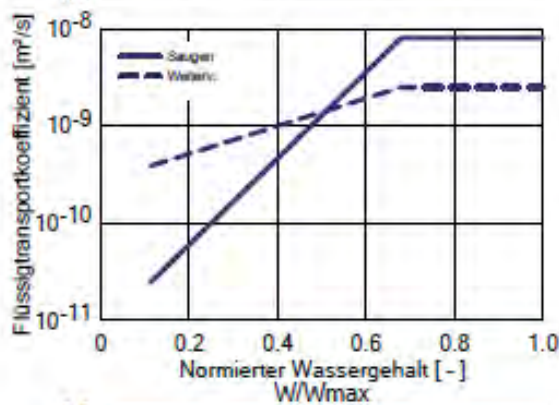
Gesamtdicke: 0.45 m
 Wärmedurchlasswiderstand: 5.7 m²K/W
 U-Wert: 0.17 W/m²K

WUFI® Pro 5.3

Material: *Aussenputz mit Farbe

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1716
Porosität	[m³/m³]	0.346
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.6
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	26



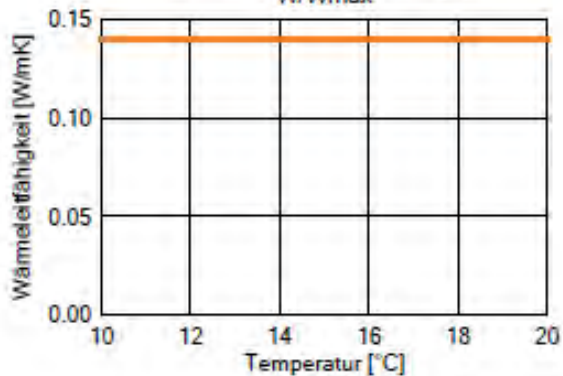
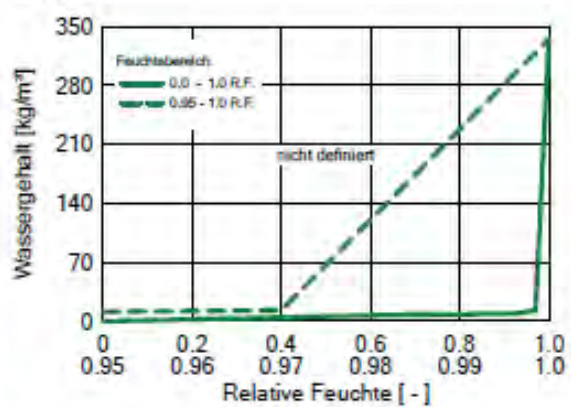
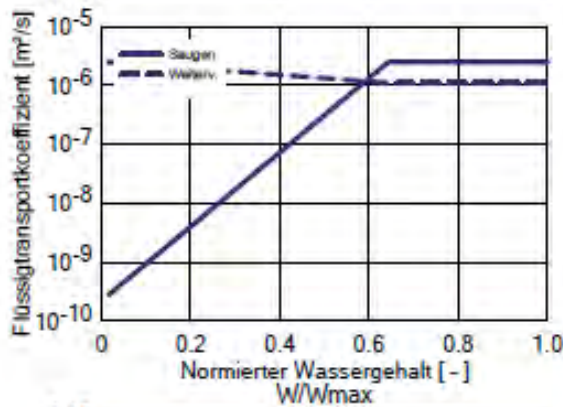
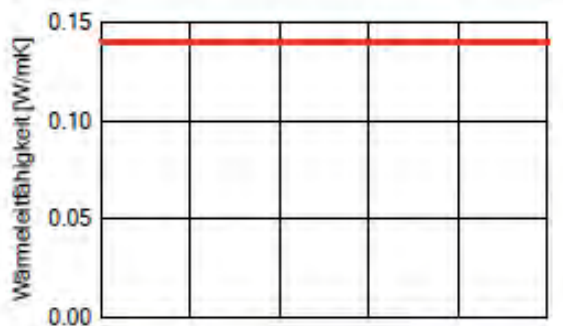


WUFI® Pro 5.3

Material: *Hochlochziegel im Verbund

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1265
Porosität	[m³/m³]	0.52
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.14
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	7.8

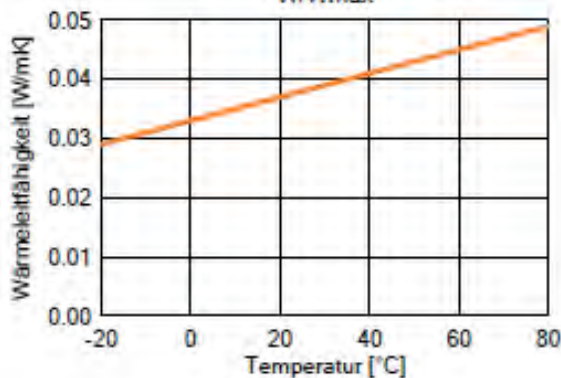
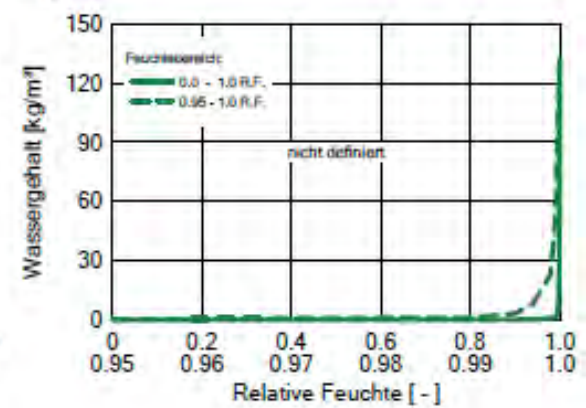
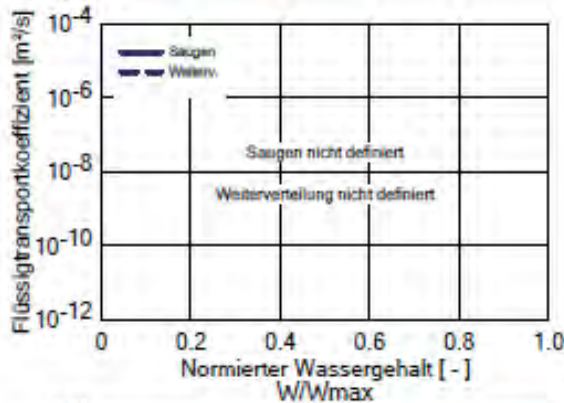
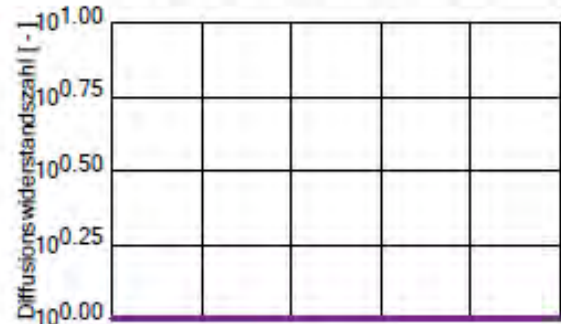


WUFI® Pro 5.3

Material: Flumroc-Dämmplatte 1

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	42.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.985
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	830.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.035
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002



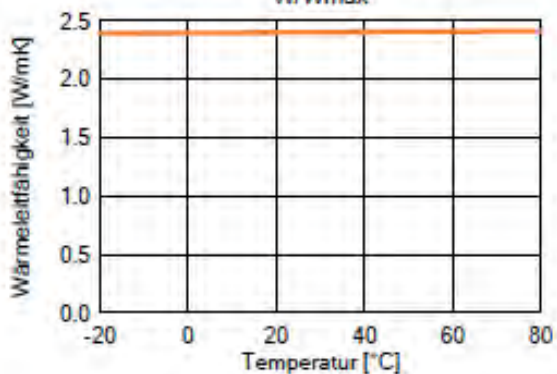
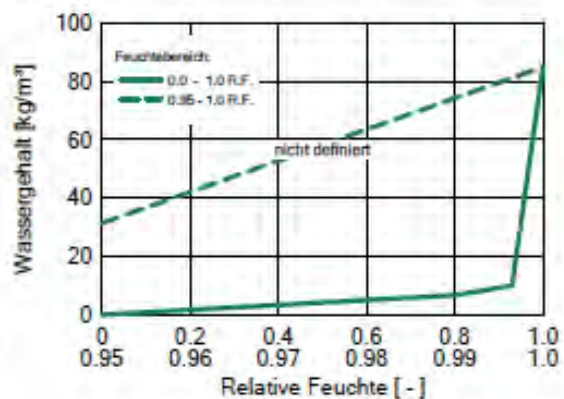
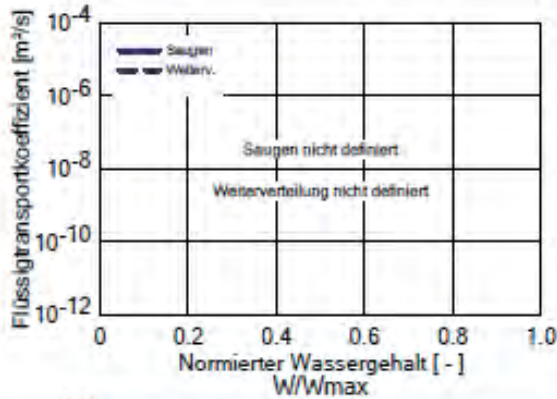
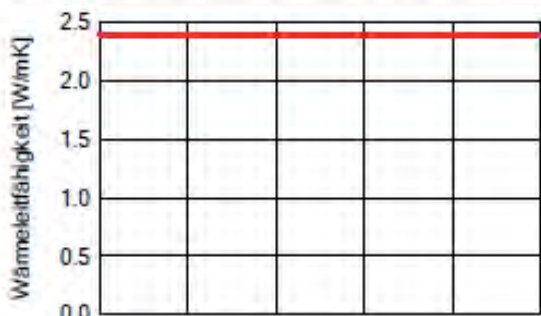


WUFI® Pro 5.3

Material: INTELLO

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	115.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.086
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2500.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	2.4
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	26000.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002

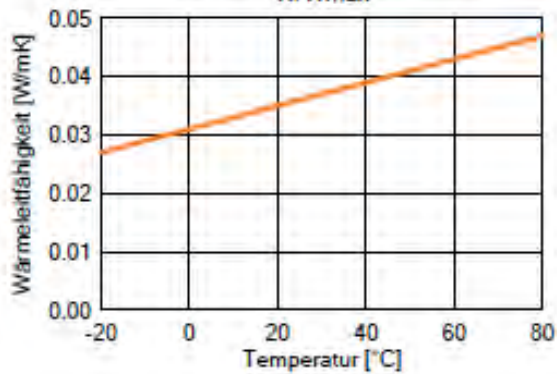
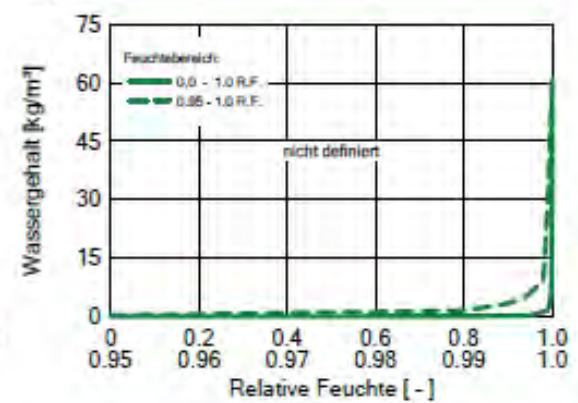
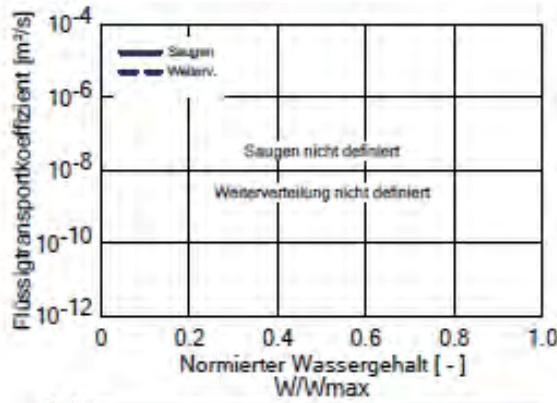


WUFI® Pro 5.3

Material: Flumroc-Dämmplatte 3

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	63.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.977
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	830.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.033
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002



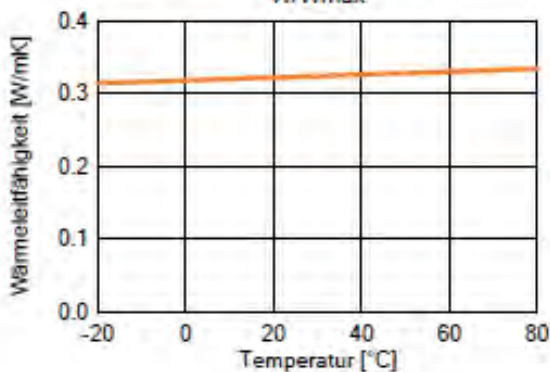
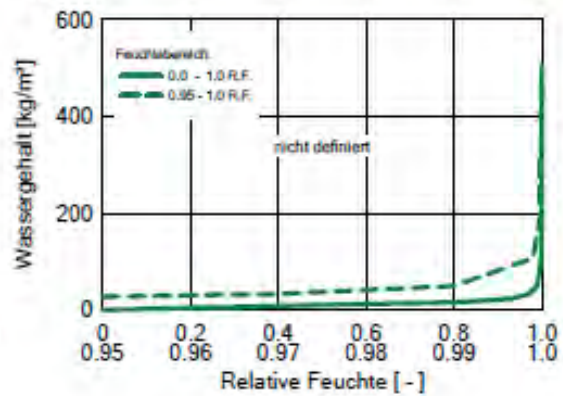
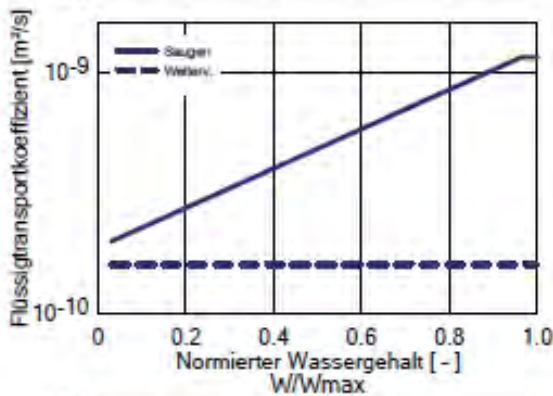
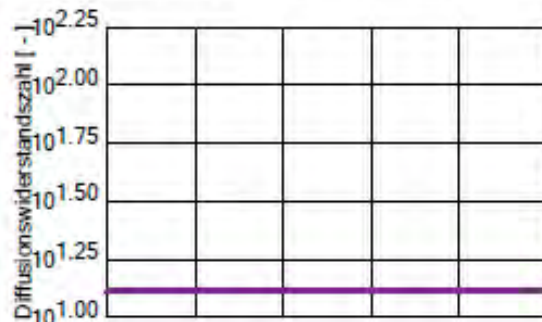
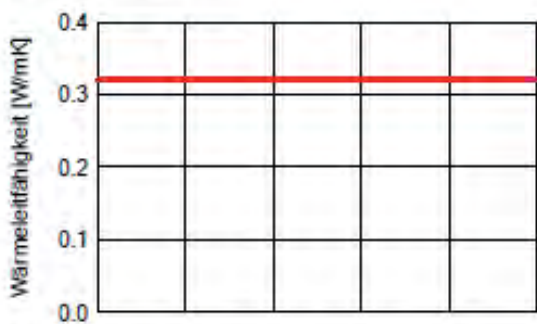


WUFI® Pro 5.3

Material: *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	1150.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.52
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1200.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.32
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	13.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.32



WUFI® Pro 5.3

Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: AarwangenAussen2014-15.02.2017.wac
 Orientierung / Neigung: Nord-West / 90°

Innen (rechte Seite)

Klimaort: AarwangenInnenang.wac

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand - beinhaltet langwelligem Strahlungsanteil	Außenwand	[m ² K/W]	0.0588 ja
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	---
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	Putz normal hell	[-]	0.4
Langwellige Strahlungsemissionszahl	Putz normal hell	[-]	0.9
Anhaftender Anteil des Regens	Keine Regenwasserabsorption	[-]	---
Explizite Strahlungsbilanz			nein

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand	Außenwand	[m ² K/W]	0.125
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	---



WUFI® Pro 5.3

Ergebnisse der letzten Rechnung

Rechenverlauf

Datum/Zeit der Rechnung	21.02.2017 15:48:09
Rechenzeit	0 min,43 sek
Beginn / Ende der Rechnung	15.10.2014 / 01.03.2017
Anzahl der Konvergenzfehler	0

Numerische Qualitätsprüfung

Integral der Ströme, linke Seite (kl,dl)	[kg/m ²]	18.47 -18.08
Integral der Ströme, rechte Seite (kr,dr)	[kg/m ²]	-0.16 0.44
Bilanz 1	[kg/m ²]	0.11
Bilanz 2	[kg/m ²]	0.11

Wassergehalt [kg/m³]

	Start	Ende	Min.	Max.
Gesamtwassergehalt	3.23	3.35	2.24	4.17

Wassergehalt [kg/m³]

Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
*Aussenputz mit Farbe	43.72	50.05	14.26	77.25
*Hochlochziegel im Verbund	8.43	8.74	6.45	10.01
Flumroc-Dämmplatte 1	0.02	0.01	0.01	0.06
INTELLO	7.21	6.45	3.55	23.46
Flumroc-Dämmplatte 3	0.05	0.04	0.01	0.67
*FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	16.84	14.38	5.66	27.55

Zeitintegral der Ströme

Wärmestrom, linke Seite	[MJ/m ²]	-138.02
Wärmestrom, rechte Seite	[MJ/m ²]	-135.41
Feuchteströme, linke Seite	[kg/m ²]	0.4
Feuchteströme, rechte Seite	[kg/m ²]	0.28

Hygrothermische Quellen

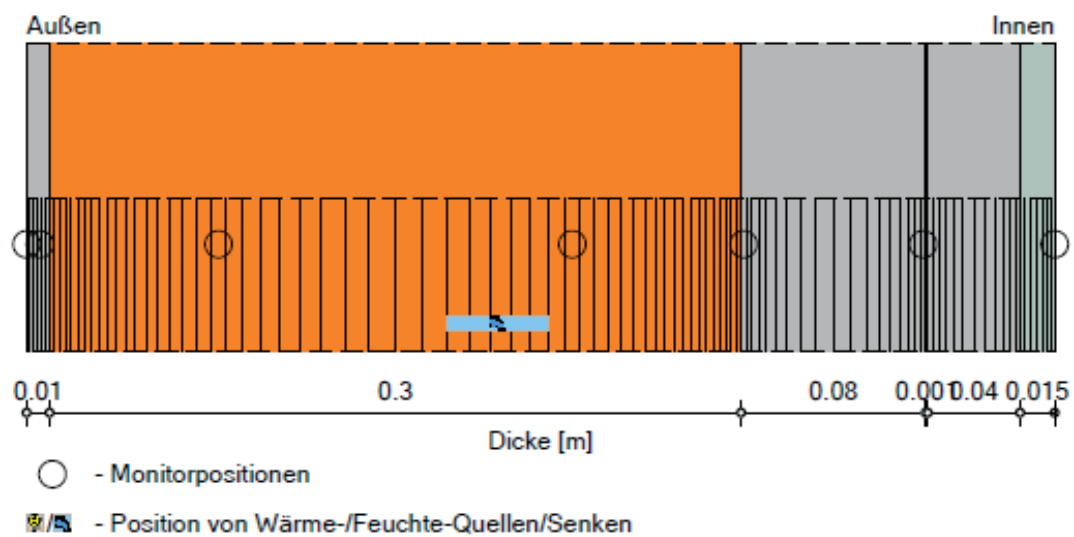
Wärmequellen	[MJ/m ²]	0.0
Feuchtequellen	[kg/m ²]	0.0
Nicht aufgenommene Feuchtequellen	[kg/m ²]	0.0

Abbildung 116: Bericht der WUFI Pro[®]-Simulation der Süd-West Wand des Objekts in Aarwangen mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.







WUFI[®] Pro 5.3

Bauteilaufbau

Variante: Aarwangen Sued-West



Materialien:

	- *Aussenputz mit Farbe	0.01 m
	- *Hochlochziegel im Verbund	0.3 m
	- Flumroc-Dämmplatte 1	0.08 m
	- INTELLO	0.001 m
	- Flumroc-Dämmplatte 3	0.04 m
	- *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	0.015 m

Gesamtdicke: 0.45 m
 Wärmedurchlasswiderstand: 5.7 m²K/W
 U-Wert: 0.17 W/m²K

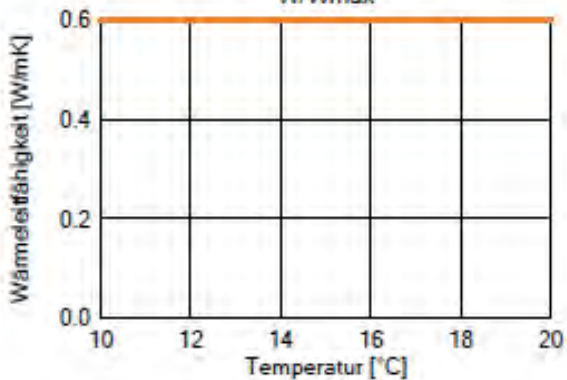
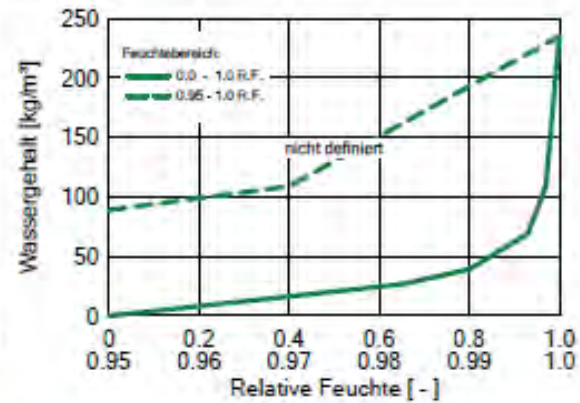
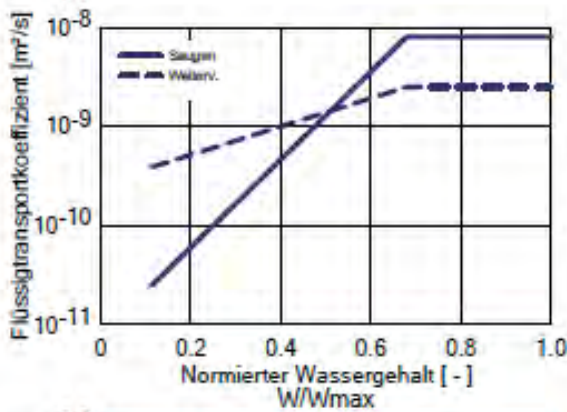
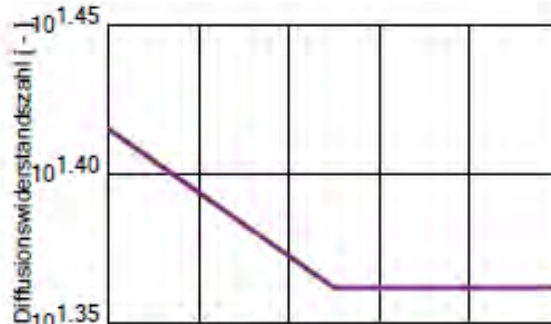
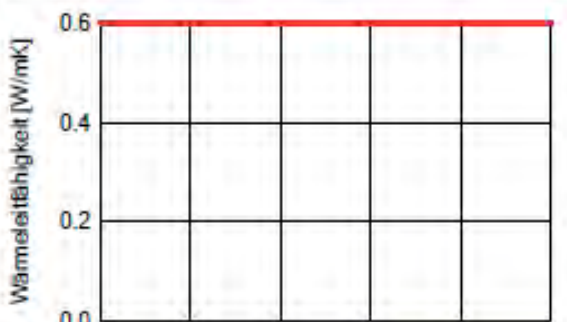


WUFI® Pro 5.3

Material: *Aussenputz mit Farbe

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1716
Porosität	[m³/m³]	0.346
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.6
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	26

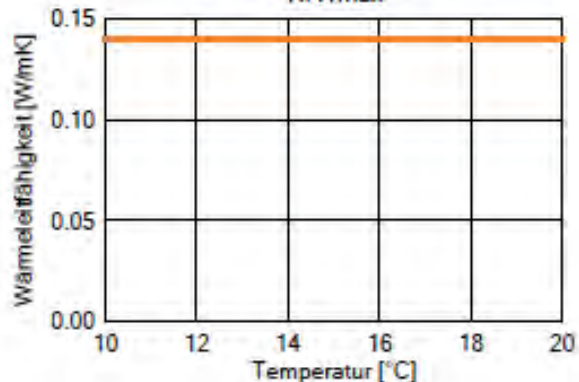
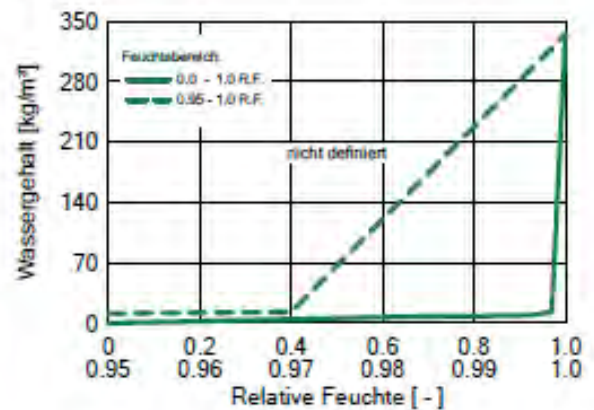
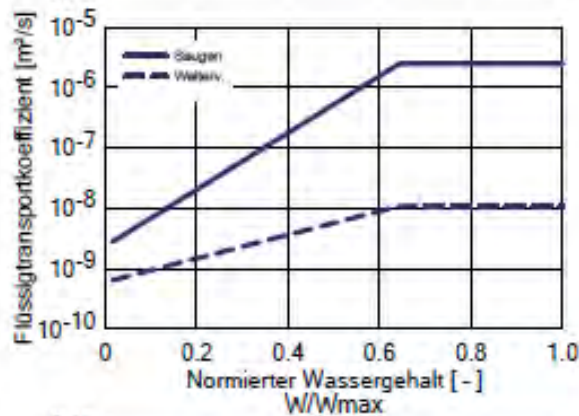


WUFI® Pro 5.3

Material: *Hochlochziegel im Verbund

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	1361.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.52
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.14
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	7.8



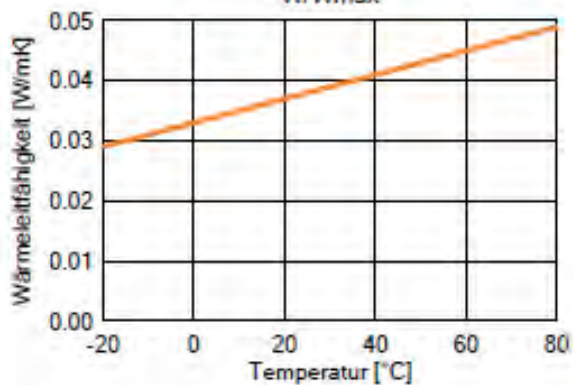
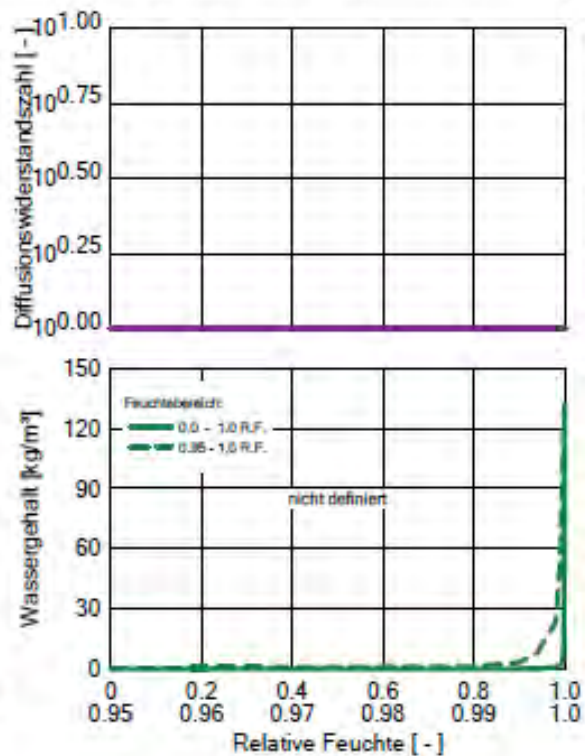
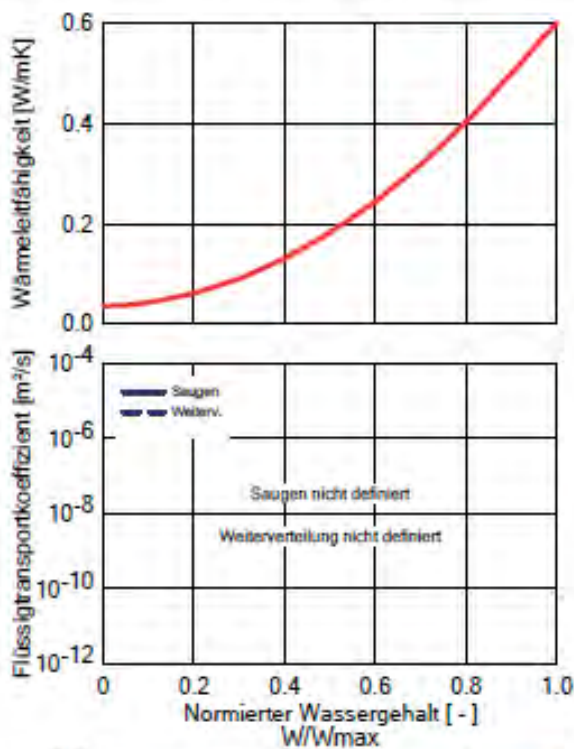


WUFI® Pro 5.3

Material: Flumroc-Dämmplatte 1

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	42.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.985
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	830.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.035
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002

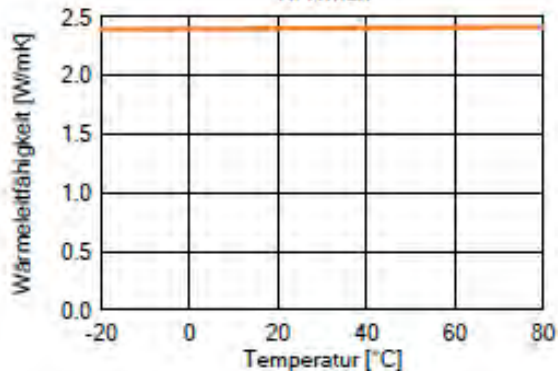
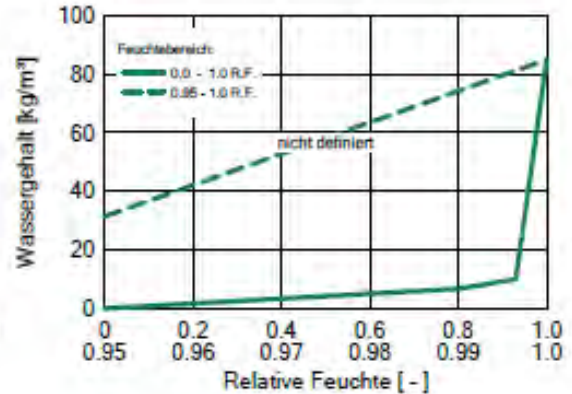
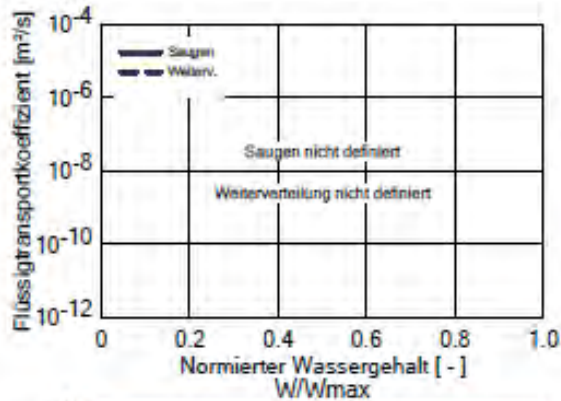
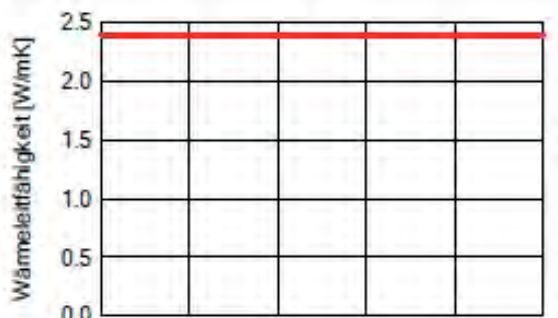


WUFI® Pro 5.3

Material: INTELLO

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	115.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.086
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2500.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	2.4
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	26000.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002



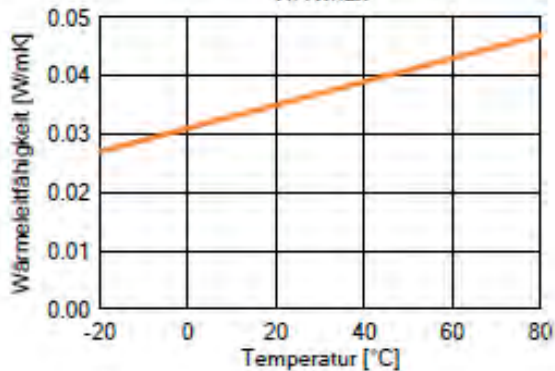
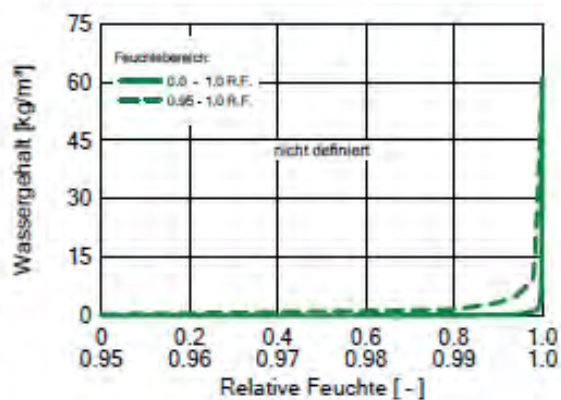
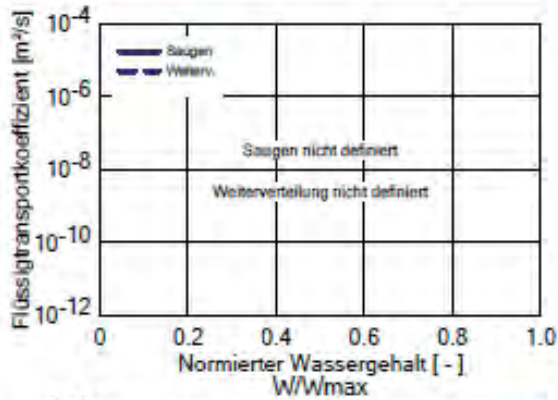
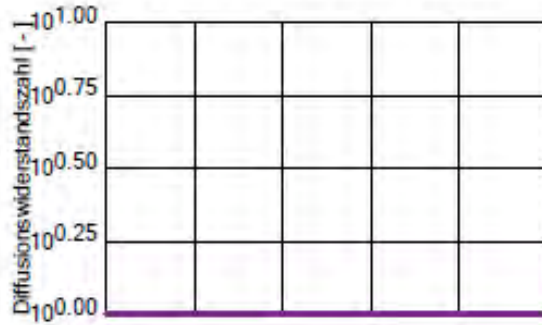


WUFI® Pro 5.3

Material: Flumroc-Dämmplatte 3

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	63.0
Porosität	[m³/m³]	0.977
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	830.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.033
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0.0002

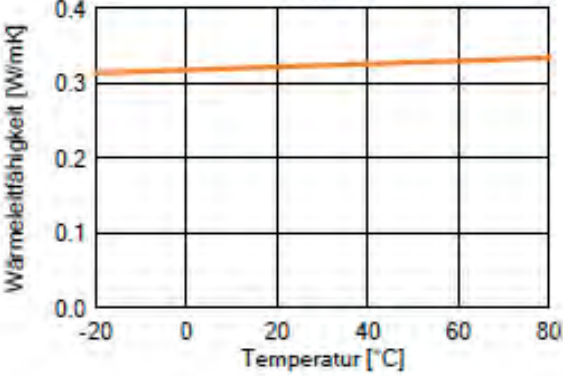
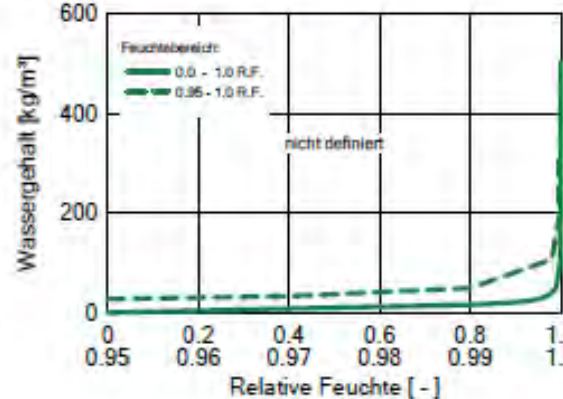
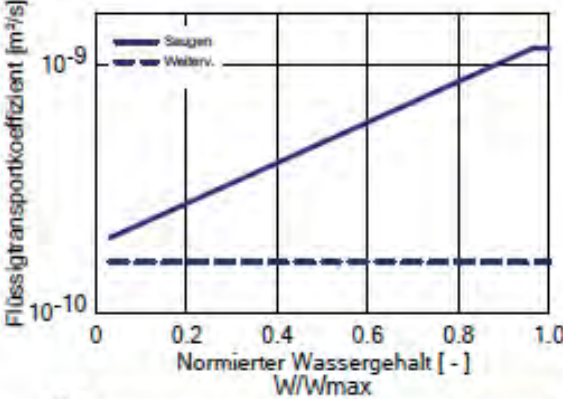
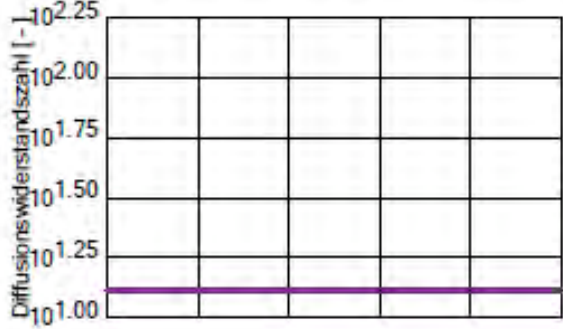


WUFI® Pro 5.3

Material: *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1150.0
Porosität	[m³/m³]	0.52
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1200.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.32
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	13.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0.0002





WUFI® Pro 5.3

Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: AarwangenAussen2014-15.02.2017.wac
Orientierung / Neigung: Süd-West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Klimaort: AarwangenInnenang.wac

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand - beinhaltet langwelligen Strahlungsanteil	Außenwand	[m ² K/W]	0.0588 ja
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	---
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	Putz normal hell	[-]	0.4
Langwellige Strahlungsemissionszahl	Putz normal hell	[-]	0.9
Anhaftender Anteil des Regens	Gemäß Bauteilneigung	[-]	0.7
Explizite Strahlungsbilanz			nein

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand	Außenwand	[m ² K/W]	0.125
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	---

Quellen, Senken

*Hochlochziegel im Verbund

Bezeichnung	Typ		
Quelle1	<i>Feuchtequelle</i>		
	Starttiefe in Schicht	[m]	0.18
	Endtiefe in Schicht	[m]	0.21
	Begrenzung auf freie Wassersättigung	[kg/m ³]	
	Anteil des Schlagregens	[%]	1.4

WUFI® Pro 5.3

Ergebnisse der letzten Rechnung

Rechenverlauf

Datum/Zeit der Rechnung	21.02.2017 15:45:50
Rechenzeit	1 min,27 sek
Beginn / Ende der Rechnung	15.10.2014 / 01.03.2017
Anzahl der Konvergenzfehler	10

Numerische Qualitätsprüfung

Integral der Ströme, linke Seite (kl,dl)	[kg/m ²]	37.26 -38.0
Integral der Ströme, rechte Seite (kr,dr)	[kg/m ²]	-0.15 2.66
Bilanz 1	[kg/m ²]	1.39
Bilanz 2	[kg/m ²]	1.41

Wassergehalt [kg/m³]

	Start	Ende	Min.	Max.
Gesamtwassergehalt	3.1	4.5	2.99	8.57

Wassergehalt [kg/m³]

Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
*Aussenputz mit Farbe	39.10	55.35	12.90	200.31
*Hochlochziegel im Verbund	8.20	12.40	8.19	22.78
Flumroc-Dämmplatte 1	0.01	0.03	0.01	0.08
INTELLO	6.70	6.67	3.63	24.11
Flumroc-Dämmplatte 3	0.04	0.04	0.01	0.69
*FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	15.80	14.41	5.67	27.52

Zeitintegral der Ströme

Wärmestrom, linke Seite	[MJ/m ²]	-127.35
Wärmestrom, rechte Seite	[MJ/m ²]	-122.75
Feuchtestrome, linke Seite	[kg/m ²]	-0.72
Feuchtestrome, rechte Seite	[kg/m ²]	2.5

Hygrothermische Quellen

Wärmequellen	[MJ/m ²]	0.0
Feuchtequellen	[kg/m ²]	4.645
Nicht aufgenommene Feuchtequellen	[kg/m ²]	-0.097
Quelle1 (Feuchtequelle)	[kg/m ²]	4.548



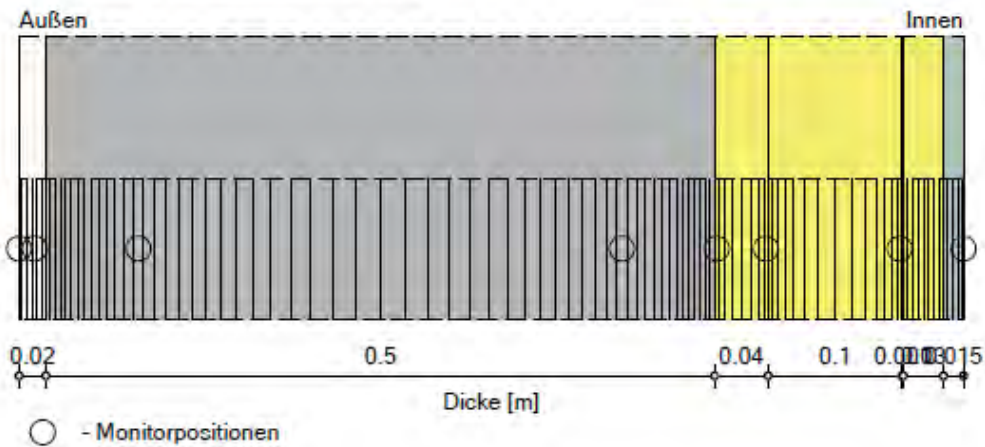
Anhang F2: WUFI Pro[®]-Bericht Brüttelen

Abbildung 117: Bericht der WUFI Pro[®]-Simulation der Nord-West Wand des Objekts in Brüttelen mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.

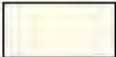
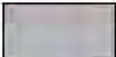



WUFI[®] Pro 5.3

Bauteilaufbau

Variante: Brüttelen Nord-West



Materialien:

	- *Zementputz (w-Wert: 0.51 kg/m ² h ^{0.5}) (entriegelt)	0.02 m
	- *Muschelkalk	0.5 m
	- *ISOVER UNIROLL 035	0.04 m
	- *ISOVER UNIROLL 035	0.1 m
	- ISOVER Vario XtraSafe	0.001 m
	- *ISOVER UNIROLL 035	0.03 m
	- *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	0.015 m

Gesamtdicke: 0.71 m

Wärmedurchlasswiderstand: 5.14 m²K/W

U-Wert: 0.188 W/m²K

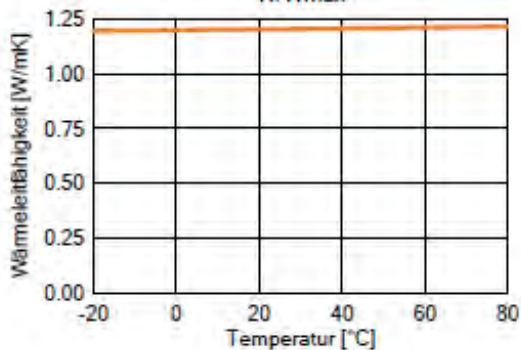
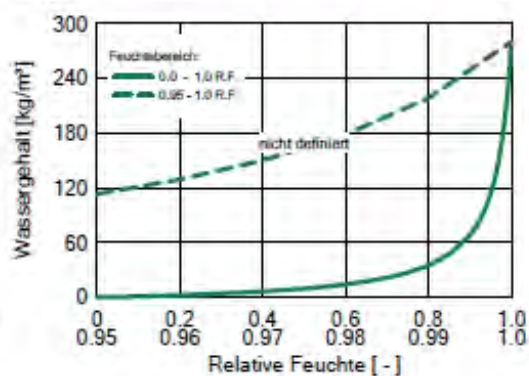
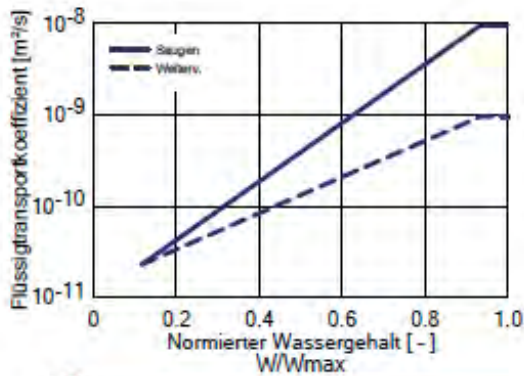
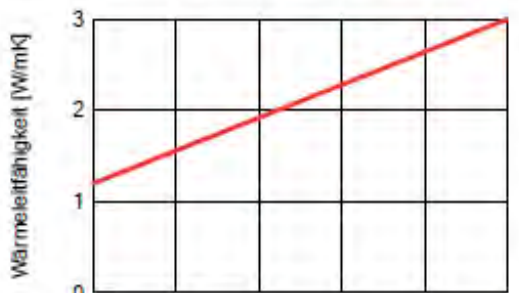


WUFI® Pro 5.3

Material: *Zementputz (w-Wert: 0,51 kg/m²h^{0,5}) (entriegelt)

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	2000.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.3
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	1.2
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	25.0
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m ³]	35.0
Freie Wassersättigung	[kg/m ³]	280.0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m ² s ^{0.5}]	0.014
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	10.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002



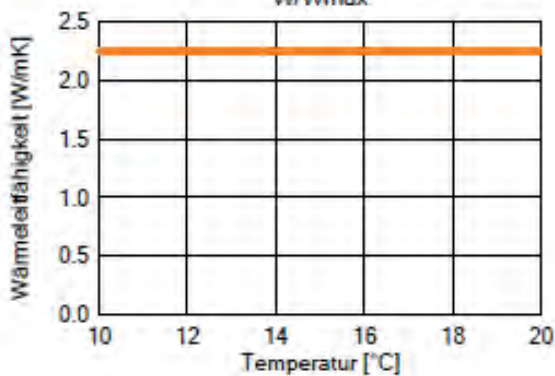
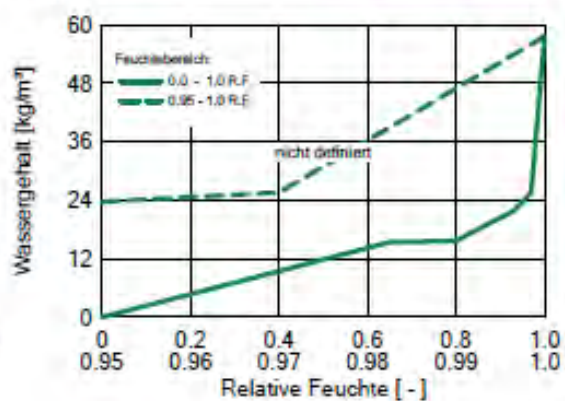
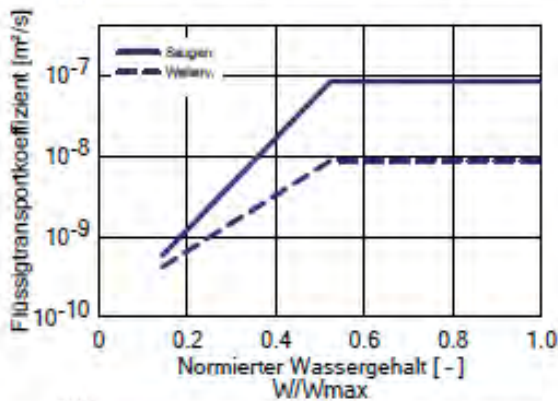
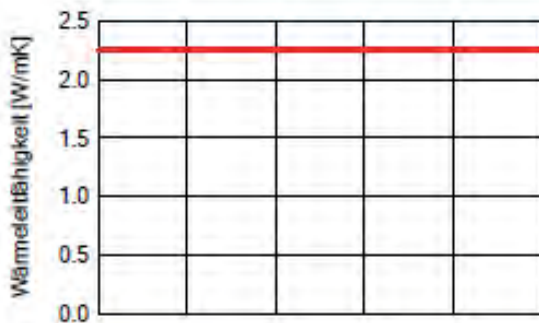


WUFI® Pro 5.3

Material: *Muschelkalk

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	2366.0
Porosität	[m³/m³]	0.11
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	2.25
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	203



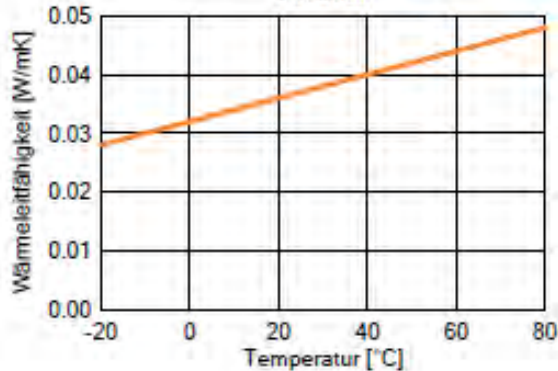
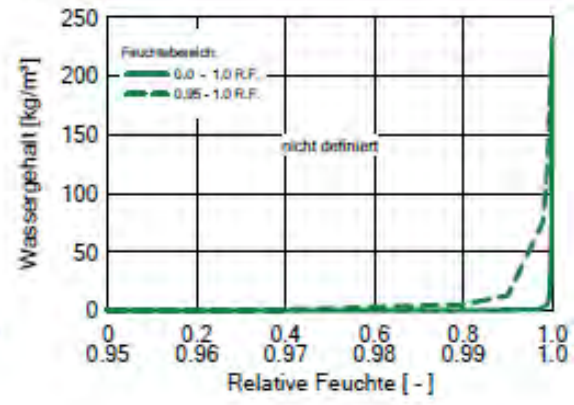
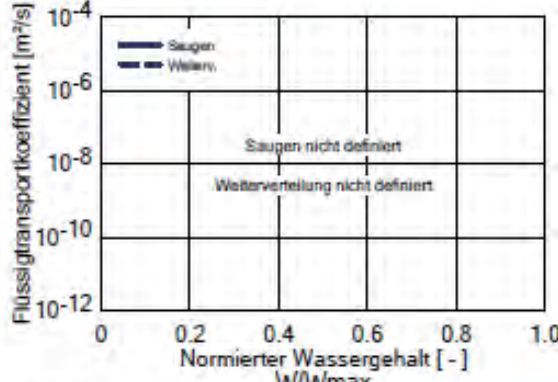


WUFI® Pro 5.3

Material: *ISOVER UNIROLL 035

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	20.0
Porosität	[m³/m³]	0.992
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1030
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.034
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.035



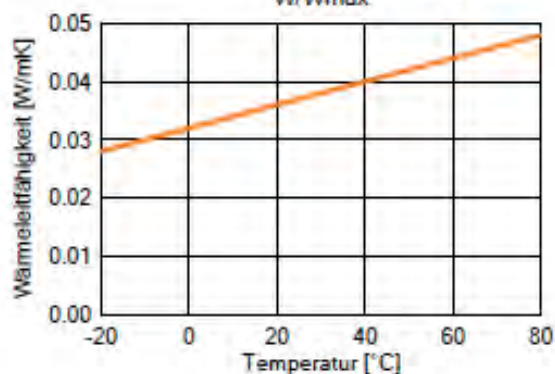
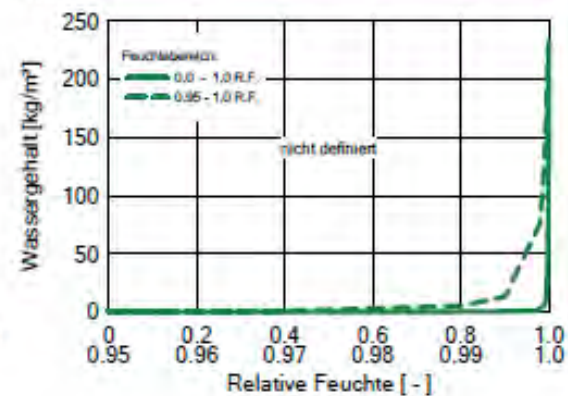
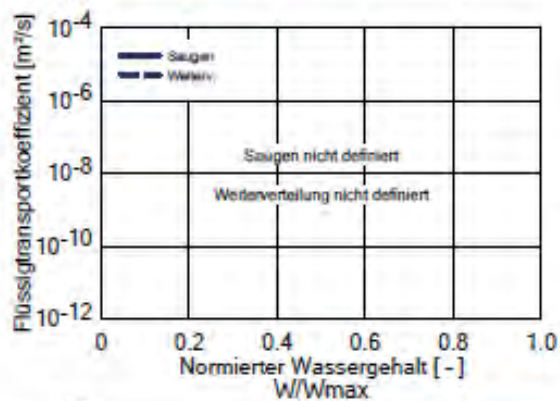
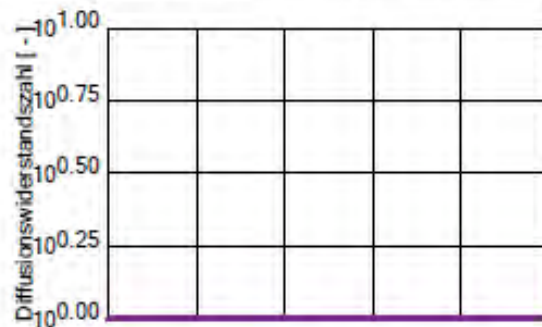


WUFI® Pro 5.3

Material: *ISOVER UNIROLL 035

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	20.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.992
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1030
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.034
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.035

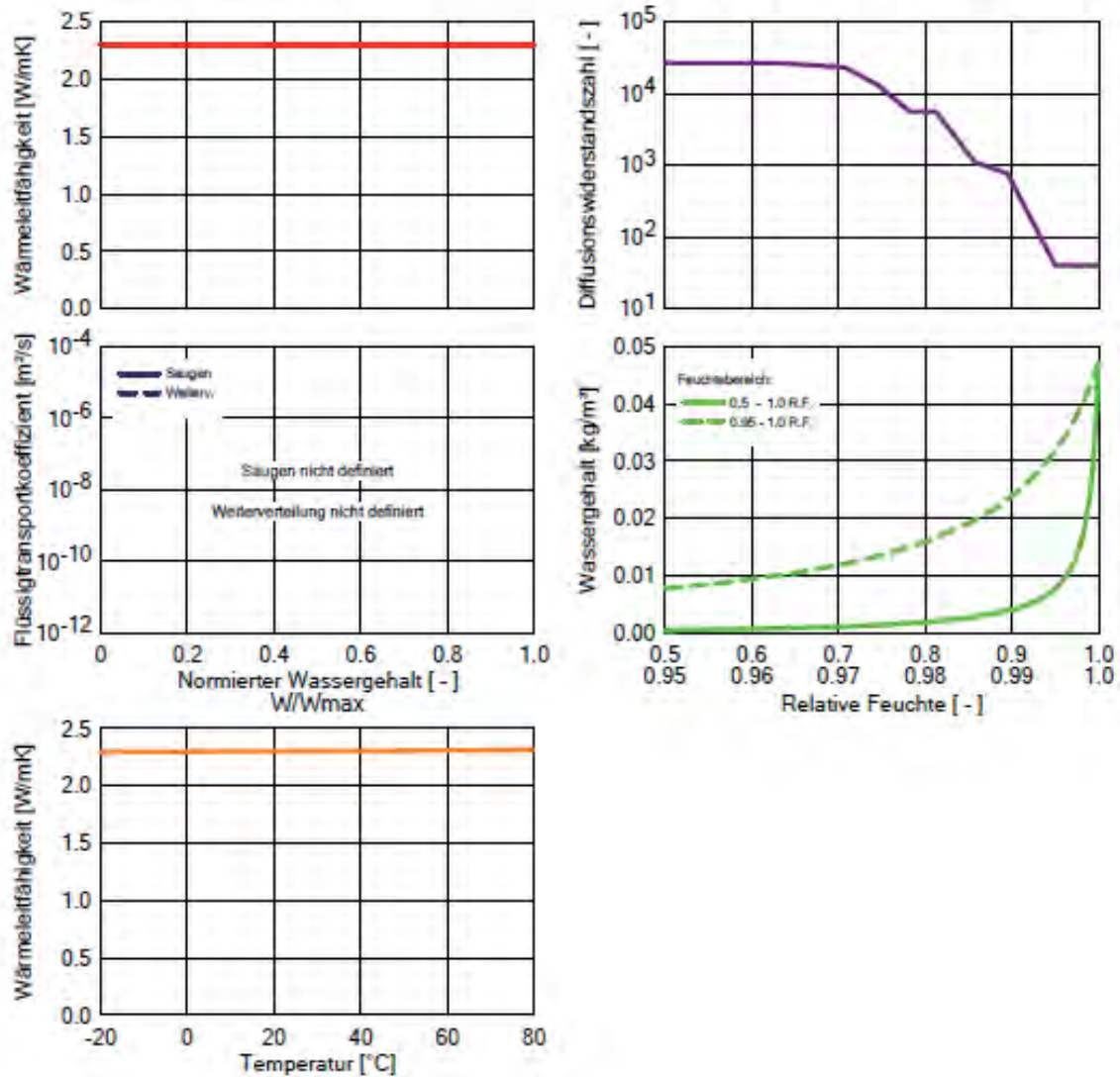


WUFI® Pro 5.3

Material: ISOVER Vario XtraSafe

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	130.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.001
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2300.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	2.3
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	27000.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002



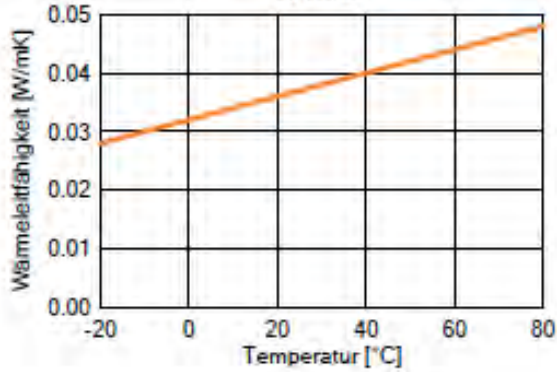
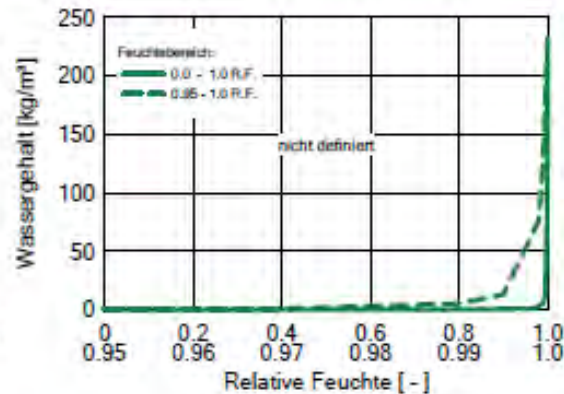
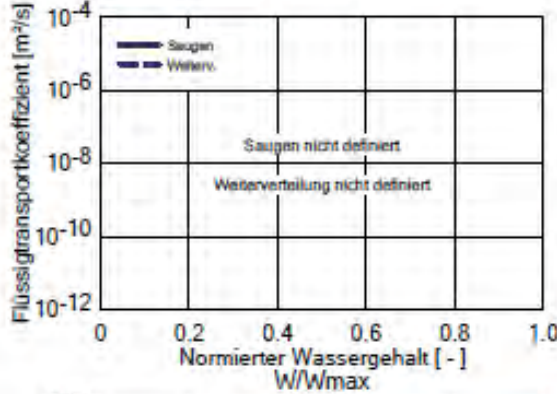
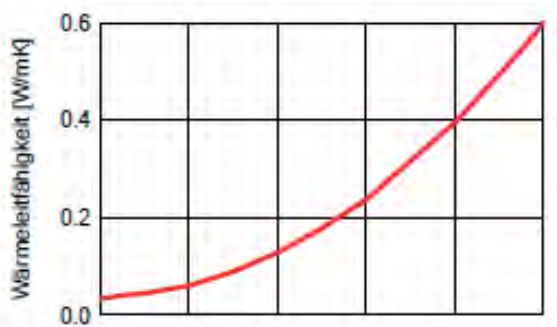


WUFI® Pro 5.3

Material: *ISOVER UNIROLL 035

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	20.0
Porosität	[m³/m³]	0.992
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1030
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.034
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.035

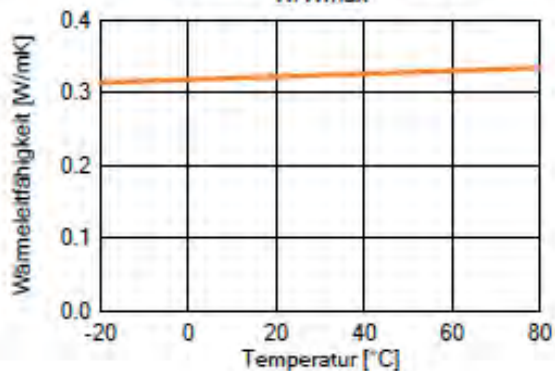
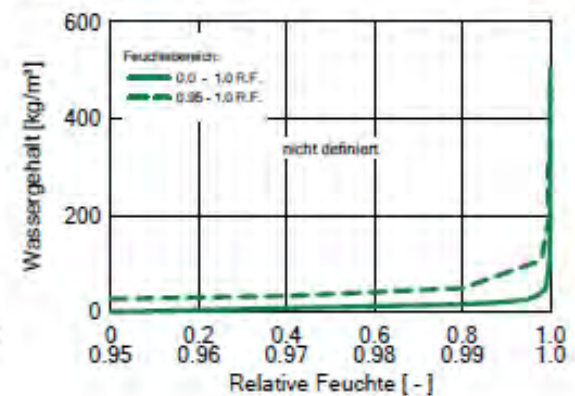
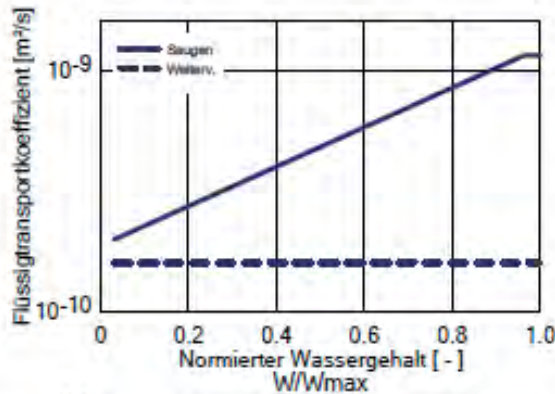
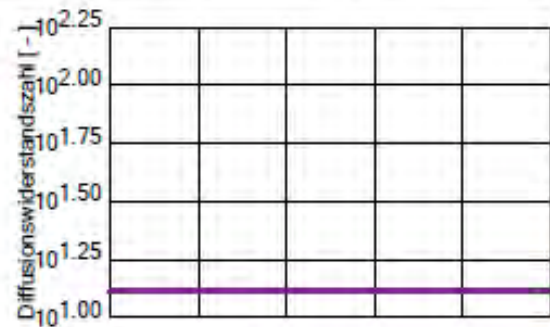
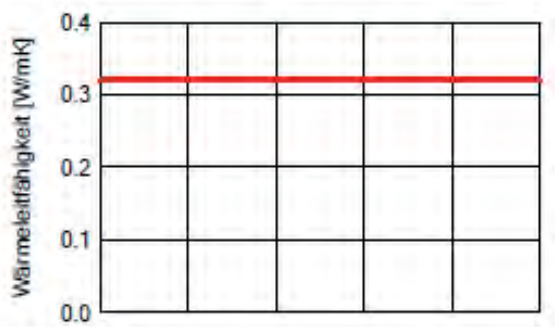


WUFI® Pro 5.3

Material: *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	1150.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.52
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1100.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.32
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	13
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.32





WUFI® Pro 5.3

Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: BruettelenAussen2014-15.02.2017.wac
Orientierung / Neigung: Nord-West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Klimaort: BruettelenInnen_15.10.2014-15.02.2017.wac

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand - beinhaltet langwelligen Strahlungsanteil	Außenwand	[m ² K/W]	0.0588 ja
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	---
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl		[-]	0.3
Langwellige Strahlungsemissionszahl		[-]	0.9
Anhaftender Anteil des Regens	Keine Regenwasserabsorption	[-]	---
Explizite Strahlungsbilanz			nein

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand	Außenwand	[m ² K/W]	0.125
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	---

WUFI® Pro 5.3

Ergebnisse der letzten Rechnung

Rechenverlauf

Datum/Zeit der Rechnung	06.03.2017 15:07:21
Rechenzeit	0 min,47 sek
Beginn / Ende der Rechnung	01.10.2014 / 01.03.2017
Anzahl der Konvergenzfehler	0

Numerische Qualitätsprüfung

Integral der Ströme, linke Seite (kl,dl)	[kg/m ²]	3.69 -4.4
Integral der Ströme, rechte Seite (kr,dr)	[kg/m ²]	-0.0 0.82
Bilanz 1	[kg/m ²]	-1.53
Bilanz 2	[kg/m ²]	-1.53

Wassergehalt [kg/m³]

	Start	Ende	Min.	Max.
Gesamtwassergehalt	11.65	10.1	9.26	12.28

Wassergehalt [kg/m³]

Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
*Zementputz (w-Wert: 0,51 kg/m ² h ^{0,5})	35.00	52.06	7.33	87.83
*Muschelkalk	21.30	17.79	17.41	21.30
*ISOVER UNIROLL 035	0.36	0.33	0.29	0.69
*ISOVER UNIROLL 035	0.36	0.18	0.12	0.45
ISOVER Vario XtraSafe	0.00	0.00	0.00	0.00
*ISOVER UNIROLL 035	0.36	0.17	0.11	0.39
*FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	15.80	8.38	5.19	15.80

Zeitintegral der Ströme

Wärmestrom, linke Seite	[MJ/m ²]	-173.18
Wärmestrom, rechte Seite	[MJ/m ²]	-161.91
Feuchteströme, linke Seite	[kg/m ²]	-0.72
Feuchteströme, rechte Seite	[kg/m ²]	0.83

Hygrothermische Quellen

Wärmequellen	[MJ/m ²]	0.0
Feuchtequellen	[kg/m ²]	0.0
Nicht aufgenommene Feuchtequellen	[kg/m ²]	0.0

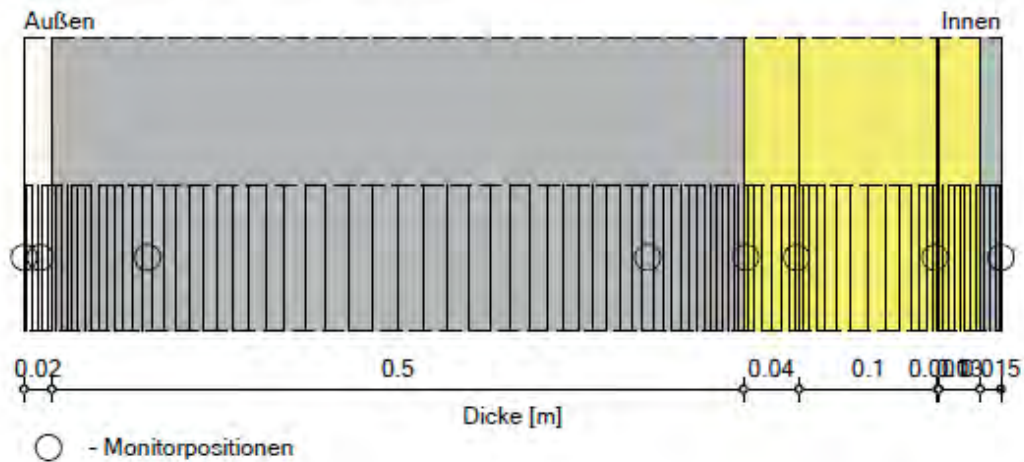


Abbildung 118: Bericht der WUFI Pro[®]-Simulation der Süd-West Wand des Objekts in Brüttelen mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.

WUFI[®] Pro 5.3

Bauteilaufbau

Variante: Brüttelen Süd-West



Materialien:

	- *Zementputz (w-Wert: 0.51 kg/m ² h ^{0.5}) (entriegelt)	0.02 m
	- *Muschelkalk	0.5 m
	- *ISOVER UNIROLL 035	0.04 m
	- *ISOVER UNIROLL 035	0.1 m
	- ISOVER Vario XtraSafe	0.001 m
	- *ISOVER UNIROLL 035	0.03 m
	- *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	0.015 m

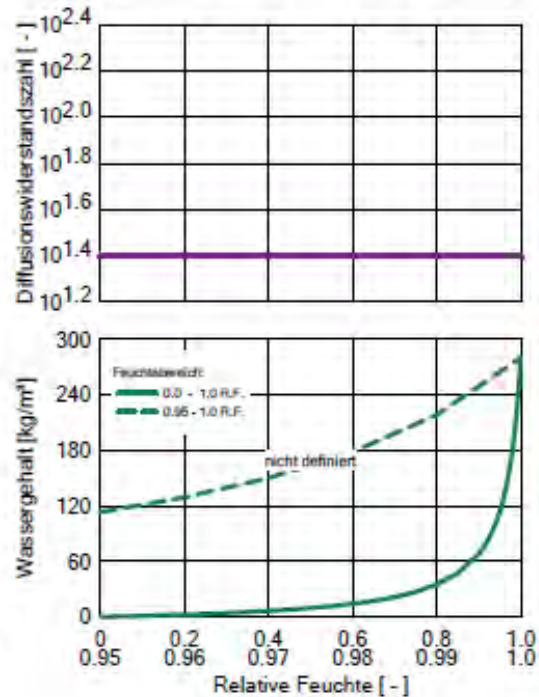
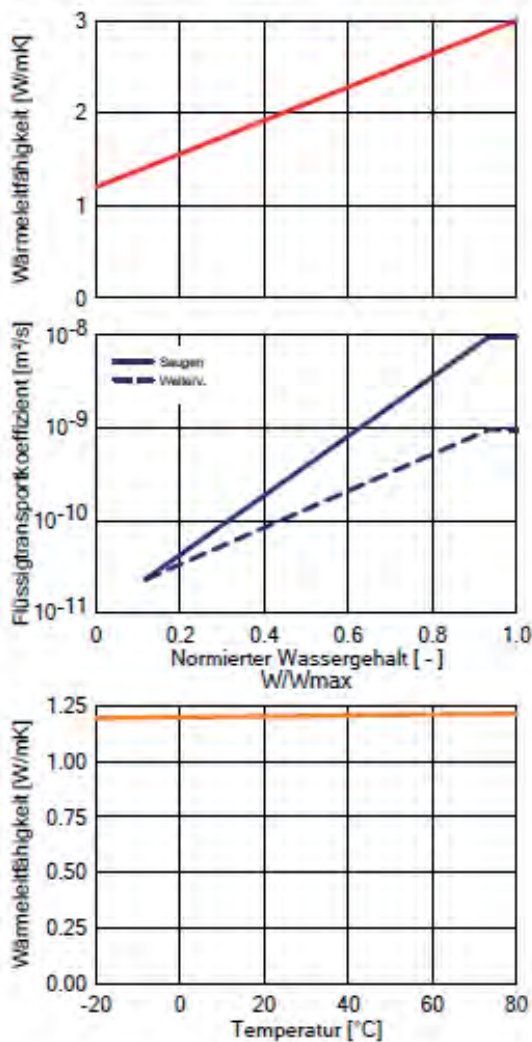
Gesamtdicke: 0.71 m
Wärmedurchlasswiderstand: 5.14 m²K/W
U-Wert: 0.188 W/m²K

WUFI® Pro 5.3

 Material: *Zementputz (w-Wert: 0,51 kg/m²h^{0,5}) (entriegelt)

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	2000.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.3
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	1.2
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	25.0
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m ³]	35.0
Freie Wassersättigung	[kg/m ³]	280.0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m ² s ^{0.5}]	0.014
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	10.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002



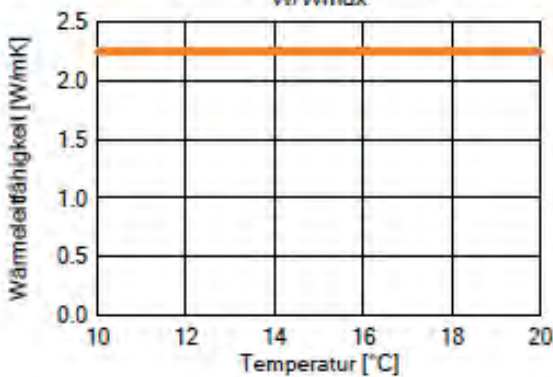
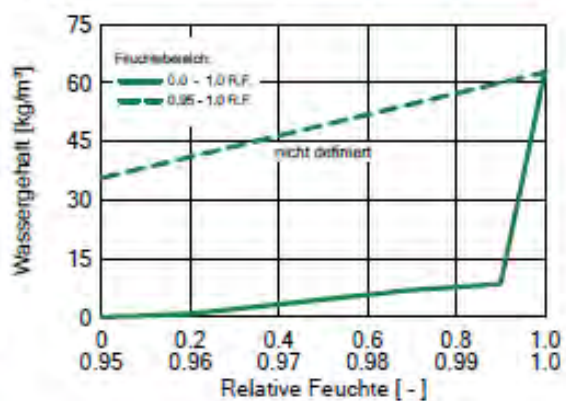
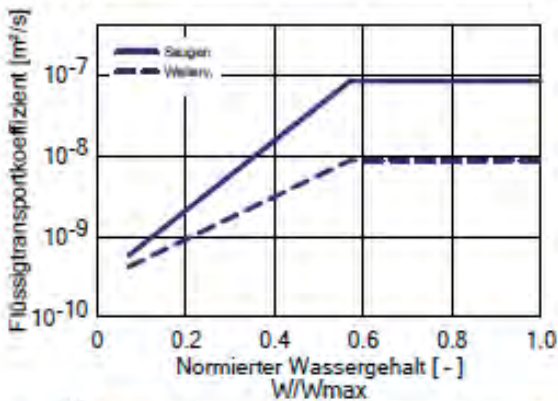
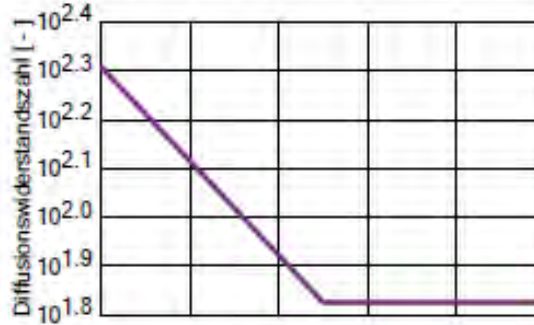
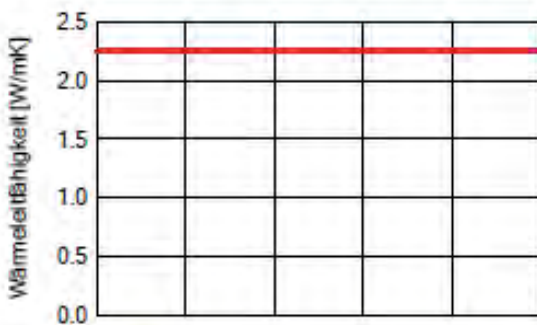


WUFI® Pro 5.3

Material: *Muschelkalk

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	2366.0
Porosität	[m³/m³]	0.11
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	2.25
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	203.0

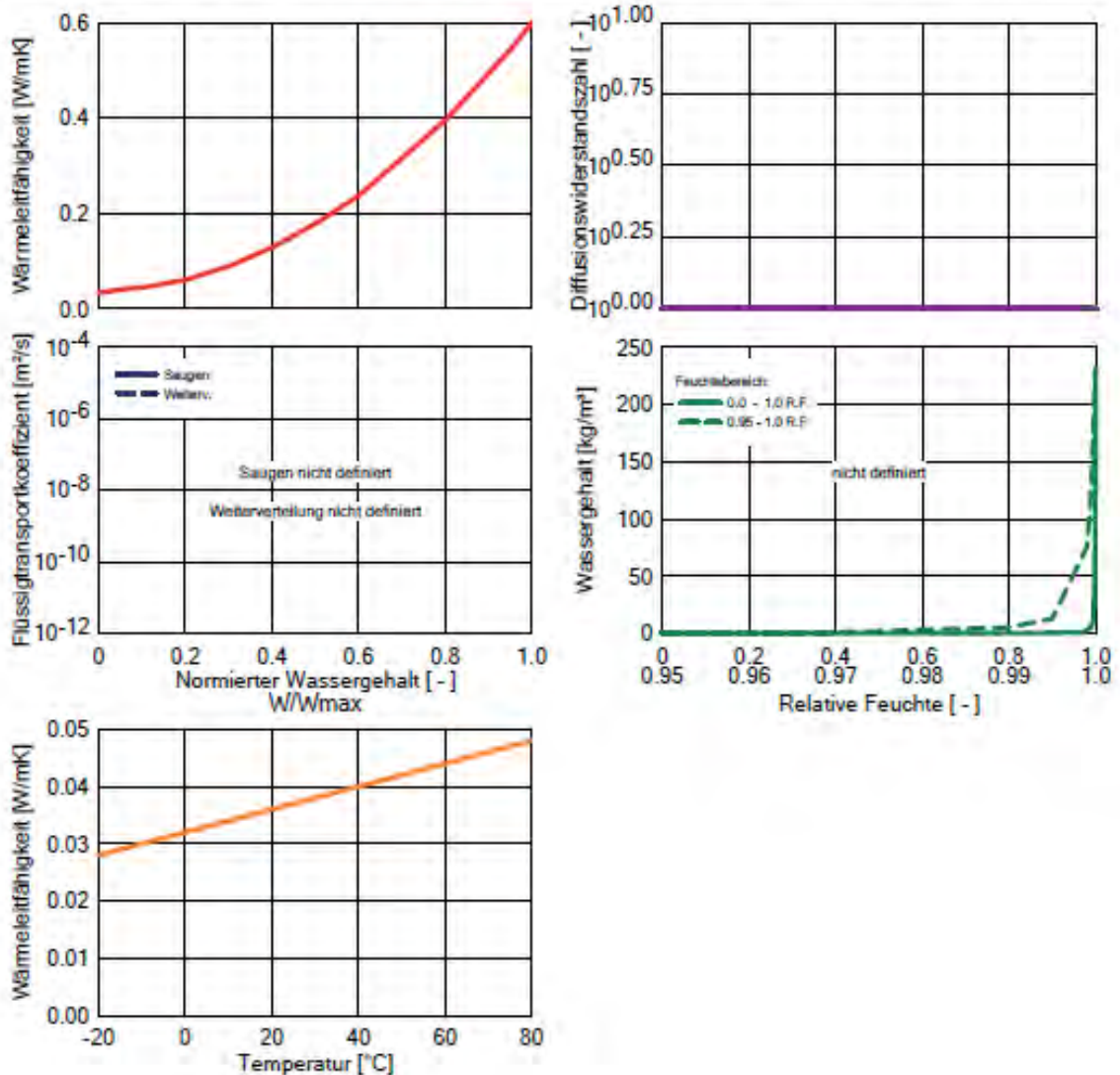


WUFI® Pro 5.3

Material: *ISOVER UNIROLL 035

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	20.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.992
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1030
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.034
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.035



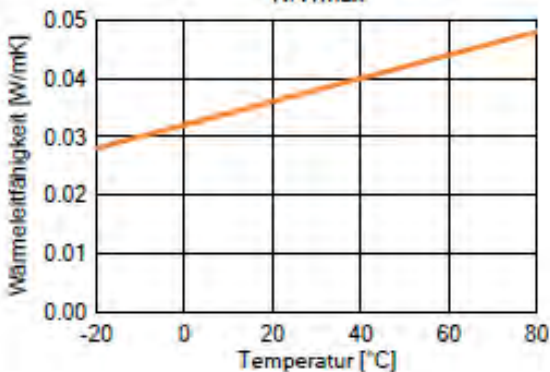
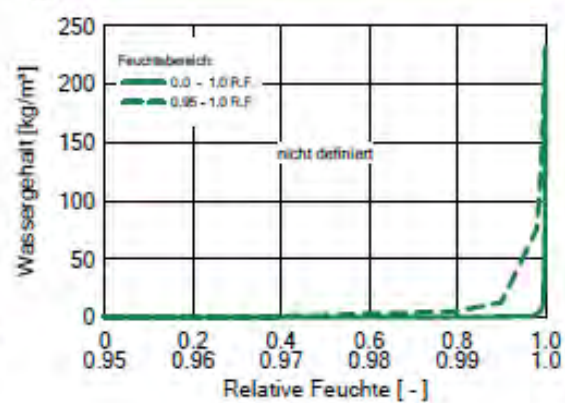
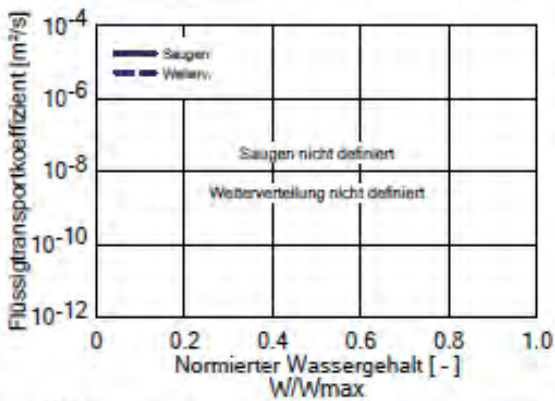
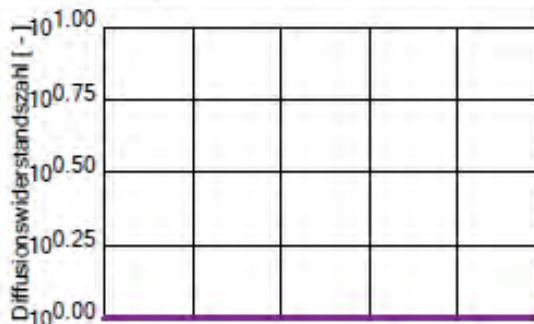


WUFI® Pro 5.3

Material: *ISOVER UNIROLL 035

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	20.0
Porosität	[m³/m³]	0.992
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1030
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.034
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.035

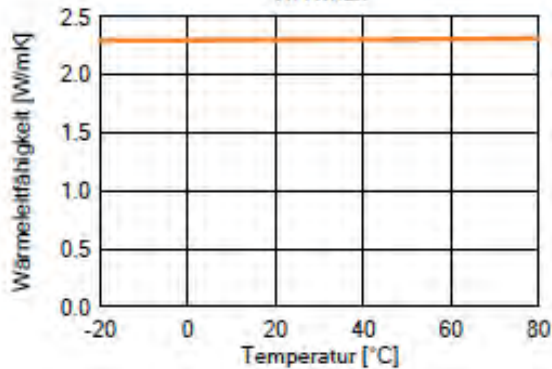
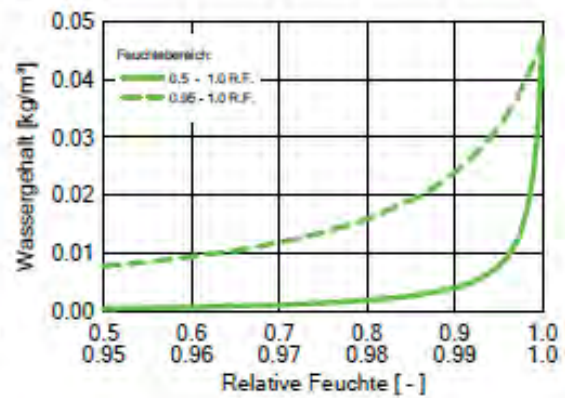
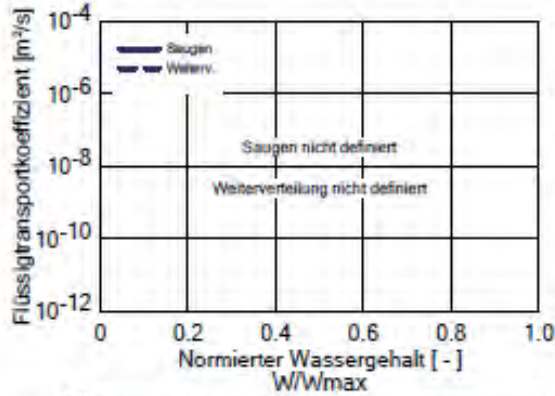
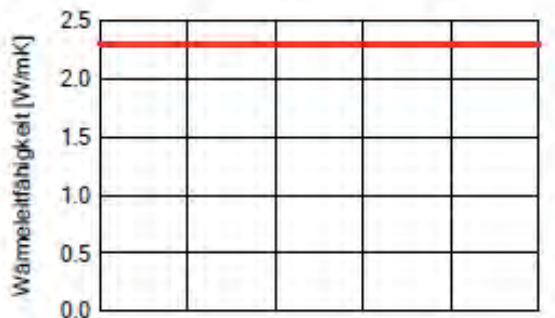


WUFI® Pro 5.3

Material: ISOVER Vario XtraSafe

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	130.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.001
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2300.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	2.3
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	27000.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002



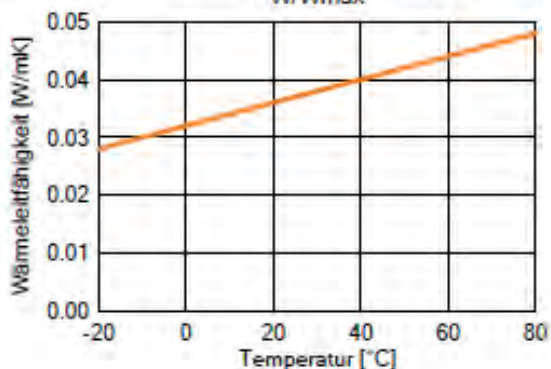
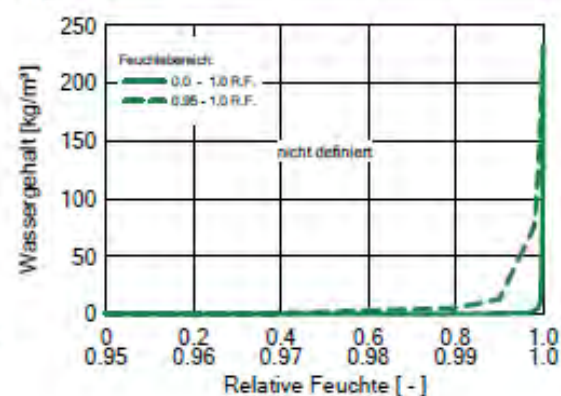
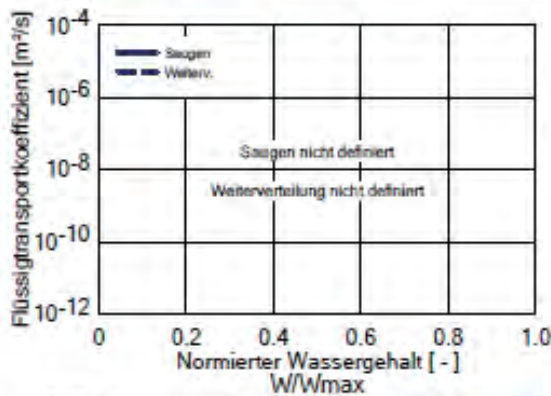
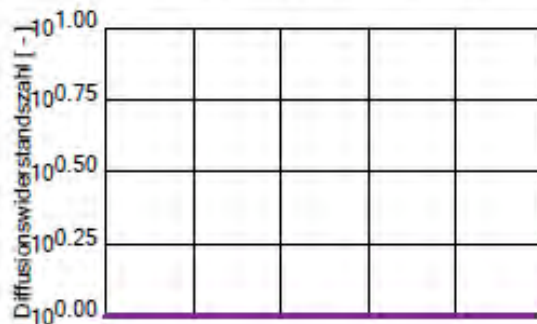


WUFI® Pro 5.3

Material: *ISOVER UNIROLL 035

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	20.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.992
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1030
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.034
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.035

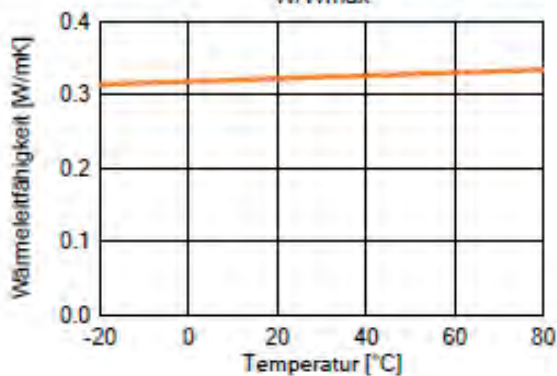
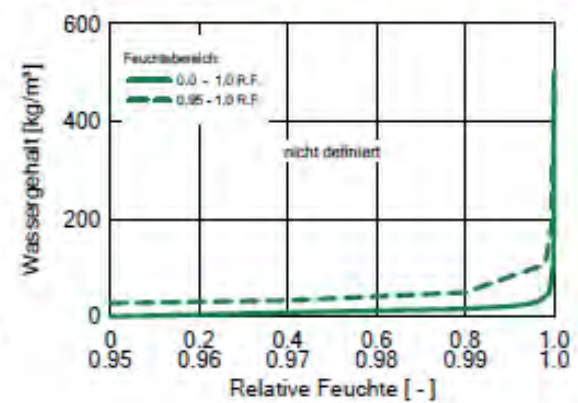
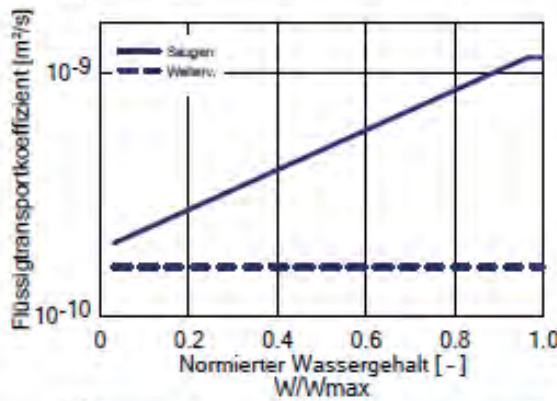
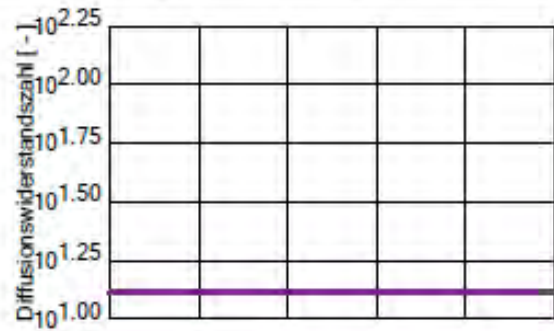


WUFI® Pro 5.3

Material: *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1150.0
Porosität	[m³/m³]	0.52
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1100.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.32
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	13
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.32





WUFI® Pro 5.3

Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: BruettelenAussen2014-15.02.2017.wac
Orientierung / Neigung: Süd-West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Klimaort: BruettelenInnen_15.10.2014-15.02.2017.wac

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand - beinhaltet langwelligen Strahlungsanteil	Außenwand	[m ² K/W]	0.0588 ja
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	---
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl		[-]	0.3
Langwellige Strahlungsemissionszahl		[-]	0.9
Anhaftender Anteil des Regens		[-]	0.1
Explizite Strahlungsbilanz			nein

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand	Außenwand	[m ² K/W]	0.125
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	---

WUFI® Pro 5.3

Ergebnisse der letzten Rechnung

Rechenverlauf

Datum/Zeit der Rechnung	06.03.2017 14:47:39
Rechenzeit	0 min,52 sek
Beginn / Ende der Rechnung	01.10.2014 / 01.03.2017
Anzahl der Konvergenzfehler	0

Numerische Qualitätsprüfung

Integral der Ströme, linke Seite (kl,dl)	[kg/m ²]	8.39 -8.37
Integral der Ströme, rechte Seite (kr,dr)	[kg/m ²]	-0.0 0.35
Bilanz 1	[kg/m ²]	-0.33
Bilanz 2	[kg/m ²]	-0.33

Wassergehalt [kg/m²]

	Start	Ende	Min.	Max.
Gesamtwassergehalt	5.25	4.9	4.14	7.49

Wassergehalt [kg/m³]

Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
*Zementputz (w-Wert: 0.51 kg/m ² h ^{0.5})	35.00	46.00	6.25	156.90
*Muschelkalk	8.50	7.64	7.35	8.76
*ISOVER UNIROLL 035	0.36	0.31	0.25	0.57
*ISOVER UNIROLL 035	0.36	0.18	0.12	0.36
ISOVER Vario XtraSafe	0.00	0.00	0.00	0.00
*ISOVER UNIROLL 035	0.36	0.17	0.11	0.39
*FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	15.80	8.38	5.18	15.80

Zeitintegral der Ströme

Wärmestrom, linke Seite	[MJ/m ²]	-166.06
Wärmestrom, rechte Seite	[MJ/m ²]	-155.66
Feuchteströme, linke Seite	[kg/m ²]	0.01
Feuchteströme, rechte Seite	[kg/m ²]	0.36

Hygrothermische Quellen

Wärmequellen	[MJ/m ²]	0.0
Feuchtequellen	[kg/m ²]	0.0
Nicht aufgenommene Feuchtequellen	[kg/m ²]	0.0



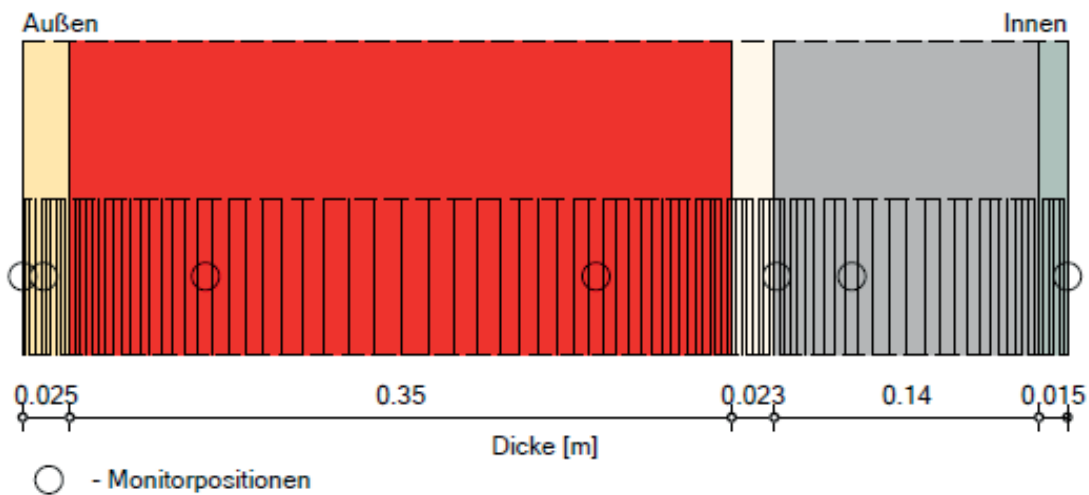
Anhang F3: WUFI Pro[®]-Bericht Bütschwil

Abbildung 119: Bericht der WUFI Pro[®]-Simulation der Nordwand des Objekts in Bütschwil mit den vollständigen und detaillierten Ausgabedaten.

WUFI[®] Pro 5.3

Bauteilaufbau

Variante: #5



Materialien:

	- Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0.1 kg/m ² h ^{0.5})	0.025 m
	- Kellerziegel	0.35 m
	- Innenputz (Gips)	0.023 m
	- *isofloc L - PDB	0.14 m
	- *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	0.015 m

Gesamtdicke: 0.55 m

Wärmedurchlasswiderstand: 5.61 m²K/W

U-Wert: 0.172 W/m²K

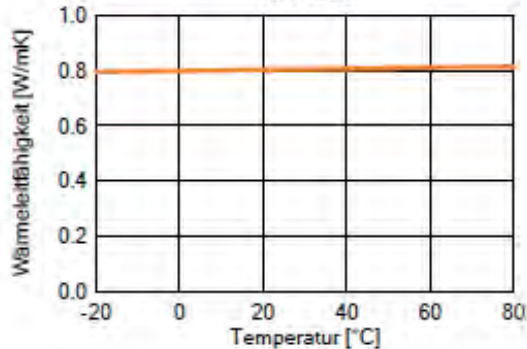
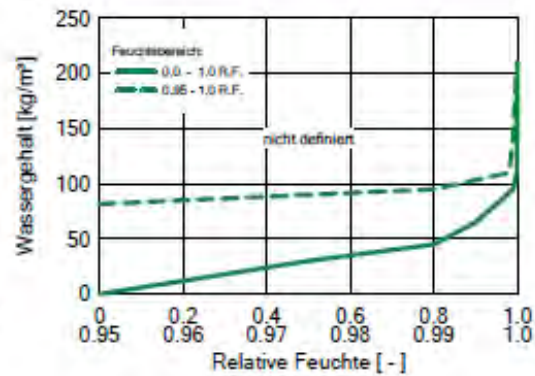
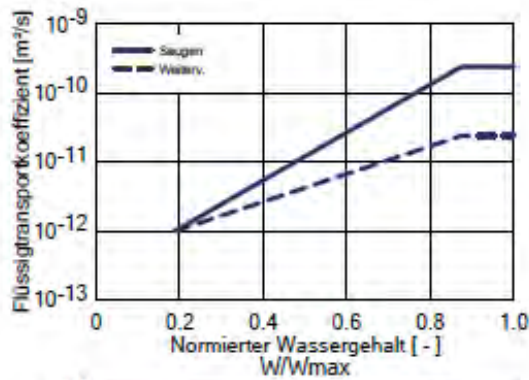
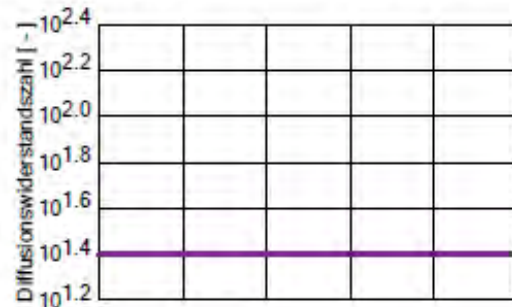


WUFI® Pro 5.3

Material: Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m²h0,5)

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	1900.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.24
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.8
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	25.0
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m ³]	45.0
Freie Wassersättigung	[kg/m ³]	210.0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m ² s ^{0.5}]	0.00167
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	8.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002



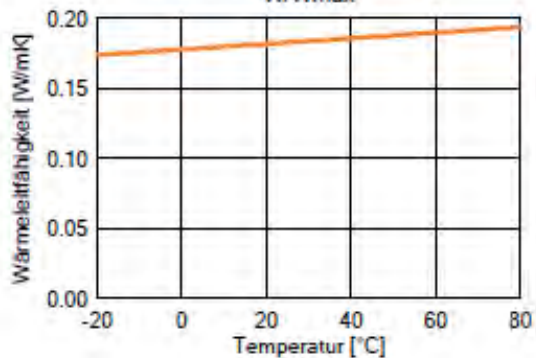
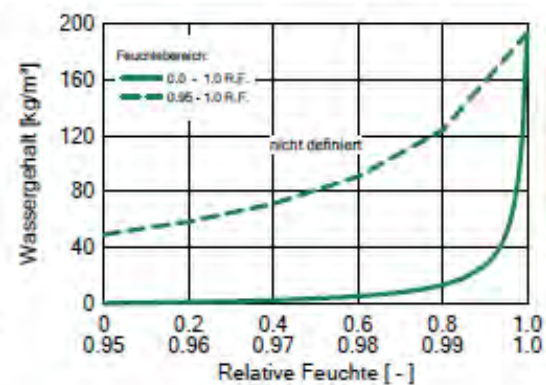
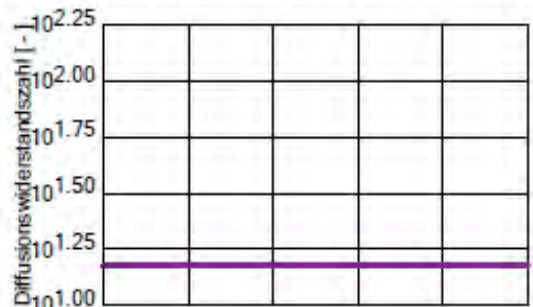
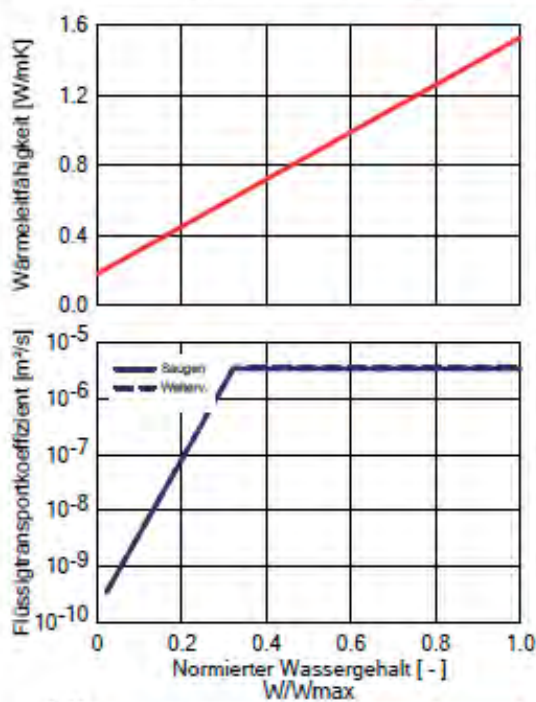


WUFI® Pro 5.3

Material: Kellerziegel

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m ³]	800.0
Porosität	[m ³ /m ³]	0.6
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.18
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	15.0
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m ³]	13.0
Freie Wassersättigung	[kg/m ³]	193.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	10.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK ²]	0.0002

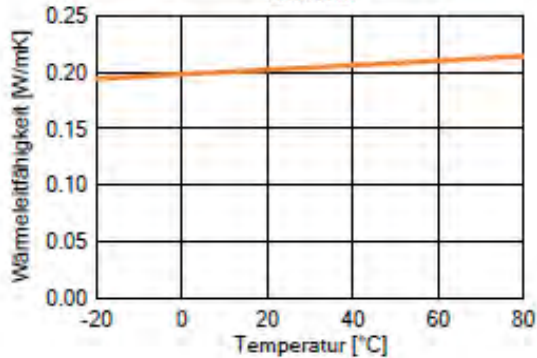
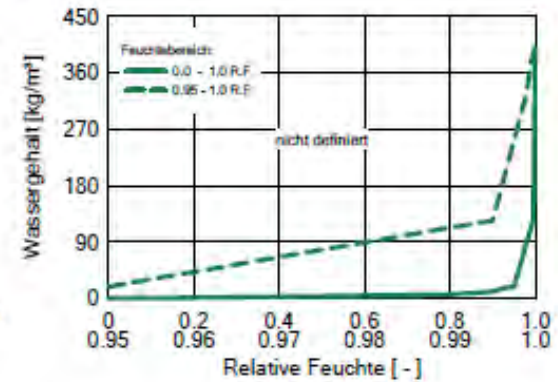
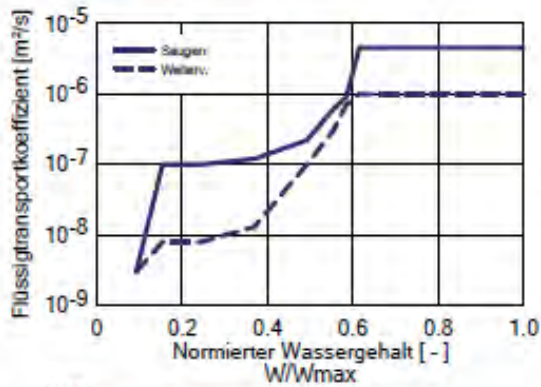
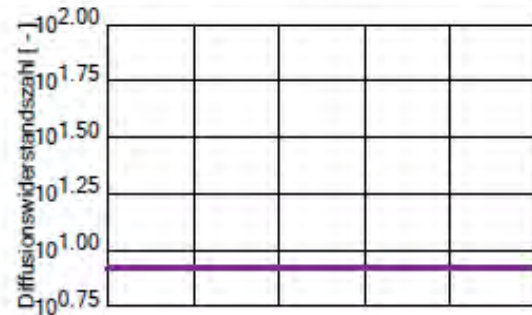
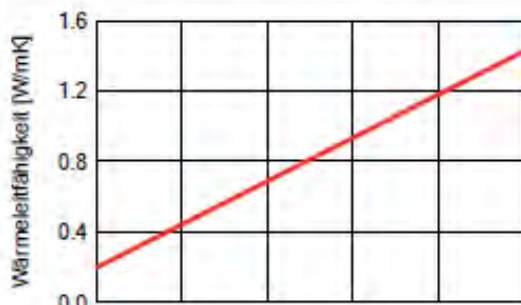


WUFI® Pro 5.3

Material: Innenputz (Gips)

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



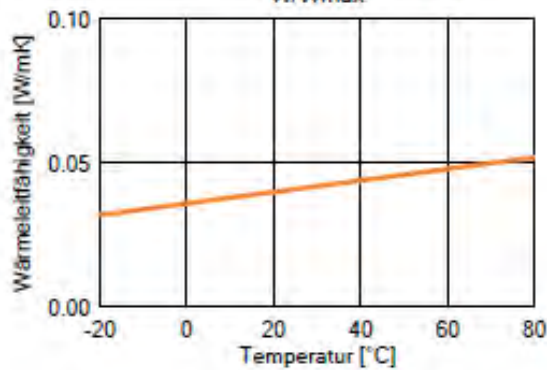
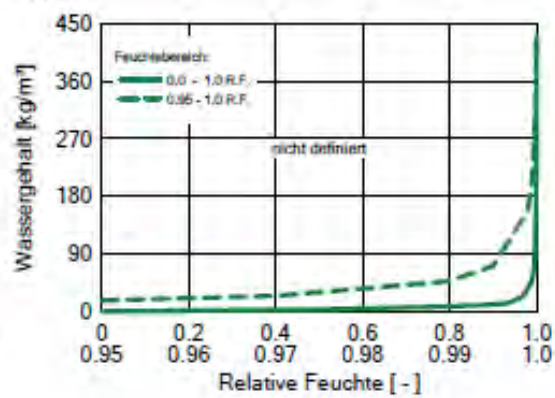
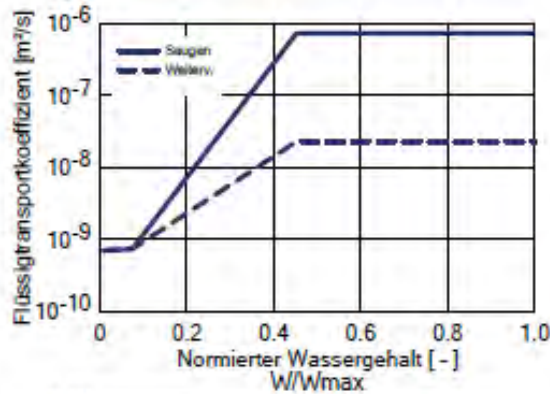


WUFI® Pro 5.3

Material: *isofloc L - PDB

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]	0.038
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1.2
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0.0002

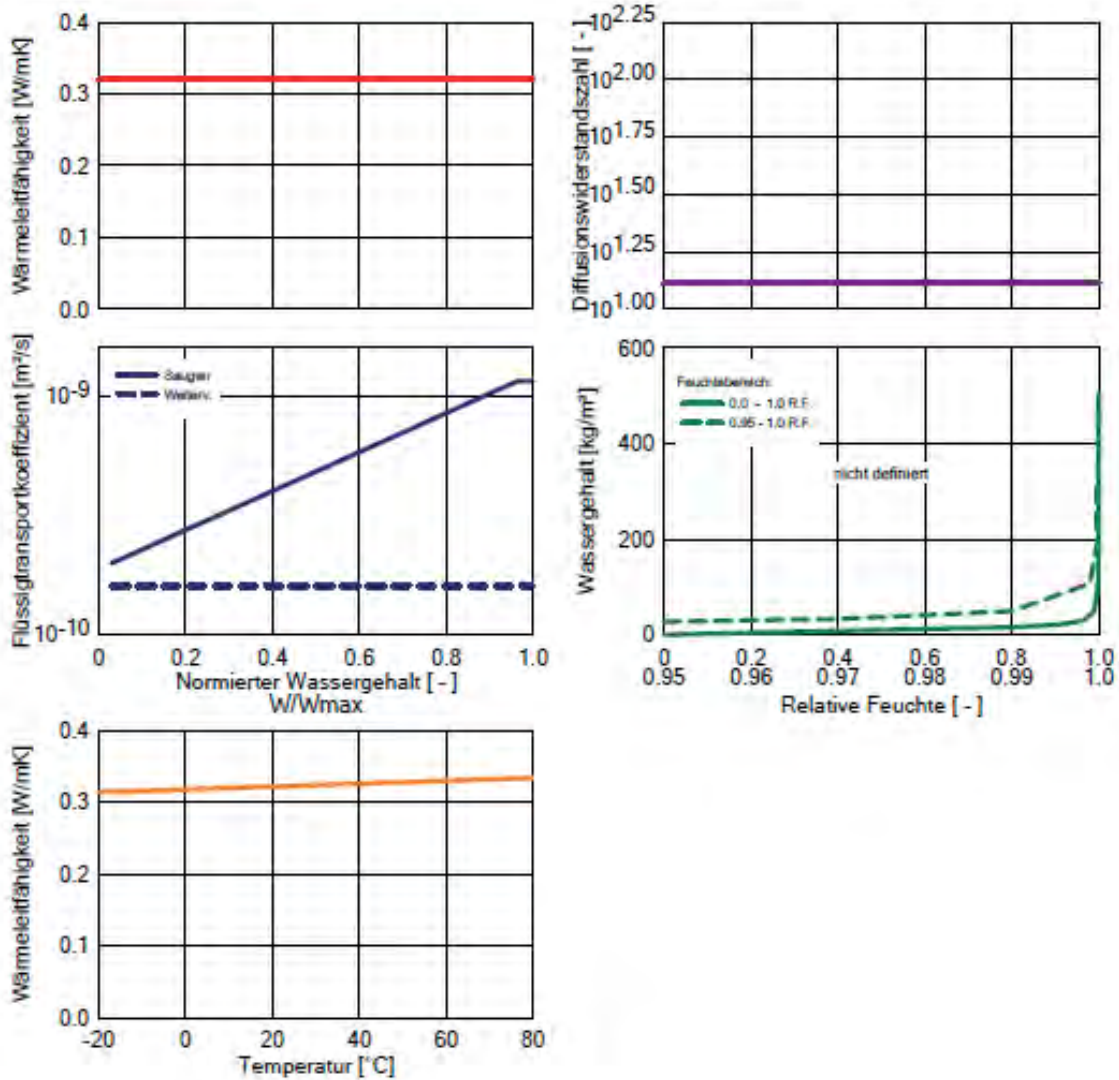


WUFI® Pro 5.3

Material: *FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1150.0
Porosität	[m³/m³]	0.52
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1100.0
Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C	[W/mK]	0.32
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	13.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0.0002
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.32





WUFI® Pro 5.3

Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: BuetschwilAussen2015-15.02.2017.wac
Orientierung / Neigung: Nord / 90 °

Innen (rechte Seite)

Klimaort: BuetschwilInnenbearb.wac

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand - beinhaltet langwelligen Strahlungsanteil	Außenwand	[m ² K/W]	0.0588 ja
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	—
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	Putz dunkel	[-]	0.6
Langwellige Strahlungsemissionszahl	Putz dunkel	[-]	0.9
Anhaftender Anteil des Regens	Gemäß Bauteilneigung	[-]	0.7
Explizite Strahlungsbilanz			nein

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand	Außenwand	[m ² K/W]	0.125
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	—

WUFI® Pro 5.3

Ergebnisse der letzten Rechnung

Rechenverlauf

Datum/Zeit der Rechnung	02.03.2017 13:06:22
Rechenzeit	0 min,39 sek
Beginn / Ende der Rechnung	01.06.2015 / 15.05.2017
Anzahl der Konvergenzfehler	0

Numerische Qualitätsprüfung

Integral der Ströme, linke Seite (kl,dl)	[kg/m ²]	7.08 -7.06
Integral der Ströme, rechte Seite (kr,dr)	[kg/m ²]	-0.02 -3.63
Bilanz 1	[kg/m ²]	3.67
Bilanz 2	[kg/m ²]	3.67

Wassergehalt [kg/m³]

	Start	Ende	Min.	Max.
Gesamtwassergehalt	4.2	7.87	4.1	8.66

Wassergehalt [kg/m³]

Schicht/Material	Start	Ende	Min.	Max.
Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0.7)	37.50	33.43	31.34	72.21
Kellerziegel	6.26	15.31	6.26	15.36
Innenputz (Gips)	5.20	10.52	4.37	24.23
*isofloc L - PDB	5.45	8.68	4.78	10.09
*FERMACELL Gipsfaser-Platte - PDB	13.05	14.93	10.02	14.94

Zeitintegral der Ströme

Wärmestrom, linke Seite	[MJ/m ²]	-120.6
Wärmestrom, rechte Seite	[MJ/m ²]	-121.62
Feuchteströme, linke Seite	[kg/m ²]	0.01
Feuchteströme, rechte Seite	[kg/m ²]	-3.66

Hygrothermische Quellen

Wärmequellen	[MJ/m ²]	0.0
Feuchtequellen	[kg/m ²]	0.0
Nicht aufgenommene Feuchtequellen	[kg/m ²]	0.0

Anhang G1: Vergleich in situ Messungen/Simulation Aarwangen

Temperaturverlauf:

Nord-West Wand in Aarwangen:

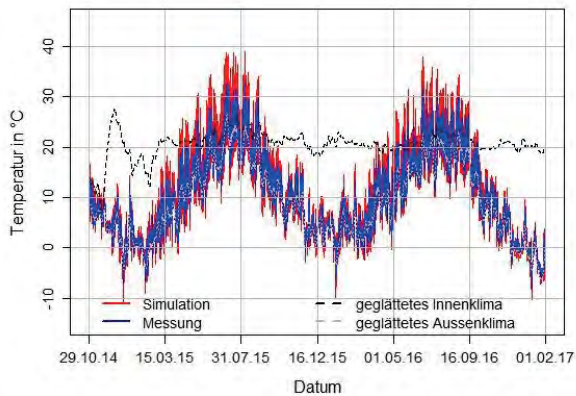


Abbildung 120: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenputz der Nord-West Wand (NW-1) in Aarwangen.

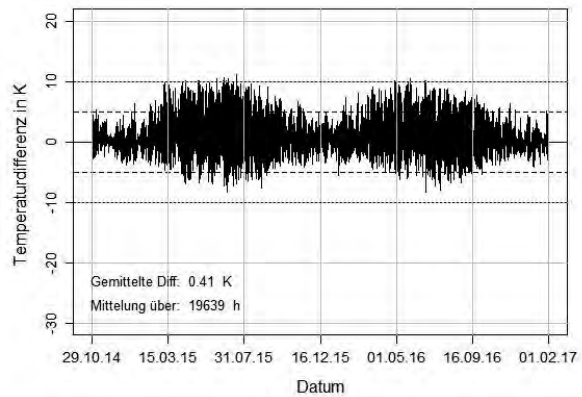


Abbildung 121: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Nord-West Wand (NW-1) in Aarwangen.

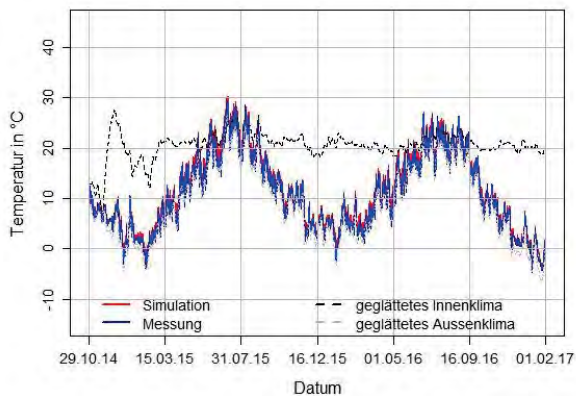


Abbildung 122: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-4) in Aarwangen.

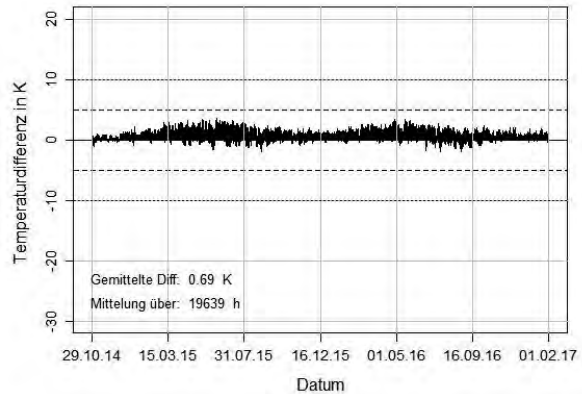


Abbildung 123: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-4) in Aarwangen.

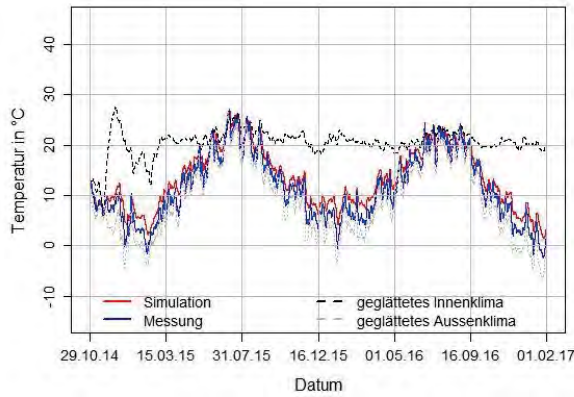


Abbildung 124: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen.

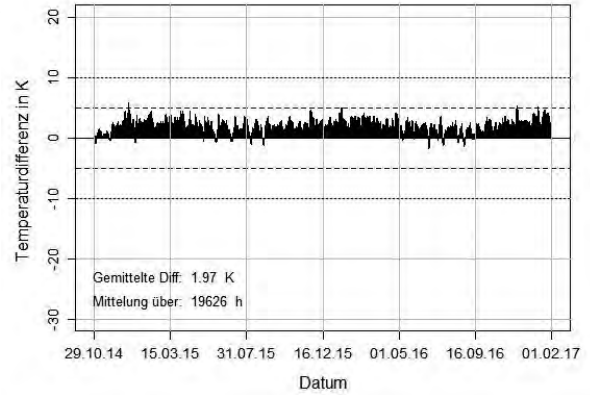


Abbildung 125: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen.

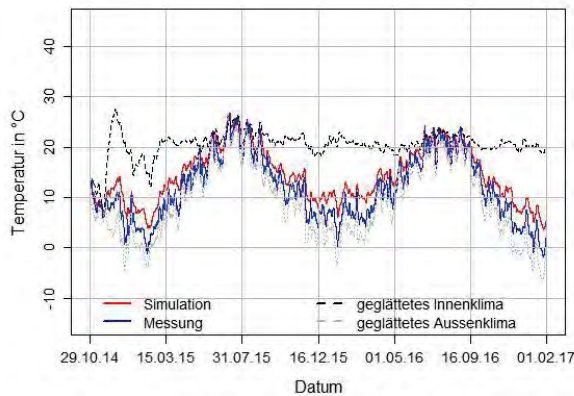


Abbildung 126: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.

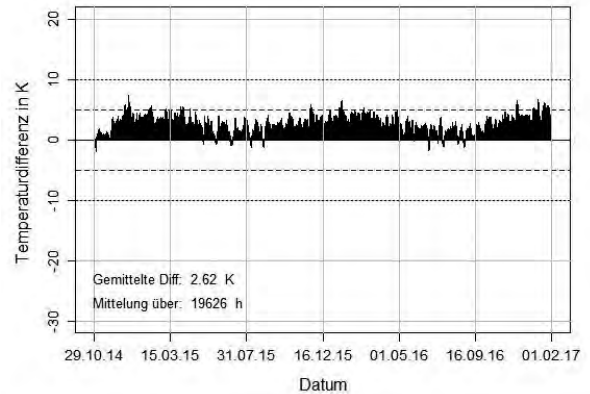


Abbildung 127: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.

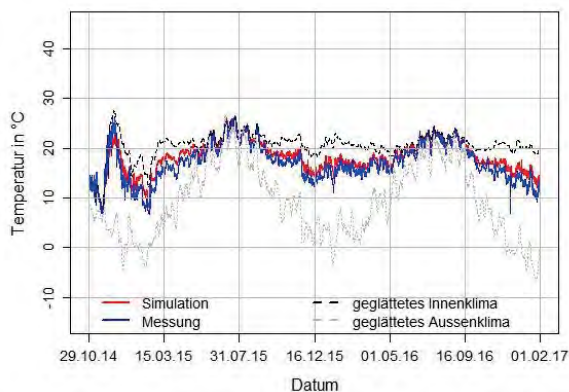


Abbildung 128: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-10) in Aarwangen.

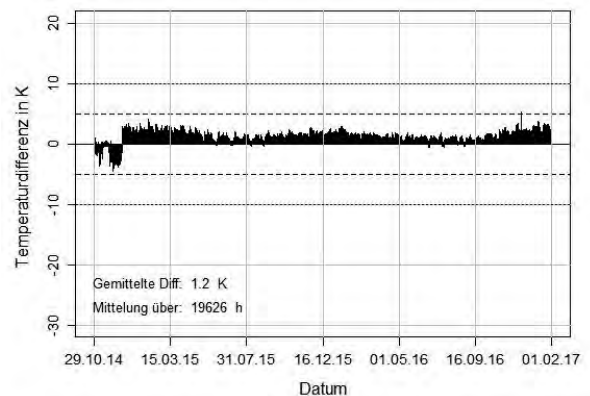


Abbildung 129: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-10) in Aarwangen.



Süd-West Wand in Aarwangen:

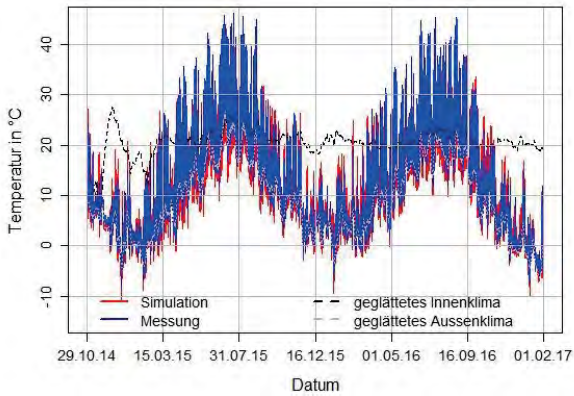


Abbildung 130: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenputz der Süd-West Wand (SW-1) in Aarwangen.

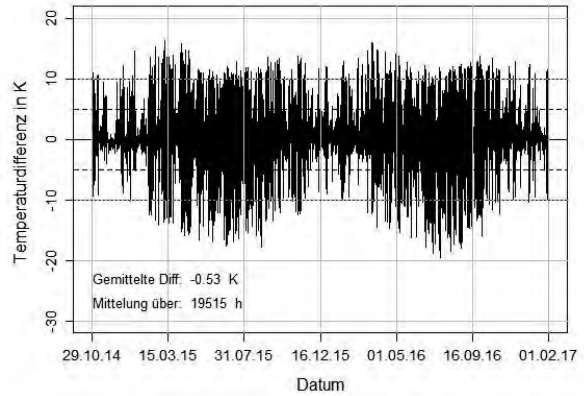


Abbildung 131: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Süd-West Wand (SW-1) in Aarwangen.

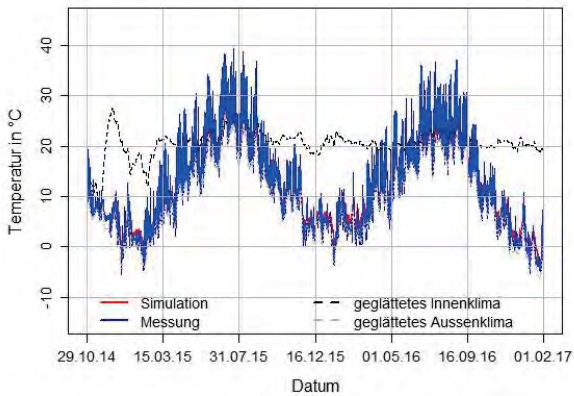


Abbildung 132: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenbereich des Hochlochziegelverbunds der Süd-West Wand (SW-4) in Aarwangen.

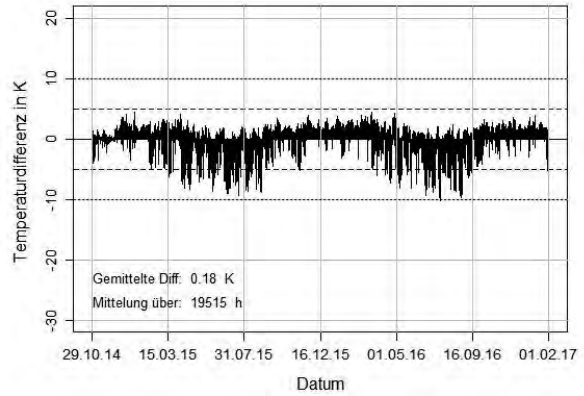


Abbildung 133: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Hochloch-ziegelverbunds der Süd-West Wand (SW-4) in Aarwangen.

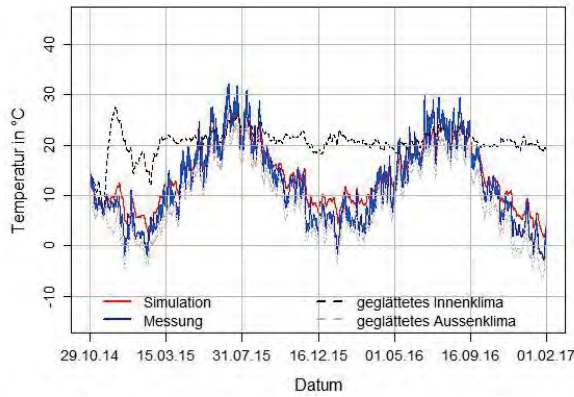


Abbildung 134: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Hochlochziegelverbunds der Süd-West Wand (SW-7) in Aarwangen.

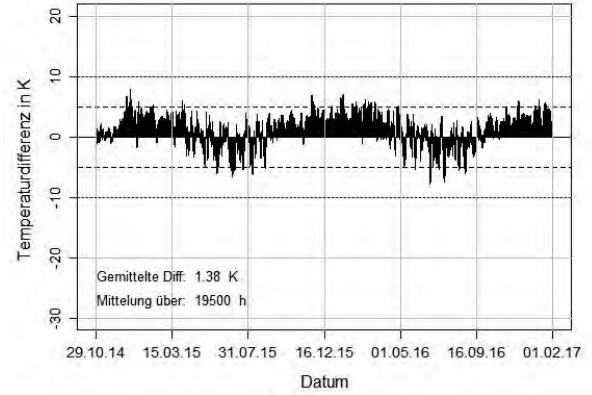


Abbildung 135: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Hochlochziegelverbunds der Süd-West Wand (SW-7) in Aarwangen.

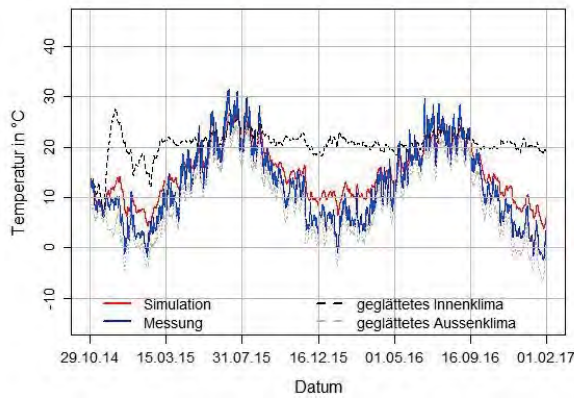


Abbildung 136: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.

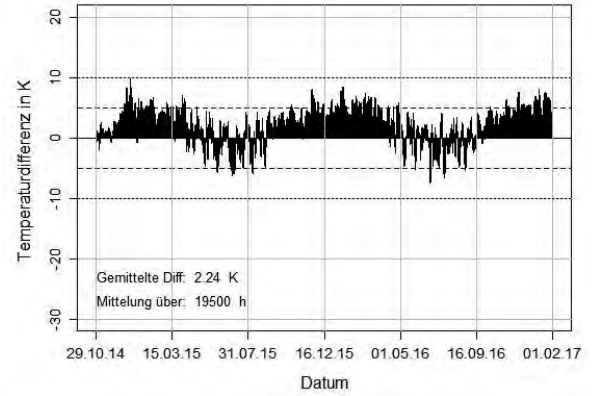


Abbildung 137: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.

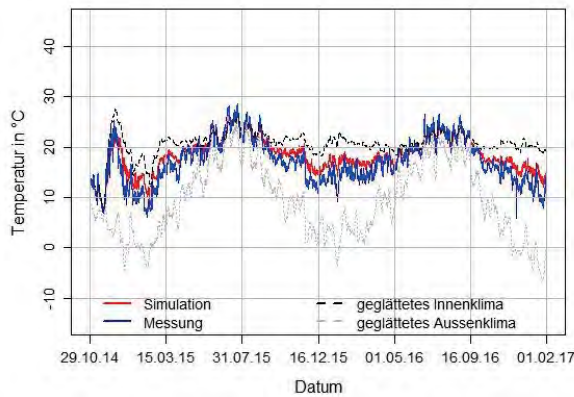


Abbildung 138: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-10) in Aarwangen.

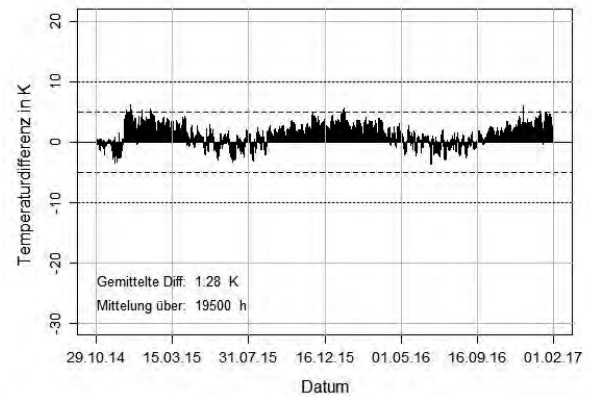


Abbildung 139: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-10) in Aarwangen.



Verlauf der relativen Feuchte:

Nord-West Wand in Aarwangen:

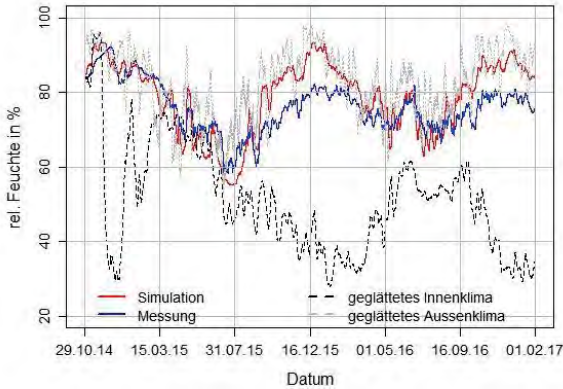


Abbildung 140: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Innenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen.

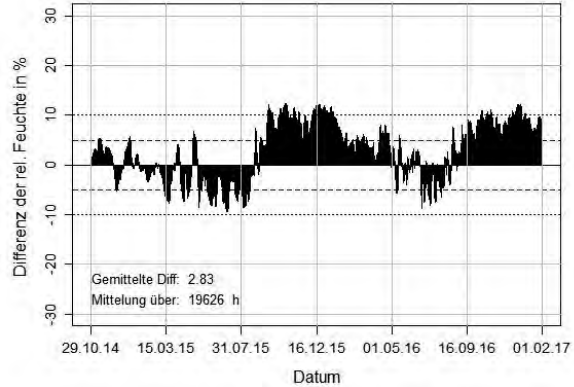


Abbildung 141: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Mauerwerks der Nord-West Wand (NW-7) in Aarwangen.

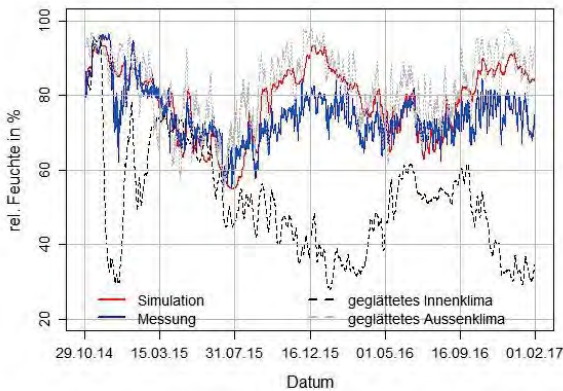


Abbildung 142: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.

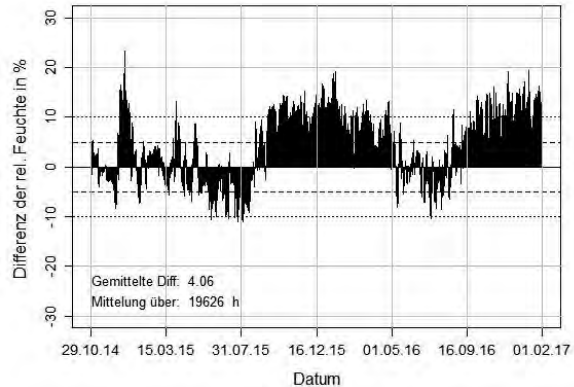


Abbildung 143: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Aarwangen.

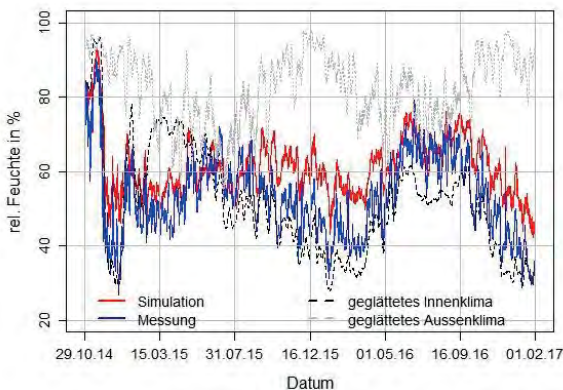


Abbildung 144: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-10) in Aarwangen.

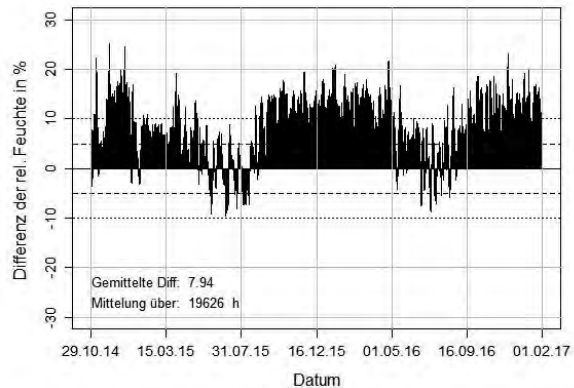


Abbildung 145: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-10) in Aarwangen.

Süd-West Wand in Aarwangen:

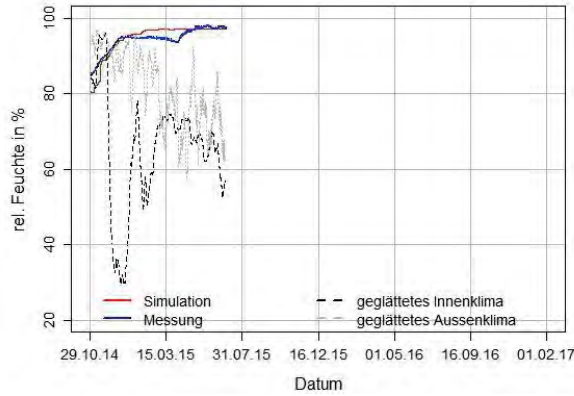


Abbildung 146: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Innenbereich des Mauerwerks der Süd-West Wand (SW-7) in Aarwangen.

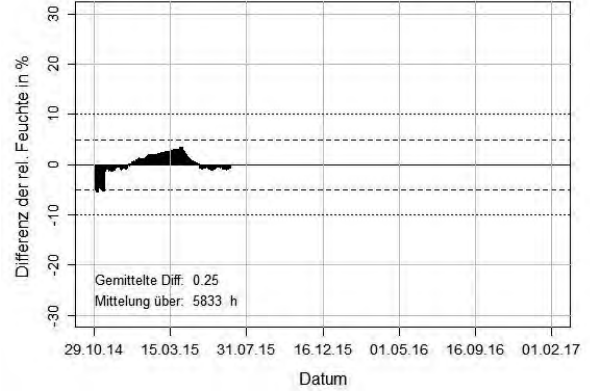


Abbildung 147: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Mauerwerks der Süd-West Wand (SW-7) in Aarwangen.

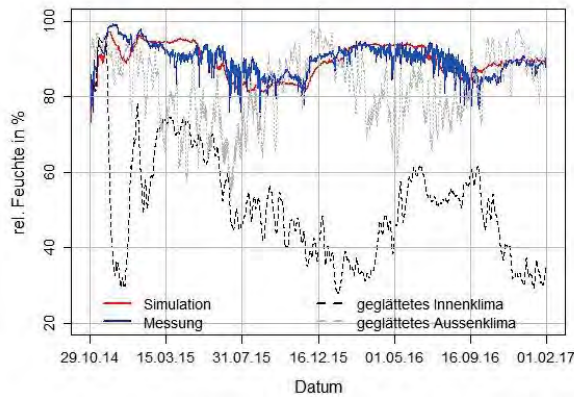


Abbildung 148: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.

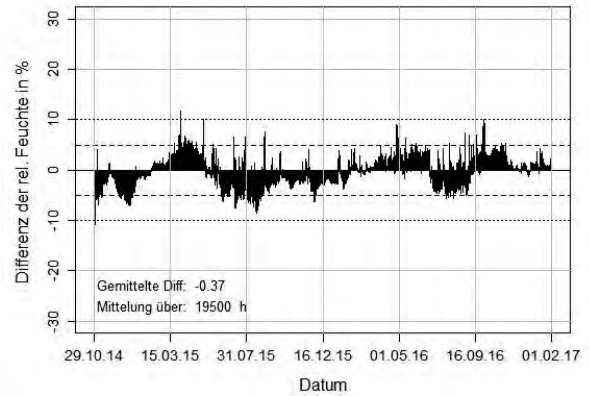


Abbildung 149: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Aarwangen.

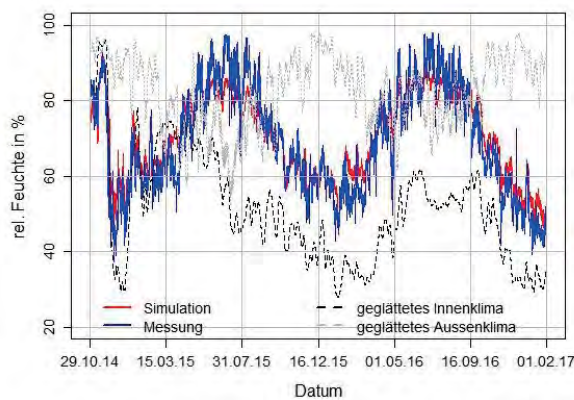


Abbildung 150: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-10) in Aarwangen.

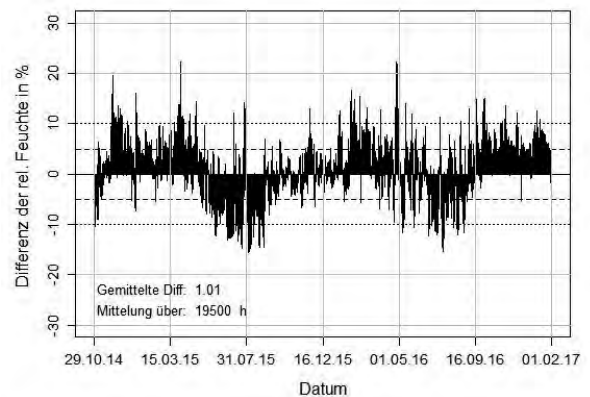


Abbildung 151: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-10) in Aarwangen.



Anhang G2: Vergleich in situ Messungen/Simulation Brüttelen

Temperaturverlauf:

Nord-West Wand in Brüttelen:

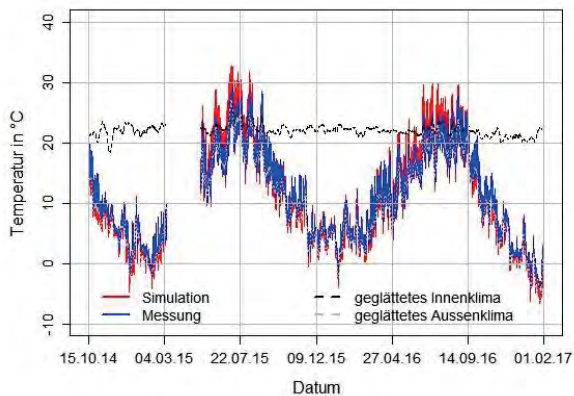


Abbildung 152: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenputz der Nord-West Wand (NW-1) in Brüttelen.

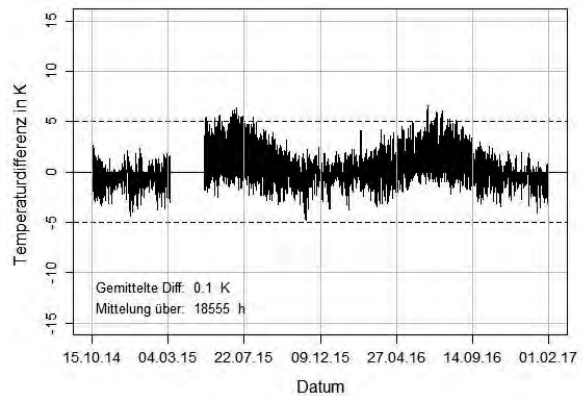


Abbildung 153: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Nord-West Wand (NW-1) in Brüttelen.

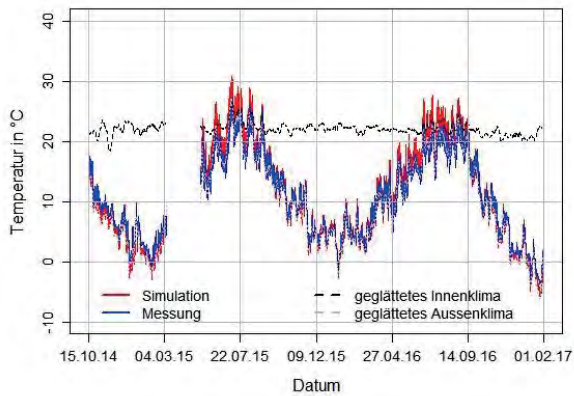


Abbildung 154: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-4) in Brüttelen.

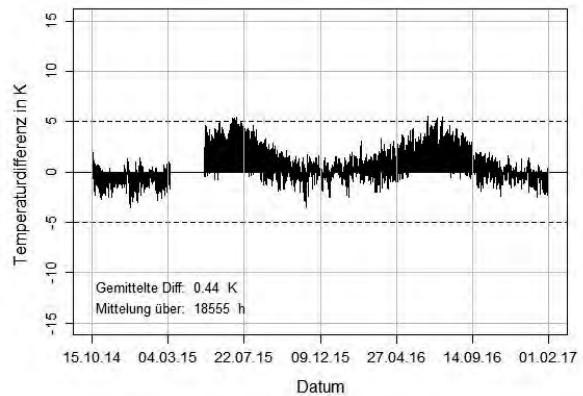


Abbildung 155: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-4) in Brüttelen.

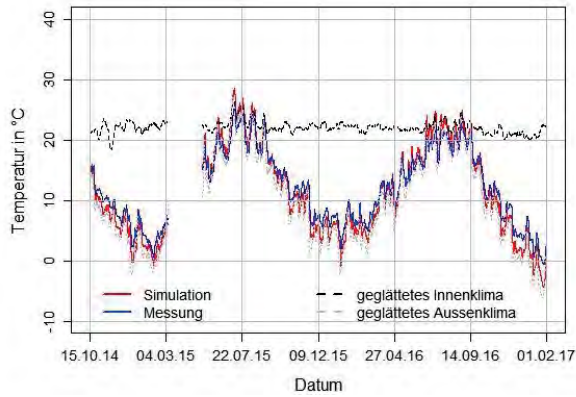


Abbildung 156: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-6) in Brüttelen.

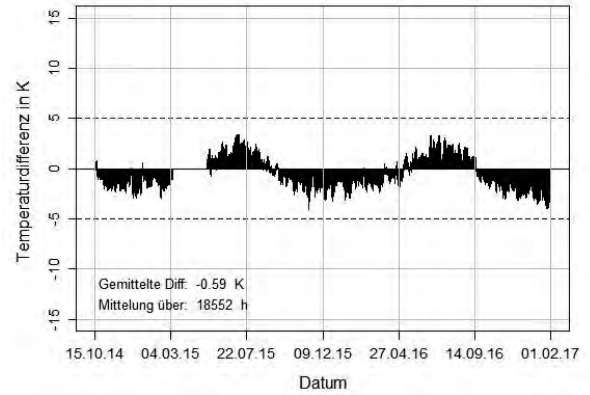


Abbildung 157: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-6) in Brüttelen.

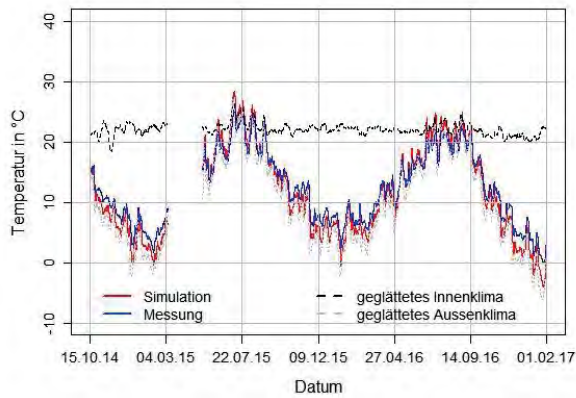


Abbildung 158: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.

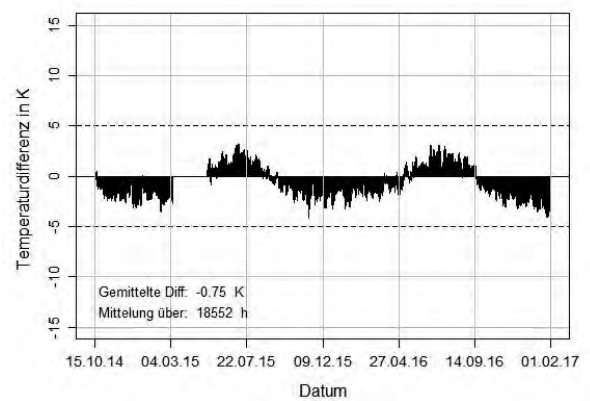


Abbildung 159: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.

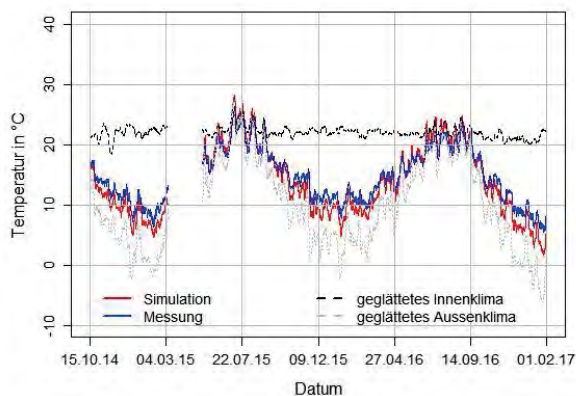


Abbildung 160: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Brüttelen.

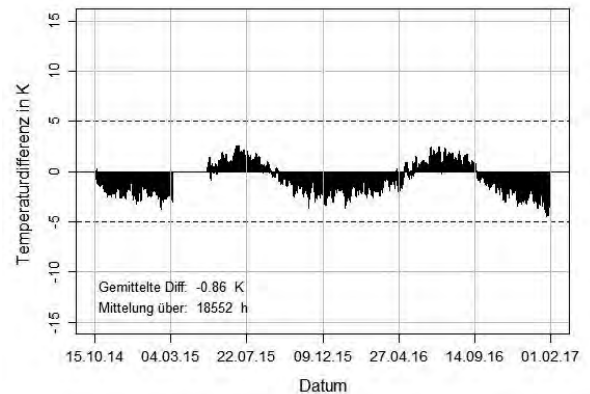


Abbildung 161: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Brüttelen.

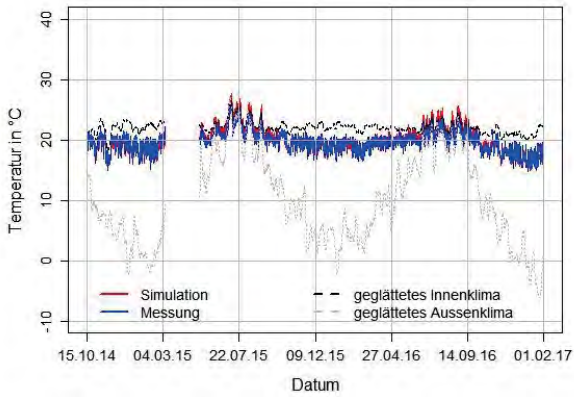


Abbildung 162: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Nord-West Wand (NW-9) in Brüttelen.

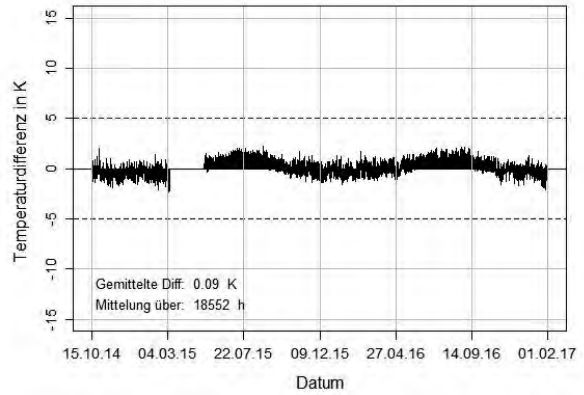


Abbildung 163: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Nord-West Wand (NW-9) in Brüttelen.

Süd-West Wand in Brüttelen:

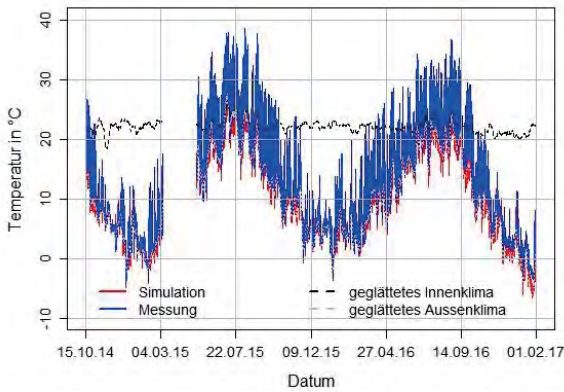


Abbildung 164: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenputz der Süd-West Wand (SW-1) in Brüttelen.

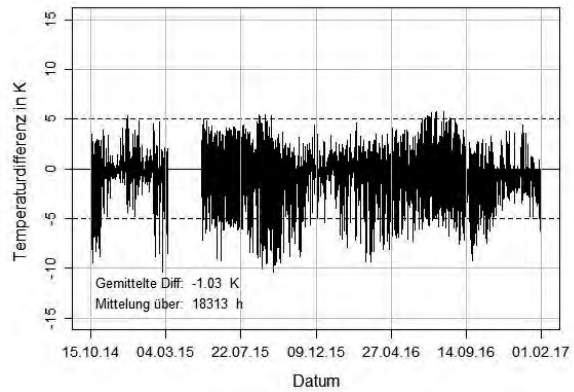


Abbildung 165: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Süd-West Wand (SW-1) in Brüttelen.

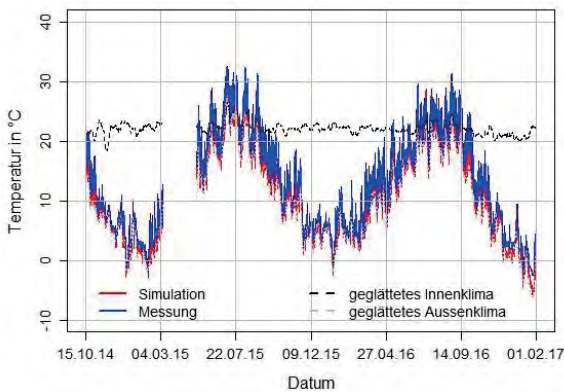


Abbildung 166: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-4) in Brüttelen.

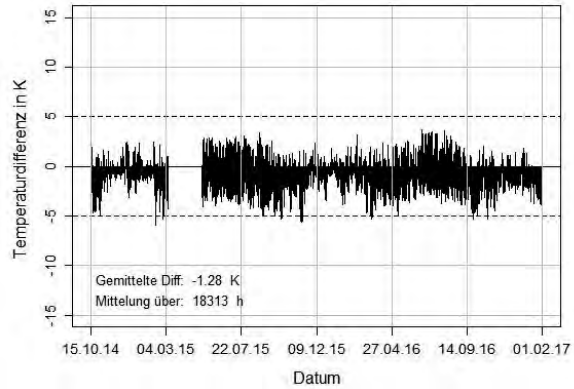


Abbildung 167: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-4) in Brüttelen.

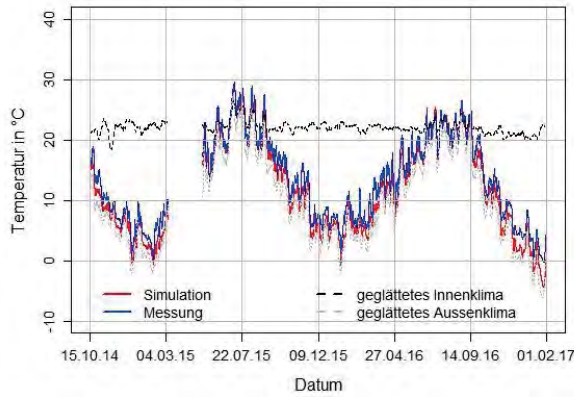


Abbildung 168: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-6) in Brüttelen.

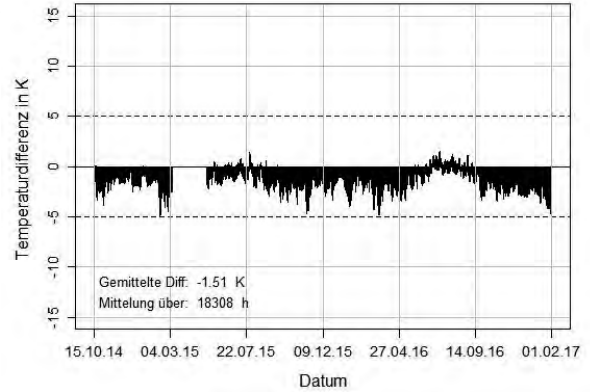


Abbildung 169: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-6) in Brüttelen.

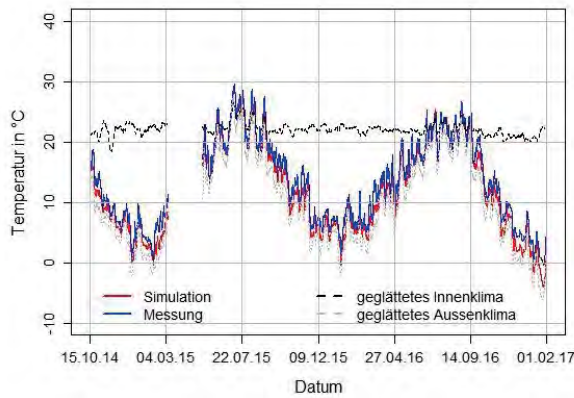


Abbildung 170: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.

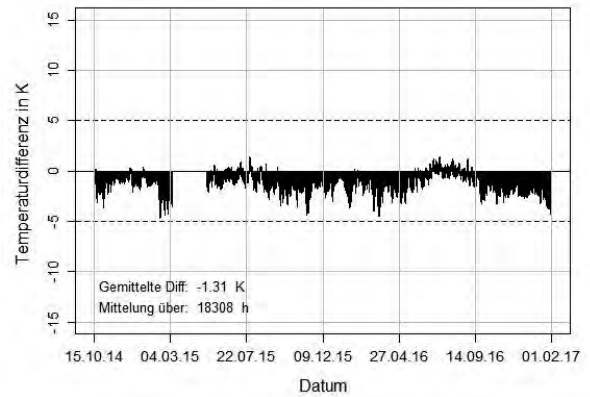


Abbildung 171: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.

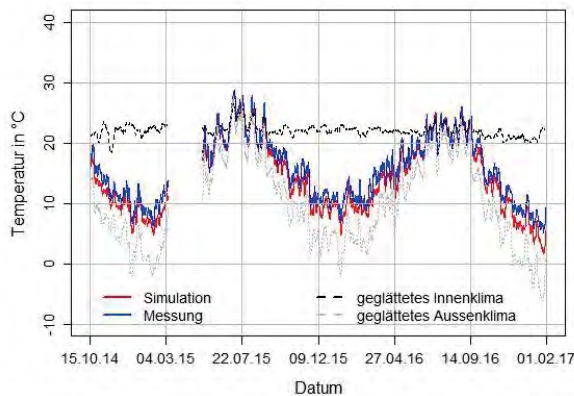


Abbildung 172: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Brüttelen.

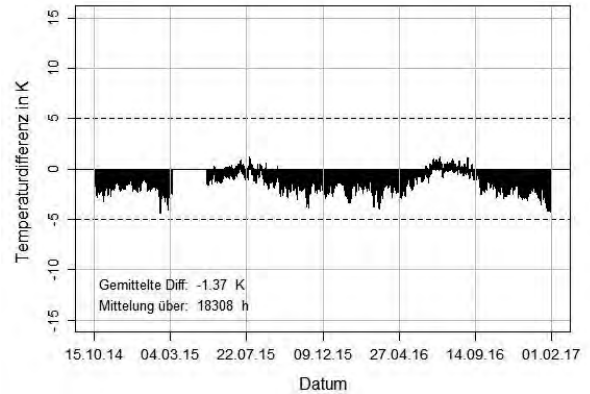


Abbildung 173: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Brüttelen.

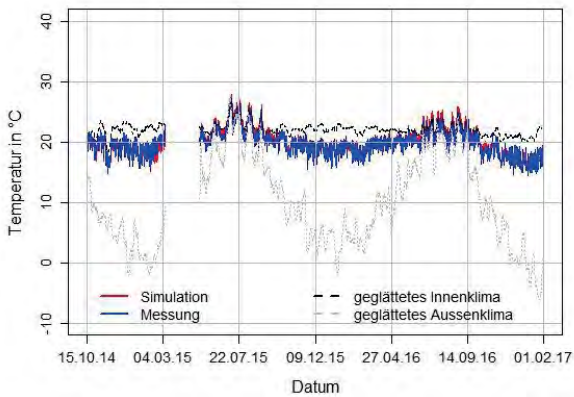


Abbildung 174: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Süd-West Wand (SW-9) in Brüttelen.

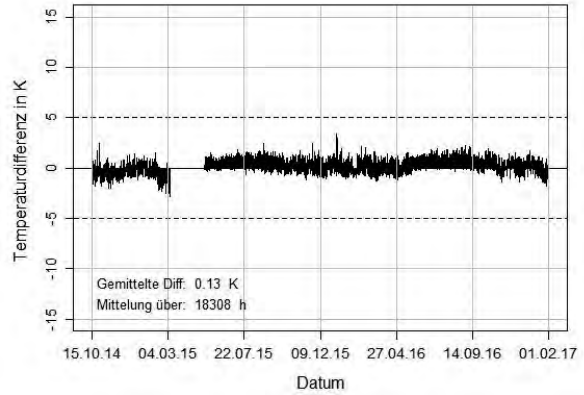


Abbildung 175: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Süd-West Wand (SW-9) in Brüttelen.

Verlauf der relativen Feuchte:

Nord-West Wand in Brüttelen:

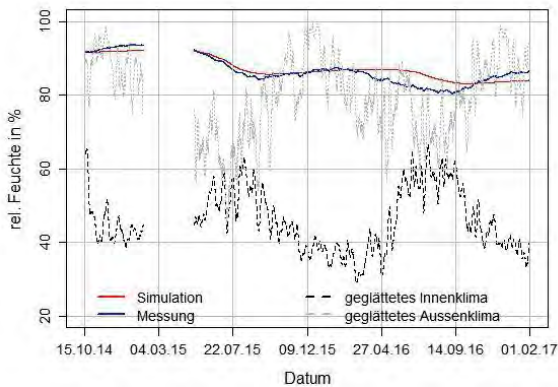


Abbildung 176: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Innenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-6) in Brüttelen.

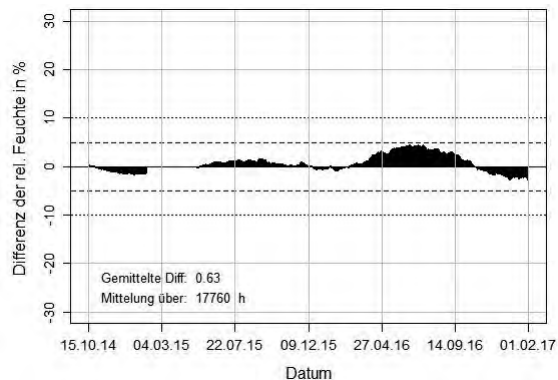


Abbildung 177: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Bruchsteins der Nord-West Wand (NW-6) in Brüttelen.

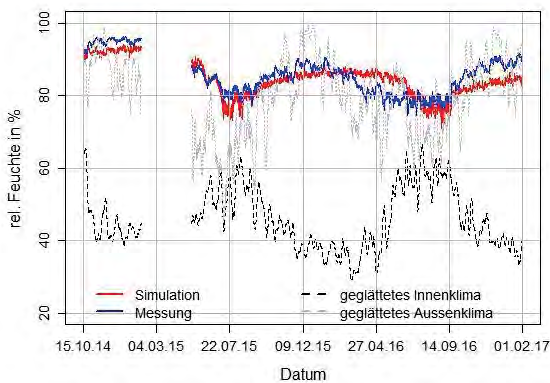


Abbildung 178: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.

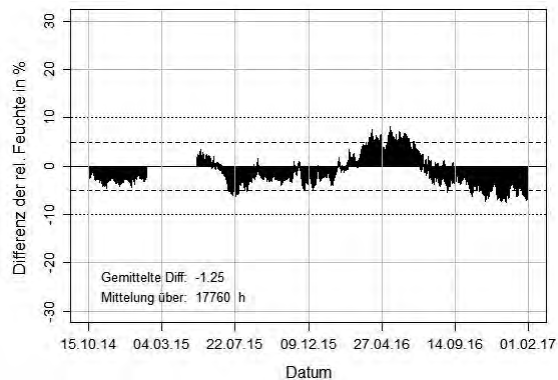


Abbildung 179: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nord-West Wand (NW-7) in Brüttelen.

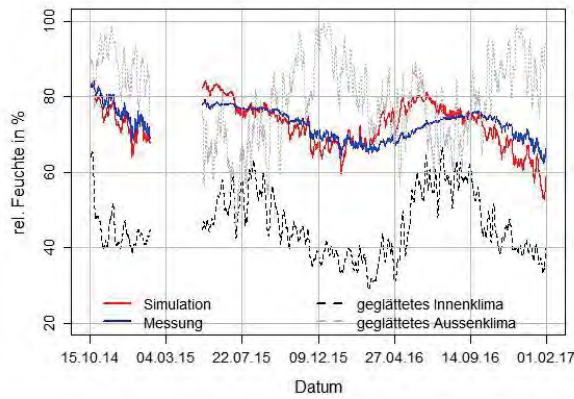


Abbildung 180: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Brüttelen.

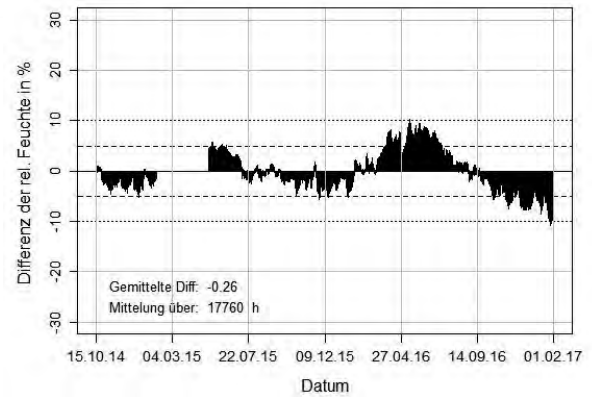


Abbildung 181: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Nord-West Wand (NW-8) in Brüttelen.

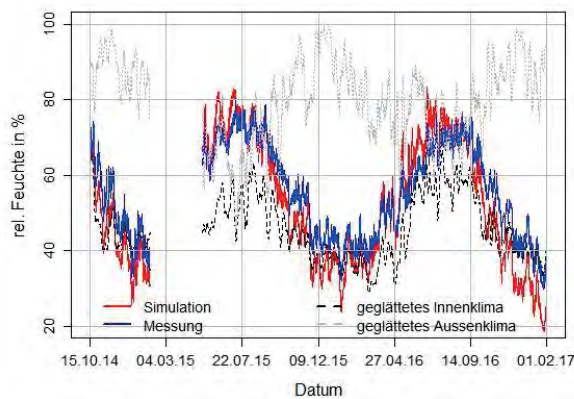


Abbildung 182: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Nord-West Wand (NW-9) in Brüttelen.

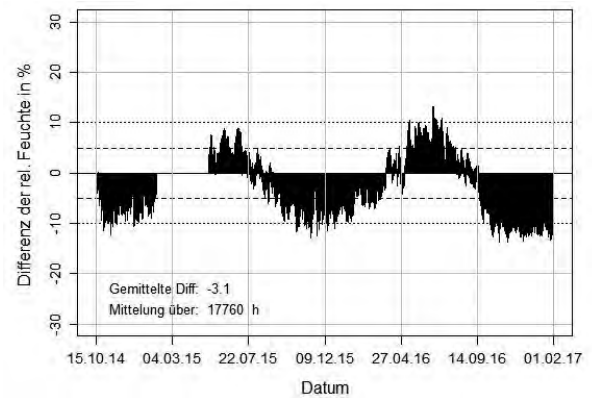


Abbildung 183: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Nord-West Wand (NW-9) in Brüttelen.

Süd-West Wand in Brüttelen:

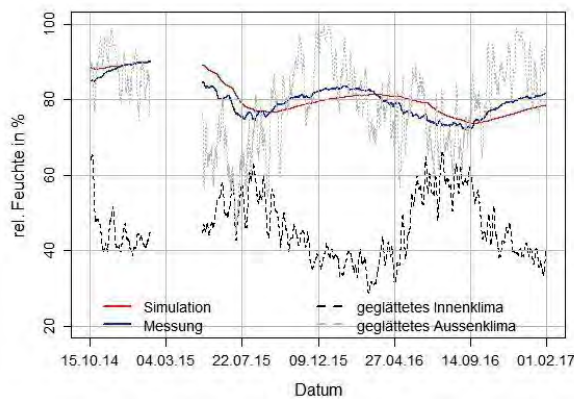


Abbildung 184: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Innenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-6) in Brüttelen.



Abbildung 185: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Bruchsteins der Süd-West Wand (SW-6) in Brüttelen.

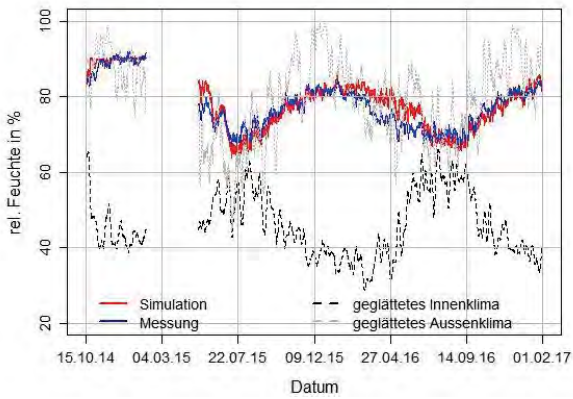


Abbildung 186: Gemessene und simulierte relative Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.

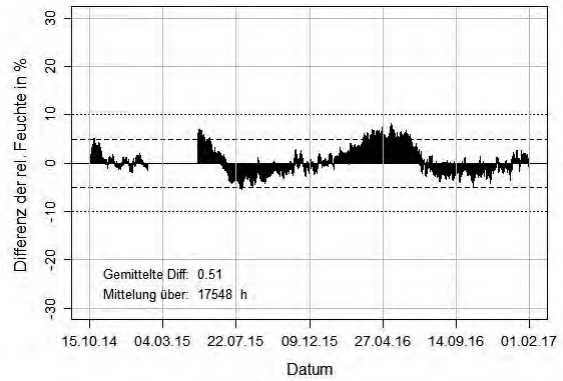


Abbildung 187: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Süd-West Wand (SW-7) in Brüttelen.

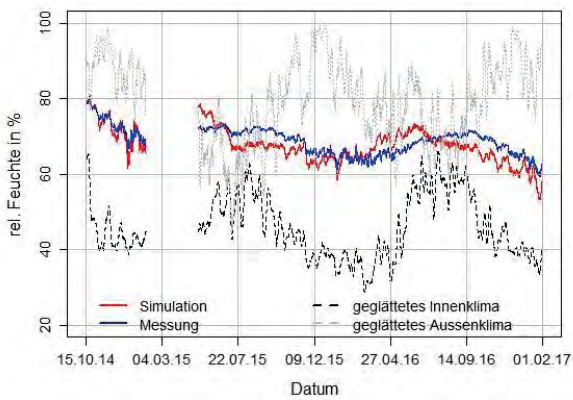


Abbildung 188: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Brüttelen.

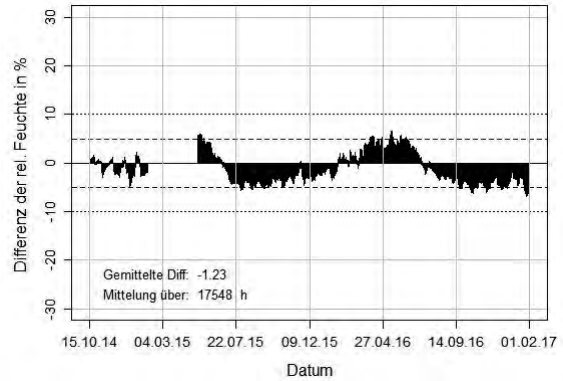


Abbildung 189: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Süd-West Wand (SW-8) in Brüttelen.

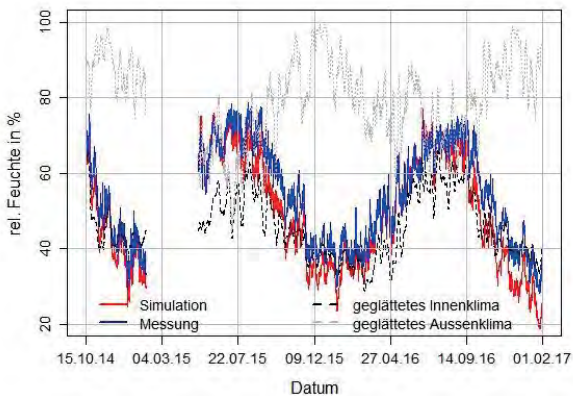


Abbildung 190: Gemessene und simulierte relative Feuchte in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Süd-West Wand (SW-9) in Brüttelen.

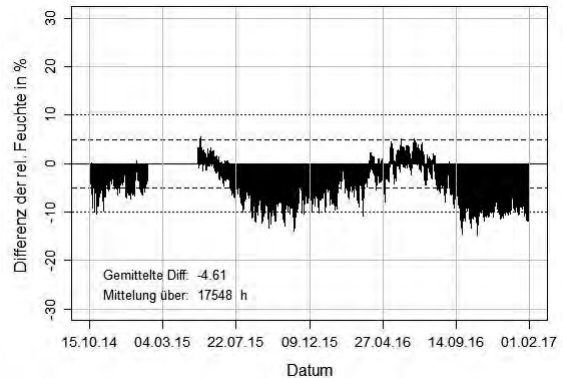


Abbildung 191: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung vor der Dampfbremse der Süd-West Wand (SW-9) in Brüttelen.

Anhang G3: Vergleich in situ Messungen/Simulation Bütschwil

Temperaturverlauf:

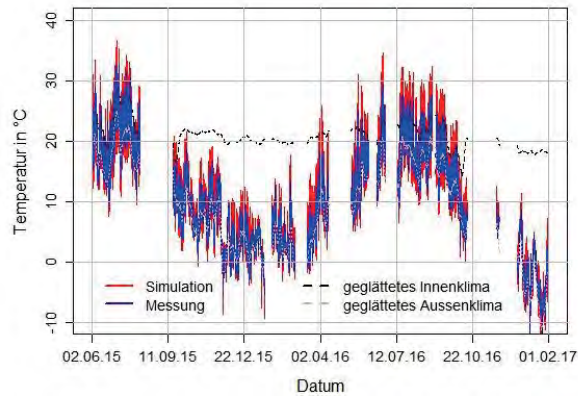


Abbildung 192: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenputz der Nordwand (N-1) in Bütschwil.

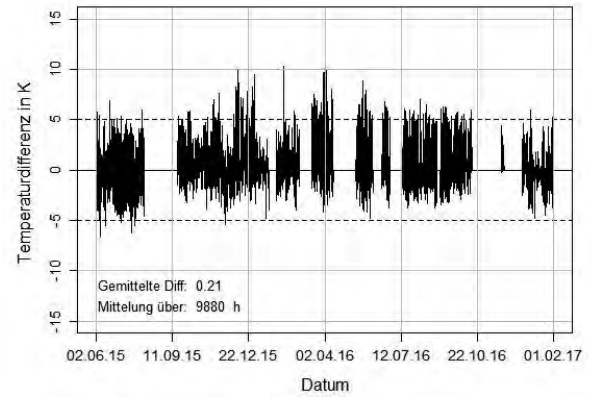


Abbildung 193: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenputz der Nordwand (N-1) in Bütschwil.

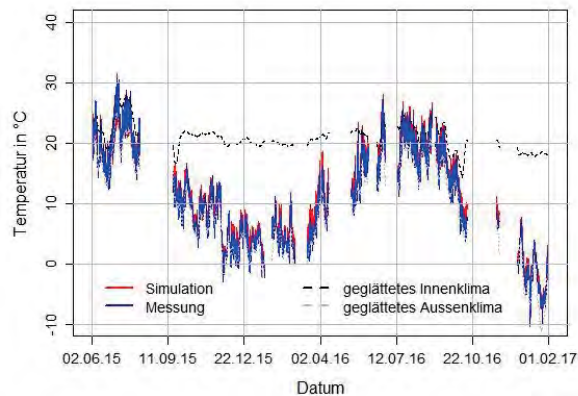


Abbildung 194: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Aussenbereich des Backsteins der Nordwand (N-4) in Bütschwil.

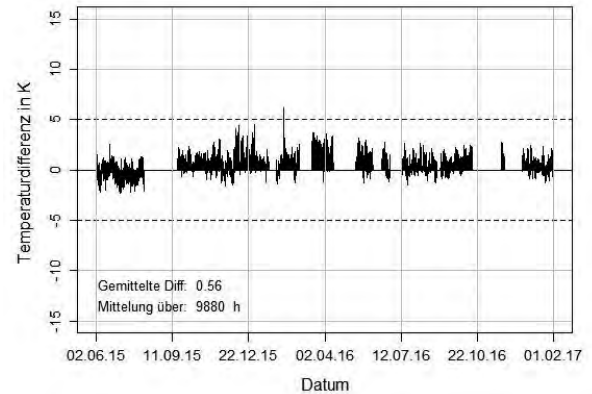


Abbildung 195: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Aussenbereich des Backsteins der Nordwand (N-4) in Bütschwil.

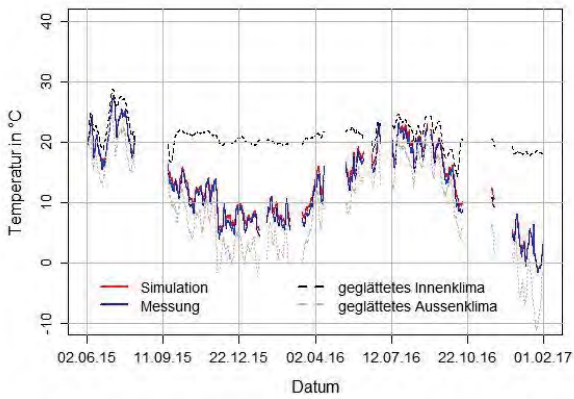


Abbildung 196: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Innenbereich des Backsteins der Nordwand (N-6) in Bütschwil.

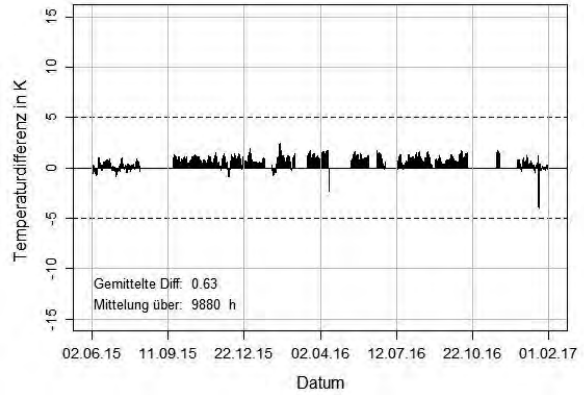


Abbildung 197: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Innenbereich des Backsteins der Nordwand (N-6) in Bütschwil.

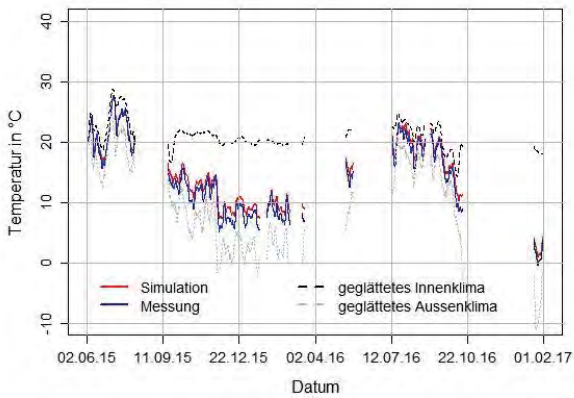


Abbildung 198: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.

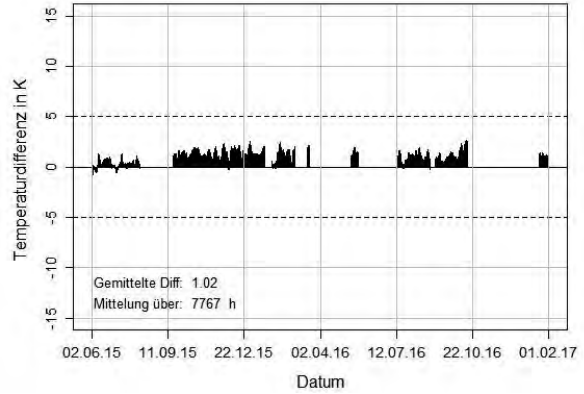


Abbildung 199: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.

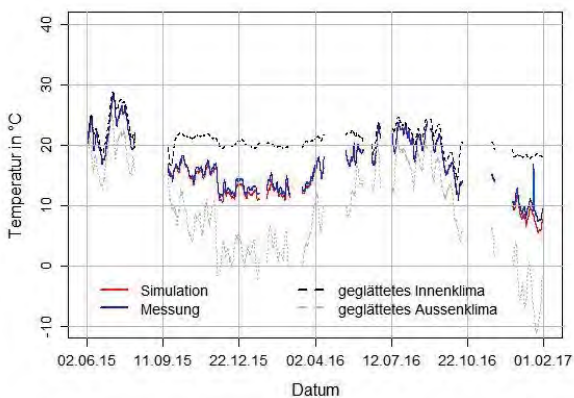


Abbildung 200: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.

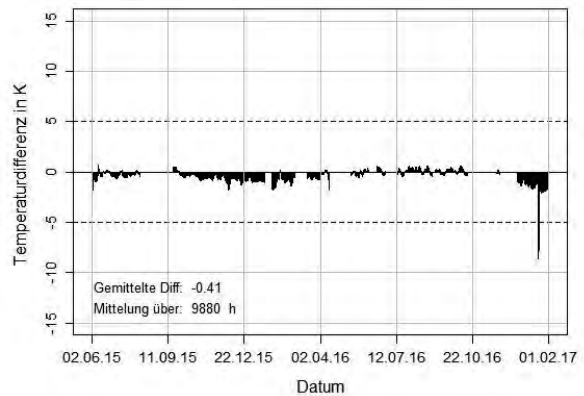


Abbildung 201: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten Temperatur in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.

Verlauf der relativen Feuchte:

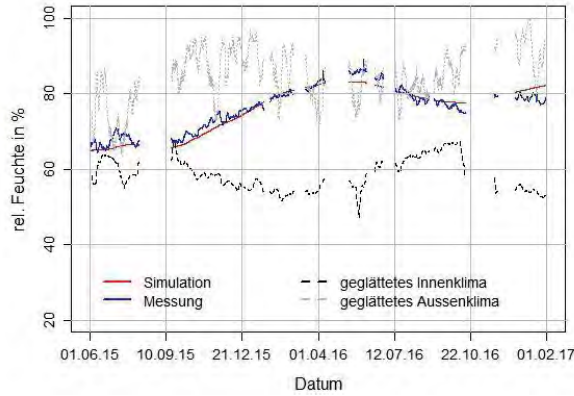


Abbildung 202: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte im Innenbereich des Backsteins der Nordwand (N-6) in Bütschwil.

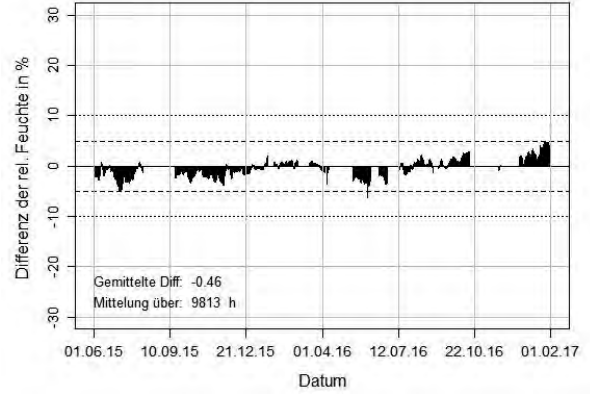


Abbildung 203: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Innenbereich des Backsteins der Nordwand (N-6) in Bütschwil.

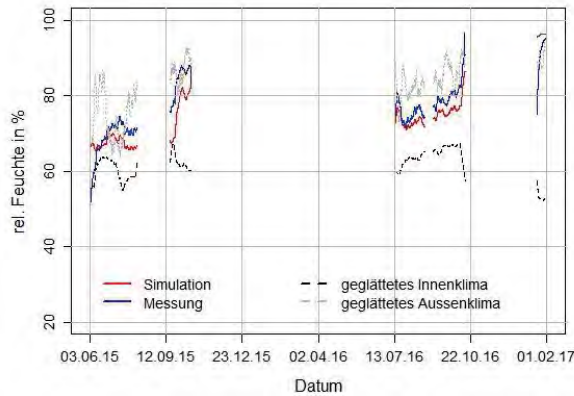


Abbildung 204: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.



Abbildung 205: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte im Bereich des Übergangs Mauerwerk und Dämmung der Nordwand (N-7) in Bütschwil.

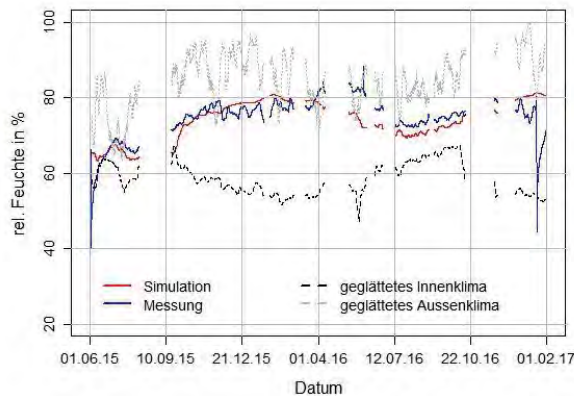


Abbildung 206: Gemessener und simulierter Verlauf der relativen Feuchte in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.

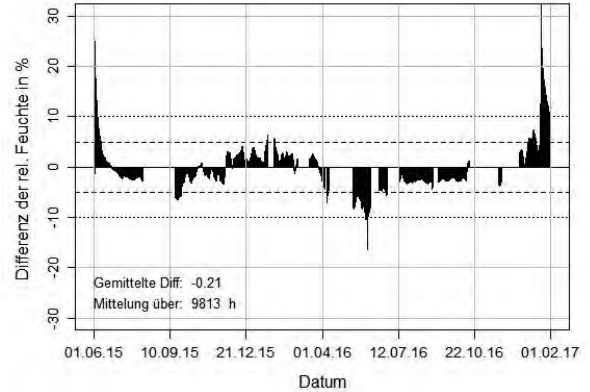


Abbildung 207: Differenz zwischen der gemessenen und simulierten relativen Feuchte in der Innendämmung der Nordwand (N-8) in Bütschwil.