



Vor-Ort-Messung Holzbaukonstruktionen

Vor-Ort-Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Holzkonstruktionen

Forschungsbericht

Schlussbericht

Bericht Nr. 72FE-008702-R-10-SB

Auftrag Nr. R.008702-10-72FE-01

Klassifizierung Öffentlich

Datum 27.02.2019

Fördermittelgeber Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Wald, Claire-Lise Suter Thalmann
3003 Bern

**Adresse der
Forschungsstelle** Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Kompetenzbereich Brandsicherheit und Bauphysik
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel
Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91

Verfasser Barbara Wehle, Prof. Dr. Christoph Geyer

Projektverantwortlicher Prof. Dr. Christoph Geyer

Institutsleiter Prof. Andreas Müller

Abstract

Im Gebäudepark Schweiz müssen circa 1 Mio. Gebäude energetisch saniert werden. Als Grundlage für die Planung von energetischen Ertüchtigungsmassnahmen ist die Kenntnis des Wärmeschutzes der Bestandsgebäude wichtig. Der Wärmeschutz von Aussenbauteilen von Bestandsgebäuden ist aber häufig nicht bekannt. Dies gilt sowohl für den genauen Aufbau, als auch für die wärmeschutztechnischen Kenngrössen dieser Bauteile.

Daher wurden in den vergangenen Jahren eine Reihe von Messgerätesätzen entwickelt, mit denen der Wärmedurchgangskoeffizient von Aussenbauteilen in Bestandsbauten zerstörungsfrei gemessen werden kann. Allerdings wurden diese Messverfahren bisher weder mit anderen Messverfahren, wie zum Beispiel Labormessverfahren, verglichen und validiert, noch wurde der Einfluss der unkontrollierbaren Randbedingungen im Feld auf die Messgenauigkeit und die Messergebnisse systematisch untersucht. Aus diesem Grunde bestehen nach wie vor Vorbehalte gegen die Anwendung dieser Messverfahren in der Praxis.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird die Anwendbarkeit verschiedener In-situ-Messmethoden zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der Aussenbauteile von Holzgebäuden überprüft und gegebenenfalls verbessert.

Dazu werden mit zwei verschiedenen Messgeräten in-situ die U-Werte von zwei Holzwänden bestimmt. Aus der Analyse der Wetterdaten und dem Vergleich der Messergebnisse mit diesen werden die Einflüsse der Randbedingungen vor Ort abgeleitet. Es wird aber auch überprüft, inwieweit die vor Ort gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten mit Laborwerten vergleichbar sind. Dazu werden Labormessungen mit dem geschützten Heizkastenverfahren, dem sogenannten Hotbox-Verfahren, an Prüfkörpern der zwei Wandaufbauten durchgeführt. Parallel zu den Hotboxmessungen werden die U-Werte der Probekörper ebenfalls mit den In-Situ-Messgeräten bestimmt. Dadurch ist ein direkter Vergleich zwischen Hotbox und In-Situ-Messgeräten möglich.

Keywords In-Situ-Messung,
Wärmedurchgangskoeffizient,
Heizkastenverfahren, Holzbauweise

Inhaltsverzeichnis

1	Vorgehensweise und Ziele	5
1.1	Ausgangslage und Vorgehen	5
1.2	Zielsetzungen	5
2	Begleitende Arbeiten und Projektbeteiligte	6
2.1	Vorhergehende und begleitende Arbeiten	6
2.2	Wirtschaftspartner	6
3	Untersuchte Wandaufbauten	7
3.1	Massivholzwand	7
3.1.1	Materialkennwerte	7
3.1.2	Berechnungen wärmetechnische Eigenschaften	8
3.2	Holzrahmenkonstruktion	9
3.2.1	Materialkennwerte	10
3.2.2	Berechnungen wärmetechnische Eigenschaften	10
4	Messtechnik und Messverfahren	13
4.1	In-situ-Messgeräte	13
4.1.1	In-Situ-Messverfahren nach ISO 9869-1	13
4.1.1.1	Messgeräte	13
4.1.1.2	Kalibrierverfahren	13
4.1.1.3	Messverfahren	14
4.1.1.4	Datenauswertung	15
4.1.1.5	Messgenauigkeit	16
4.1.2	gSKIN® Messgerät	16
4.1.3	Almemo® Messgerät	17
4.2	Labormessungen	18
4.2.1	Beschreibung der Anlage	18
4.2.2	Prinzip der Messung	20
4.2.3	Stabilitätskriterien für eine gültige Messung	21
5	Ablauf und Ergebnisse In-Situ-Messungen	22
5.1	Prüfaufbau	22
5.2	Messperiode	25
5.3	Eigenschaften der Prüfwände	25
5.4	Prüfergebnisse	25
5.4.1	Massivholzwand	25
5.4.2	Holzrahmenwand	29
6	Ablauf und Ergebnisse Labormessungen	32
6.1	Prüfaufbau	32
6.2	Prüfbedingungen	32
6.3	Prüfergebnisse	33
6.3.1	Hotboxmessungen	33
6.3.2	In-Situ-Messgeräte	34
6.3.2.1	Massivholzwand	34
6.3.2.1.1	Resultate der Mitteltemperaturen 15°C, 10°C und 5°C	34

6.3.2.1.2 Zusammenfassende Darstellung	38
6.3.2.2 Holzrahmenwand	38
6.3.2.2.1 Resultate Mitteltemperatur von 15°C	39
6.3.2.2.2 Resultate Mitteltemperatur von 10°C	40
6.3.2.2.3 Resultate Mitteltemperatur von 5°C	45
6.3.2.2.4 Zusammenfassende Darstellungen	46
7 Schlussfolgerungen	49
7.1 In-Situ-Messungen	49
7.1.1 Massivholzwand	49
7.1.2 Holzrahmenwand	52
7.2 Labormessungen	54
7.2.1 Hotboxmessungen	54
7.2.2 In-Situ-Messgeräte	55
7.3 Vergleich der Ergebnisse In-Situ-Messungen zu Hotboxmessungen	55
8 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	59
8.1 Umfang des Berichts	59
9 Verzeichnisse	60
9.1 Abbildungsverzeichnis	60
9.2 Tabellenverzeichnis	64
9.3 Literaturverzeichnis	65
Anhang A: Beschreibung Prüfelemente	66
A.1 Produktionspläne der Testelemente	66
Anhang B: Beschreibung Messtechnik	69
B.1 Datenblatt Messsystem gSKIN®, Fa. greenTEG AG	69
B.2 Datenblatt Messsystem Almemo, Fa. Ahlborn GmbH	70
B.3 Detaillierte Prinzipskizzen Heizkasten und Prüfrahmen	74
B.4 Funktionsdiagramm geregelter Heizkasten TDW 4242, Firma Taurus Instruments AG	
	76
Anhang C: Lage der In-Situ-Messgeräte	77

1 Vorgehensweise und Ziele

1.1 Ausgangslage und Vorgehen

Um die Klimaschutzziele der Schweiz zu erreichen, muss der Schweizer Gebäudebestand energetisch ertüchtigt werden. Ein Bestandteil der notwendigen energetischen Sanierungsmassnahmen ist die Verringerung der Wärmeverluste über die Gebäudehülle.

Um das Einsparpotenzial der Sanierungsmassnahmen der Gebäudehülle und damit das energetische Potenzial von Bestandsgebäuden richtig einzuschätzen, muss der Wärmeschutz der Aussenbauteile bekannt sein. Oftmals ist, auch bei Holzgebäuden, jedoch weder der genaue Aufbau noch der Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile dokumentiert. Es gibt daher ein grosses Interesse, den Wärmeschutz von bestehenden Aussenbauteilen vor Ort zu bestimmen.

Darüber hinaus besteht auch ein Bedarf zur Überprüfung von Wärmedurchgangskoeffizienten von Aussenbauteilen an Neubauten, zum Beispiel zur Qualitätssicherung der Ausführung von Wärmedämmungen. Das gilt besonders für leichte Holzbaukonstruktionen mit Wärmedämmung in geschlossenen Hohlräumen.

Mittlerweile werden Messgerätesätze zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten vor Ort angeboten. Allerdings zeigen sich bei der Anwendung dieser Messgeräte immer wieder inkonsistente Messergebnisse ([1], [2], [3], [4] und [5]). Die Ursachen dieser Messwertabweichungen sind bisher nicht geklärt. Insbesondere ist unklar, ob diese durch Ungenauigkeiten der Messmethode, durch ungünstige Randbedingungen oder durch Fehlbedienung der Messgeräte verursacht werden.

Daher soll die Anwendbarkeit verschiedener In-Situ-Messmethoden zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der Aussenbauteile von Holzgebäuden überprüft und verbessert werden. Im Rahmen des Projektes werden Messgerätesätze der Firma greenTEG AG mit der Produktbezeichnung «gSKIN® KIT» eingesetzt. Des Weiteren werden Messgeräte und Sensoren der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH verwendet. Diese Messgerätesätze werden entsprechend der Produktbezeichnung des Datenloggers im Folgenden als «Almemo®»-Gerätesätze bezeichnet.

Es werden die Wärmedurchgangskoeffizienten von zwei Wänden in Holzbauweise jeweils mit zwei verschiedenen In-Situ-Messgeräten bestimmt. Aus der Analyse der Klimarandbedingungen und dem Vergleich der Messergebnisse werden die Einflüsse der Randbedingungen vor Ort abgeleitet.

In einem zweiten Schritt werden Labormessungen mit dem geschützten Heizkastenverfahren (Hotbox-Verfahren) gemäss [6] und [7] an Prüfkörpern mit gleichem Aufbau der zuvor in-situ gemessenen Holzbauwände durchgeführt. Damit können zum einen die in-situ gemessenen U-Werte der Wandbauteile mit den Laborwerten verglichen werden. Zum anderen können die In-Situ-Messgeräte unter definierten Randbedingungen getestet und mit einander verglichen werden.

1.2 Zielsetzungen

Mit Hilfe der Untersuchungen sollen die In-situ-Messverfahren so verbessert werden, dass ein zuverlässiges Verfahren mit bekannter sowie möglichst hoher Genauigkeit zur Verfügung steht, mit dem der Wärmeschutz von Aussenbauteilen in Holzbauweise in Form präziser U-Werte auch vor Ort bestimmt werden kann.

Die verbesserte Kenntnis des Wärmeschutzes dieser Bauteile bildet die Grundlage für massgeschneiderte energetische Sanierungen von Bestandsgebäuden aus Holz. Die Messverfahren können aber auch zur Qualitätssicherung des Wärmeschutzes von Neubauten herangezogen werden.

2 Begleitende Arbeiten und Projektbeteiligte

Neben dem Erkenntnisgewinn aus einigen studentischen Arbeiten profitierte das Projektteam der Berner Fachhochschule Architektur Holz und Bau (BFH AHB) im Forschungsprojekt auch von der Unterstützung durch Wirtschaftspartner, wie nachfolgend beschrieben.

2.1 Vorhergehende und begleitende Arbeiten

Vor Beginn des Forschungsprojektes wurden im Rahmen von durch das Projektteam betreuten studentischen Arbeiten bereits Feldversuche mit Vor-Ort-Messgeräten zur Messung der Wärmedurchgangskoeffizienten von Aussenwänden an Holzrahmenbau- und Ziegelwänden [8] sowie Bruchsteinwänden durchgeführt [9]. Für die In-Situ-Messungen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden zudem im Rahmen einer weiteren studentischen Arbeit [9] Vorauswertungen der Messdaten vorgenommen.

2.2 Wirtschaftspartner

Das Forschungsprojekt wurde durch die Wirtschaftspartner Nägeli AG sowie Knauf Insulation GmbH unterstützt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Kontaktdaten beteiligter Wirtschaftspartner.

Nr.	Kontakt Wirtschaftspartner	Ansprechpersonen
1	TWOODS GmbH Holz- und Innenausbau Zwischenstrasse 27, 9056 Gais	Clemens Koller
2	Knauf Insulation GmbH Hauptstrasse 7 5502 Hunzenschwil	Jörg Kaufmann

Beide Projektpartner leisteten jeweils einen finanziellen Beitrag von Fr. 10'000 zum Projekt. Zusätzlich wurden für die In-Situ-Messungen sowie die Labormessungen von der TWOODS GmbH zwei Prüfelemente in Massivbauweise sowie zwei Prüfelemente in Holzrahmenbauweise hergestellt. Darüber hinaus stellte die TWOODS GmbH auf ihrem Produktionsgelände eine Wand für die In-Situ-Messungen zur Verfügung und unterstützte das Projektteam der BFH AHB bei der Überwachung und beim Datenauslesen.

3 Untersuchte Wandaufbauten

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden Messungen an zwei unterschiedlichen Arten von Holzbauwänden durchgeführt. Aufgrund der Gegebenheiten der Laborprüfeinrichtung ist die Dicke der zu untersuchenden Wände auf ca. 15 cm beschränkt (vgl. dazu Abschnitt 0).

Da moderne Dämmstandards in der Regel Wandaufbauten mit grösseren Dicken notwendig machen, werden für beide Wandtypen spezielle Prüfelemente mit geeigneten Wandstärken für die In-Situ-Messungen sowie Labormessungen vorgängig von der TWOODES GmbH produziert.

Es folgt eine Beschreibung des Aufbaus der Prüfelemente sowie der Materialeigenschaften der Baustoffe. In Anhang A.1 sind zudem die Produktionspläne der Prüfelemente aufgeführt.

3.1 Massivholzwand

Die TWOODES GmbH entwickelte und produziert das Massivholz-Elementbausystems «Appenzellerholz». Bei diesem handelt es sich naturbelassenes Massivholzschichten, die mittels einer patentierten Dübel-Technik miteinander verbunden ist. Dadurch sind keine Verleimungen nötig und das Holz ist auch nach der Montage vollständig naturbelassen.

Die zwei im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Prüfkörper bestehen jeweils aus fünf Schichten Fichtenholz mit einer gesamten Stärke von 150 mm (vgl. Abbildung 1). Die Lagen sind jeweils um 45° zur vorherigen Lage gedreht. Die sägerauen Holzschichten sind dabei klebstofffrei mittels Buchenholzdübeln mechanisch miteinander verbunden. Dadurch weisen die Massivholzelemente zwischen den einzelnen Fichtenholzlagen jeweils ca. ein Millimeter dicke Luftsichten auf. Diese sollen den Wärmedurchgangskoeffizienten zusätzlich verbessern. In der Mitte und an der Aussenseite des Bauteils sind Winddichtungsbahnen angebracht.



Abbildung 1 : Links: Schematische Zeichnung der untersuchten Massivholzelemente bestehend aus fünf Lagen Fichtenholz, verbunden mit Buchenholzdübeln. Zwischen den sägerauen Holzlagen befinden sich ca. 1 mm starke Luftsichten. In der Mitte und an der Aussenseite des Bauteils sind Winddichtungsbahnen angebracht. Rechts: Fotografie Prüfkörper.

3.1.1 Materialkennwerte

Tabelle 2 enthält detaillierte Angaben zu den Eigenschaften der Materialien der Massivholzwand inklusive Quellenangaben.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass gemäss Angaben der TWOODES GmbH bis zu ca. 20 % Tannenholz in den Holzlagen enthalten sein kann. Ob in den im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Prüfelementen Tannenholz enthalten ist und wieviel, ist nicht bekannt. Für die weiteren Berechnungen wird vereinfachend angenommen, dass die Wandelemente ausschliesslich Fichtenholz enthalten.

Tabelle 2 : Eigenschaften Materialien Massivholzwandsystem. « R », « T » und « L » stehen für radial, tangential und longitudinale Faserrichtung des Holzes.

Materialschicht	«Produktbezeichnung»/Quelle	Rohdichte ρ kg/m ³	Spezifische Kapazität c_p J/kg·K	Wärmeleitfähigkeit λ W/m·K		
Massivholzlagen, ca. 30 mm	Fichtenholz [10] [12]	420	1510	$R = 0.09$	$T = 0.07$	$L = 0.22$
Luftsichten, ca. 1 mm	[13]	1.23	1008	0.07 (interpoliert nach Tab. 8 in [13])		
Winddichtungen	«Knauf LDS 0.04», ähnliches Material aus Datenbank in [14]	200	1404	0.2-		

3.1.2 Berechnungen wärmetechnische Eigenschaften

Die Berechnungen der Wärmedurchgangskoeffizienten der Wandaufbauten erfolgt nach EN ISO 6946 [13].

Vernachlässigt man die Holzdübel, so handelt es sich bei der Massivholzwand um ein homogenes Bauteil. Eine Vernachlässigung der Holzdübel ist gemäss EN ISO 6946, Anhang F.3 zulässig, da diese eine Wärmeleitfähigkeit λ unterhalb von 1 W/m²K aufweisen. Für dieses ist zunächst der Gesamt-Wärmedurchgangswiderstand R_{tot} mit der Einheit m²·K·W⁻¹ nach untenstehender Formel 1 zu berechnen.

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad \text{Formel 1}$$

Dabei ist

R_{si} der innere Wärmeübergangswiderstand, in m²·K/W;

R_1, R_2, \dots, R_n sind die Bemessungs-Wärmedurchlasswiderstände jeder Schicht, in m²·K/W;

R_{se} der äussere Wärmeübergangswiderstand, in m²·K/W.

Die Bemessungswerte der Wärmedurchlasswiderstände der Materialschichten werden dabei nach Formel 2 berechnet.

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad \text{Formel 2}$$

Dabei ist

d_n die Dicke der Baustoffsicht in der Komponente, in m;

λ_n die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes in W/(m·K), berechnet oder aus Tabellen entnommen.

Für die inneren und äusseren Wärmeübergangswiderstände sind bei horizontaler Richtung des Wärmestromes nach [13] Werte von $R_{si} = 0.13$ und $R_{se} = 0.04$ m²·K·W⁻¹ einzusetzen.

Mit den in Tabelle 2 aufgeführten Eigenschaften der Materialschichten ergibt sich für den Prüfkörper «Massivholzwand» nachfolgend aufgeführter Wärmedurchgangswiderstand R_T , berechnet auf mindestens drei wertanzeigende Stellen.

$$\begin{aligned}
 R_{tot} &= R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} = \\
 &= 0.13 + 5 * \frac{0.03}{0.09} + 3 * \frac{0.001}{0.07} + 2 * \frac{0.0004}{0.2} + 0.04 \\
 &= 1.88 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \quad \text{Formel 3}$$

Hinweis: Es wird davon ausgegangen, dass die Fichtenholzlagen mehrheitlich eine radiale Faserrichtung aufweisen.

Durch den Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes wird der Wärmedurchgangskoeffizient der Massivholzwand (MHW) U_{MHW} in $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ berechnet und als Endergebnis auf zwei Dezimalstellen gerundet angegeben (vgl. Formel 4).

$$U_{MHW} = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{1.88 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 0.53 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Formel 4}$$

Für die Auswertung der In-Situ-Messungen des U-Wertes ist die flächenbezogene Wärmekapazität des gemessenen Bauteiles relevant (vgl. dazu Abschnitt 4.1.1). Die Eigenschaften der Materialien werden Tabelle 2 entnommen. Für ein Bauteil aus homogenen Schichten wird die flächenbezogene Wärmekapazität wie folgt berechnet: aus dem Produkt der spezifischen Wärmekapazität c_p mit der Rohdichte ρ des Bauteiles ergibt sich die volumetrische Wärmekapazität c_v :

$$c_v = c_p \cdot \rho = 0.00151 \frac{MJ}{kg \cdot K} \cdot 420 \frac{kg}{m^3} = 0.634 \frac{MJ}{m^3 \cdot K} \quad \text{Formel 5}$$

Die flächenbezogene Wärmekapazität c' in kJ/m^2K berechnet sich dann unter Berücksichtigung der Bauteildicke d in m wie folgt:

$$c' = c_v \cdot d = 0.634 \frac{MJ}{m^3 \cdot K} \cdot 0.15 m = 95.1 \frac{kJ}{m^2 \cdot K} \quad \text{Formel 6}$$

3.2 Holzrahmenkonstruktion

Bei dem zweiten Wandtyp handelt es sich um eine klassische Holzrahmenkonstruktion, welche 60 mm hohe und 100 mm breite Holzständer aufweist. Das Gefach ist mit Mineralwolle ausgedämmt. Auf der Innenseite ist das Wandbauteil mit OSB-Platten ausgesteift und auf der Aussenseite mit einer Holzfaserdämmung überdämmt. Zudem ist aussen eine Winddichtungsbahn aufgebracht.

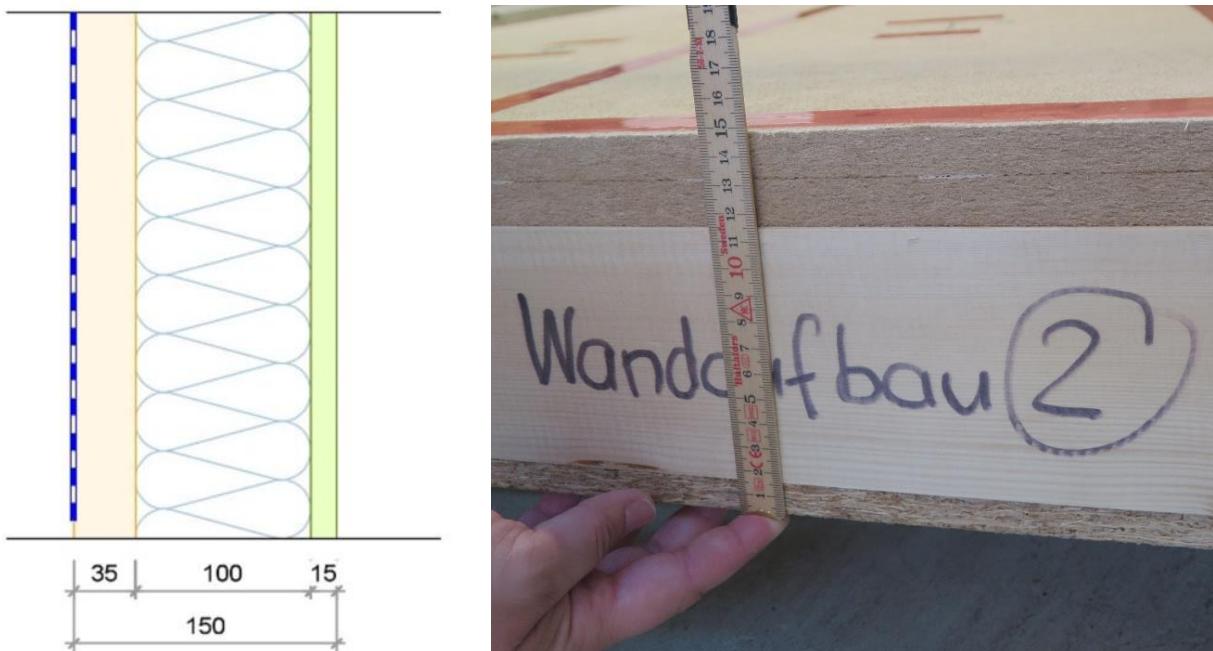


Abbildung 2 : Links: Schematische Zeichnung der untersuchten Holzrahmenwand bestehend aus Unterdachfolie, Holzfaserdämmung Gefach mit Dämmung und einer OSB-Platte. Rechts: Fotografie Prüfkörper vor der Befestigung der Unterdachfolie.

3.2.1 Materialkennwerte

Tabelle 2 enthält detaillierte Angaben zu den Eigenschaften der Materialien der Holzrahmenwand inklusive Quellenangaben.

Tabelle 3 : Eigenschaften der Materialien der Holzrahmenwand. « R », « T » und « L » stehen für radial, tangential und longitudinale Faserrichtung des Holzes.

Materialschicht	«Produktbezeichnung»/Quelle	Rohdichte ρ kg/m ³	Spezifische Kapazität c_p J/kg·K	Wärmeleitfähigkeit λ W/m·K		
OSB 3-Platte, 15 mm	z.B. «Kronoply OSB/3», Produktdatenblatt	600	1296	0.13		
Holzständer H: 100 mm, B: 60 mm	Fichtenholz [10] [12]	420	1510	R= 0.09	T= 0.07	L= 0.22
Glaswolldämmung im Gefach, d = 100 mm	«Knauf Unifit TI 132», Produktdatenblatt	32	850	0.032-		
Holzfaserdämmung, d = 35 mm	«Pavatex Isolair», Datenblatt	205	2100	0.046		
Winddichtungen	«Knauf LDS 0.04», ähnliches Material aus Datenbank in [14]	200	1404	0.2-		

3.2.2 Berechnungen wärmetechnische Eigenschaften

Bei der Holzrahmenwand handelt es sich um ein Bauteil aus thermisch homogenen und inhomogenen Schichten. Gemäss [13] wird der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand R_{tot} mit der Einheit $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ eines solchen Bauteiles als arithmetischer Mittelwert des oberen und unteren Grenzwertes des Wärmedurchgangswiderstandes mit nachfolgender Formel berechnet:

$$R_{tot} = \frac{R_{tot,upper} + R_{tot,lower}}{2} \quad \text{Formel 7}$$

Dabei ist

$R_{tot,upper}$ der obere Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes in $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$;

$R_{tot,lower}$ der untere Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes in $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Die Berechnung des oberen und unteren Grenzwertes erfolgt durch Aufteilung der Bauteilkomponente in Abschnitte und Schichten, sodass sich thermisch homogene Teilbereiche ergeben. Die einzeln berechneten R-Werte der Teilschichten werden jeweils aufsummiert.

Der untere Grenzwert kann über eine Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Schicht mit nachfolgender Formel bestimmt werden:

$$R_{tot,lower} = R_{si} + R_j + R_{se} = R_{si} + \sum \frac{d_j}{\lambda_{eq,j}} + R_{se} \quad \text{Formel 8}$$

In diesem Fall beträgt die äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{eq,j}$ in $\text{W/m} \cdot \text{K}$ der Schicht j

$$\lambda_{eq,j} = f_a * \lambda_{aj} + f_b * \lambda_{bj} + \dots + f_q * \lambda_{qj} = \frac{A_a * \lambda_{aj} + A_b * \lambda_{bj} + \dots + A_q * \lambda_{qj}}{A_a + A_b + \dots + A_q} \quad \text{Formel 9}$$

Dabei ist

f_a, f_b, \dots, f_q bzw. A_a, A_b, \dots, A_q der Flächenanteil bzw. die Teilfläche jedes Abschnittes in m^2

Nachfolgende Berechnungen beziehen sich auf die Abmessungen des kleineren der beiden Testelemente, welches für den Einbau in die Hotbox konstruiert und gebaut wurde (vgl. dazu

Anhang A.1 Produktionspläne Holzrahmenwand). Die Eigenschaften der Materialschichten sind in Tabelle 3 aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass das Fichtenholz der Holzständer mehrheitlich eine radiale Faserrichtung aufweist.

Auf die Holzrahmenwand bezogen kann Formel 8 wie folgt beschrieben werden:

$$R_{tot,lower} = R_{si} + \frac{d_{Holzfaser}}{\lambda_{Holzfaser}} + \frac{d_{Holzständer+WD}}{\lambda_{Holzständer}} + \frac{d_{OSB}}{\lambda_{OSB}} + R_{se} \quad \text{Formel 10}$$

Die Wärmeleitfähigkeit der inhomogenen Bauteilschicht «Holzständer+Wärmedämmung» $\lambda_{eq,Holzständer}$ in $\text{W/m} \cdot \text{K}$ beträgt:

$$\begin{aligned} \lambda_{eq,j} &= \frac{A_a * \lambda_{aj} + A_b * \lambda_{bj} + \dots + A_q * \lambda_{qj}}{A_a + A_b + \dots + A_q} \\ &= \frac{2 * (0.06 * 1.415) * 0.09 + 2 * (0.03 * 1.225) * 0.09 + (0.06 * 1.105) * 0.09 + 2 * (1.105 * 0.678) * 0.032}{0.1698 + 0.0735 + 0.0663 + 1.4984} = \frac{0.0758}{1.807} = 0.042 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \end{aligned} \quad \text{Formel 11}$$

Eingesetzt in Formel 10 ergibt sich damit der untere Grenzwert zu:

$$\begin{aligned} R_{tot,lower} &= R_{si} + \frac{d_{Holzfaser}}{\lambda_{Holzfaser}} + \frac{d_{Holzständer}}{\lambda_{Holzständer}} + \frac{d_{OSB}}{\lambda_{OSB}} + R_{se} \\ &= \left(0.13 + \frac{0.035}{0.046} + \frac{0.1}{0.042} + \frac{0.015}{0.13} + 0.04 \right) \frac{\text{W}}{\text{K m}} = 3.43 \frac{\text{W}}{\text{K m}} \end{aligned} \quad \text{Formel 12}$$

Der obere Grenzwert des Wärmedurchlasswiderstandes wird mit nachfolgender Formel bestimmt:

$$R_{tot,upper} = \frac{\sum A_j}{\sum \frac{A_j}{R_j}} = \frac{A_a + A_b + \dots + A_q}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_q}{R_q}} \quad \text{Formel 13}$$

Dabei gilt

$$R_j = R_{si} + \sum \frac{d_j}{\lambda_{eq,j}} + R_{se} \quad \text{Formel 14}$$

Der Prüfkörper der Holzrahmenwand besteht aus dem Teilabschnitt Wärmedämmung bzw. Holzständer mit einer Fläche von 1.498 bzw. 0.3085 m^2 . Damit ergibt sich Formel 13 zu:

$$\begin{aligned} R_{tot,upper} &= \frac{A_{Dämmung} + A_{Holzständer}}{\frac{A_{Dämmung}}{R_{Dämmung}} + \frac{A_{Holzständer}}{R_{Holzständer}}} = \\ &= \frac{(1.4984 + 0.3085) \text{ m}^2}{\left(\frac{1.4984}{0.13 + \frac{0.035}{0.046} + \frac{0.1}{0.032} + \frac{0.015}{0.13} + 0.04} + \frac{0.3085}{0.13 + \frac{0.035}{0.046} + \frac{0.1}{0.09} + \frac{0.015}{0.13} + 0.04} \right) \frac{\text{W}}{\text{K}}} = \\ &= \frac{1.4984 + 0.3085}{\frac{1.4984}{4.17} + \frac{0.3085}{2.16}} = \frac{1.807}{0.502} = 3.60 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \end{aligned} \quad \text{Formel 15}$$

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand R_{tot} in $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ergibt sich durch Einsetzen des oberen und unteren Grenzwertes des Wärmedurchlasswiderstandes in Formel 7 zu

$$R_{tot} = \frac{R_{tot,upper} + R_{tot,lower}}{2} = \frac{3.43 + 3.60}{2} = 3.51 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \quad \text{Formel 16}$$

Durch den Kehrwert des Wärmedurchlasswiderstandes wird der Wärmedurchgangskoeffizient der Holzrahmenwand (HRW) U_{HRW} in $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ berechnet und als Endergebnis auf zwei Dezimalstellen gerundet angegeben.

$$U_{HRW} = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{3.51 \frac{m^2 K}{W}} = 0.28 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Formel 17}$$

Der U-Wert des Gefachs ohne Holzunterkonstruktion berechnet sich nach Formel 2 wie nachfolgend beschrieben. Mit den in Tabelle 3 aufgeführten Eigenschaften der Materialschichten ergibt sich für das Gefach nachfolgend aufgeführter Wärmedurchgangswiderstand R_t , berechnet auf mindestens drei Dezimalstellen.

$$\begin{aligned} R_{tot} &= R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \\ &= \left(0.13 + \frac{0.035}{0.046} + \frac{0.10}{0.032} + \frac{0.015}{0.13} + 0.04 \right) \frac{m^2 K}{W} = 4.17 \frac{m^2 K}{W} \end{aligned} \quad \text{Formel 18}$$

Daraus ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient des Gefachs der Holzständerwand $U_{HRW, \text{Gefach}}$ in $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ auf zwei Dezimalstellen gerundet zu:

$$U_{HRW, \text{Gefach}} = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{4.17} = 0.24 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Formel 19}$$

Die flächenbezogene Wärmekapazität c' des Gefaches berechnet sich mit Hilfe der Wärmekapazität c_p , der Rohdichte ρ sowie der Dicke d des Bauteiles mit Formel 5 und Formel 6 und der in Tabelle 3 aufgeführten Materialeigenschaften zu dem in Tabelle 4 aufgeführten Wert.

Tabelle 4: Flächenbezogene Wärmekapazität des Gefachs der Holzrahmenwand zur Bestimmung der Schwere des Bauteils.

	d in m	c_p in J $kg K$	ρ in kg m^3	c_v in kJ $m^3 K$	c' in kJ $m^2 K$
aussen					
Holzfaserplatte	0.035	2100	110	231	8.08
Mineralwolle	0.12	1000	20	20	2.4
OSB3-Platte	0.015	2100	600	1260	18.9
innen					
Bauteil					29.4

4 Messtechnik und Messverfahren

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden sowohl In-Situ-Messungen als auch Labormessungen der Wärmedurchgangskoeffizienten der zwei Prüfwände durchgeführt. In Abschnitt 4.1 wird zunächst auf das In-Situ-Messverfahren eingegangen. Zudem werden die verwendeten In-Situ-Messgeräte beschrieben. Analog dazu wird in Abschnitt 4.2 das Labormessverfahren sowie die Laborprüfeinrichtung beschrieben.

Die Angaben in den nachfolgenden Abschnitten sind zum Teil eher allgemein gehalten. Detaillierte Beschreibungen sind den jeweiligen Messberichten zu den In-Situ-Messungen bzw. Labormessungen zu entnehmen, welche dem Forschungsbericht als Anlagen beigefügt sind. Dabei handelt es sich um folgende Dokumente:

- «Vor-Ort-Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Massivholzwand nach ISO 9869-1»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10- PB-01
- «Vor-Ort-Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Holzrahmenbauwand nach ISO 9869-1»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10- PB-02
- «Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Massivholzwand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10- PB-03
- «Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Holzrahmenwand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10- PB-04

4.1 In-situ-Messgeräte

Die In-Situ-Messungen erfolgen gemäss den Vorgaben der ISO 9869-1 [14], die in Abschnitt 4.1.1 kurz beschrieben werden. Im Forschungsprojekt kommen zwei verschiedene In-Situ-Messsysteme zum Einsatz (vgl. dazu Abschnitt 4.1.2 und 4.1.3).

4.1.1 In-Situ-Messverfahren nach ISO 9869-1

Die 2014 erstmals erschienene Norm ISO 9869-1 «Thermal insulation – Building elements In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance» beschreibt Verfahren zur Messung von Wärmeübergangswiderständen (R-Werten) sowie Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) auf Basis der Wärmefluss-Methode.

Es werden unter anderem Vorgaben betreffend die eingesetzten Messgeräte («Apparatus»), das Messverfahren («Measurements»), das Kalibrierverfahren («Calibration procedure»), die Auswertung der Messwerte («Analysis of the data») und die Messgenauigkeit («Accuracy») gemacht.

4.1.1.1 Messgeräte

Ein Messsystem für U-Wertmessungen muss mindestens aus einer Wärmeflussplatte und zwei Sensoren zur Messung der Innen- sowie Aussenlufttemperatur bestehen.

Die Wärmeflussplatte soll folgende Eigenschaften aufweisen:

- Flacher Aufbau
- Geringer Wärmewiderstand
- Hohe Sensitivität

Die Temperatursensoren (Thermoelemente oder Widerstandsthermometer) sollten folgende Eigenschaften aufweisen:

- Flacher Aufbau
- Kleine Abmessung
- Geschützt gegen Solar- und Wärmestrahlung
- Belüftet

4.1.1.2 Kalibrierverfahren

Betreffend die Kalibrierung der Wärmeflussplatten weisst die Norm ISO 9869-1 darauf hin, dass die Kalibrierfaktoren sich mit der Temperatur und der Wärmeleitfähigkeit des Materials, auf dem die Wärmeflussplatte befestigt ist und dem Wärmestrom selbst ändern können.

Daher soll die Kalibrierung eines neuen Typs einer Wärmeflussplatte bei verschiedenen Temperaturen und Wärmestromen sowie auf verschiedenen Materialien erfolgen. Vorgeschrieben sind mindestens drei verschiedene Wärmeflussraten bei zwei verschiedenen Temperaturen und

Untergrundmaterialien. Ein bereits bekannter Typ einer Wärmeflussplatte kann bei einer geringeren Anzahl von Randbedingungen kalibriert werden.

Geeignet für die Kalibrierung sind Geräte mit geschützter Heizplatte sowie Geräte mit Wärmestrommesser. Zudem kann die Kalibrierung auch mit der Hotbox-Methode erfolgen.

Im Rahmen der Kalibrierung soll der Kalibrierfaktor mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ bestimmt werden. Wärmeströme, Wärmeleitfähigkeiten und Temperaturen sollen den Bereich abdecken, der in der Praxis normalerweise vorliegt.

Die Temperaturfühler sollen eine Messgenauigkeit besser als 0.5 K aufweisen. Sofern die Temperaturdifferenz bei der Messauswertung durch Subtraktion erfolgt, so darf das Temperaturfühlerpaar untereinander eine maximale Abweichung von 0.1 K haben.

Die Temperaturfühler sollen für mehrere Temperaturen in einem üblichen Bereich (normalerweise -10°C bis 50°C) kalibriert werden.

Für die Überprüfung der Sensoren zur Messung der äusseren Temperaturbedingungen werden spezielle Verfahren vorgeschlagen. So soll der Einfluss von elektromagnetischer Strahlung bei angemessenen Höhen untersucht und beseitigt werden, wenn die Abweichungen grösser als die zuvor genannte Messabweichung sind.

4.1.1.3 Messverfahren

Bezüglich der Installation der Messgeräte und der Messstelle sind insbesondere folgende Punkte wichtig:

- Befestigung der Sensoren an repräsentativen Stellen, ausserhalb des Einflussbereiches von Wärmebrücken.
- Schutz der äusseren Fassade vor Regen, Schnee und direkter Sonneneinstrahlung, eventuell mit einer künstlichen Abschirmung.

Bei der Installation der Wärmeflussplatten sind folgende Punkte zu beachten:

- Abmessung der Wärmeflussplatte in Abhängigkeit der Struktur des getesteten Bauteiles; für homogene Bauteilaufbauten kann jede angemessene Grösse verwendet werden.
- Befestigung der Wärmeflussplatte an der Oberfläche des Bauteiles auf der Seite der stabileren Temperaturbedingungen.
- Direkter, thermischer Kontakt der ganzen Fläche der Wärmeflussplatte mit der Oberfläche des Bauteiles.
- Verwendung von Wärmeleitpaste falls notwendig.

Bei der Installation der Temperatursensoren ist auf folgendes zu achten:

- Einsatz von Oberflächentemperatursensoren bei der Messung des Wärmewiderstandes (oder des Wärmedurchlasskoeffizienten); Montieren der Sensoren unter oder in der Nähe der Wärmeflussplatte.
- Anbringen des externen Oberflächentemperatursensors auf der Aussenfassade gegenüber der Wärmeflussplatte.
- Sicherstellen eines guten thermischen Kontakts der Oberflächensensoren und 0.1 m des Sensorkabels.
- Einsatz von Lufttemperatursensoren bei der Messung des U-Wertes (oder Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand); Installation auf beiden Seiten des zu messenden Bauteiles.
- Deutliche Reduzierung der Messzeit, sofern die Temperaturen auf beiden Seiten des Bauteiles und insbesondere auf der Seite der Wärmeflussplatte vor und während der Messung konstant sind.

Die Datenaufzeichnung betreffend gelten folgende Vorgaben:

- Kontinuierliche Datenaufzeichnung in festen Intervallen über einen Zeitraum von ganzen Tagen.
- Länge der Messintervalle und minimale Messdauer sind abhängig von der Art des Bauteiles (Art der Bauweise, Lage des Dämmstoffes), Innen- und Aussentemperatur (Durchschnitt, Änderungen vor und während der Messung) sowie der Methode der Datenauswertung (Mittelwertmethode, dynamische Methode).
- Messintervall für Mittelwertmethode typischerweise 0.5 – 1 h; kürzere Messzeit bei dynamischer Methode.
- Minimale Messdauer ist 72 h (3 Tage) bei stabilen Temperaturrandbedingungen, andernfalls beträgt die Messdauer mehr als 7 Tage.

4.1.1.4 Datenauswertung

Gemäss der Norm ISO 9869-1 sind zur Datenauswertung die sogenannte Mittelwertmethode sowie die dynamische Methode zulässig. Erstere ist einfacher durchzuführen, wohingegen die zweitgenannte Methode komplexer ist, dafür eine höhere Qualität der Messergebnisse ergibt. Bei Anwendung der dynamischen Methode kann gegebenenfalls die Messdauer von mittleren bis schweren Bauteilen bei instabilen Temperaturrandbedingungen reduziert werden.

In vorliegendem Projekt wird die Mittelwertmethode angewendet, weshalb nur diese detaillierter beschrieben wird.

Bei der Mittelwertmethode wird davon ausgegangen, dass der thermische Wärmedurchlasskoeffizient bzw. die Transmission durch Dividieren der mittleren Wärmeflussrate durch die mittlere Temperaturdifferenz ermittelt werden kann.

Wenn der Index j die Einzelmessungen aufsummiert, kann der Schätzwert des Wärmedurchgangskoeffizienten U in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ mit folgender Formel bestimmt werden:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad \text{Formel 20}$$

Dabei ist

q die Wärmestromdichte zum Zeitpunkt j in W/m^2 .

T_{ij} die innere Umgebungstemperatur zum Zeitpunkt j in K;

T_{ej} die äussere Umgebungstemperatur zum Zeitpunkt j in K.

Werden die Grössen für jeden Messwert bestimmt, so ist jeweils ein Konvergieren zu einem asymptotischen Wert festzustellen. Der asymptotische Wert kommt dem realen Wert nahe, sofern folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Gleiche Wärme- und Feuchteverteilung im Bauteil zu Beginn und am Ende der Messung.
- Kein Einfluss von direkter Solarstrahlung auf die Wärmeflussplatte sowie auf die Temperatursensoren; gleiche Emissivität im Bereich der Oberflächentemperatursensoren wie an der ungestörten Oberfläche.
- Konstante thermische Leitfähigkeit des Bauteiles über die Messzeit.

Werden die Bedingungen nicht erfüllt, so kann es zu falschen Messergebnissen kommen.

Für Leichtbauteile mit einer spezifischen Wärmekapazität unterhalb von $20 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ empfiehlt die Norm, dass nur die Messwerte ausgewertet werden, welche eine Stunde nach Sonnenuntergang bis zum Sonnenaufgang aufgezeichnet werden. So kann der Einfluss der solaren Strahlung ausgeschlossen werden. Die Messung darf gestoppt werden, wenn die Messergebnisse von drei aufeinanderfolgenden Nächten weniger als $\pm 5\%$ voneinander abweichen. Andernfalls ist die Messung fortzuführen.

Für schwere Bauteile mit einer spezifischen Wärmekapazität oberhalb von $20 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ist die Datenauswertung über eine Messzeit eines ganzzahligen Vielfachen von 24 h durchzuführen. Die Messung darf nur beendet werden, sofern folgende Kriterien erfüllt sind:

- Kriterium 1: Die Messzeit muss mindestens 72 Stunden oder drei Tage dauern.
- Kriterium 2: Die Messzeit soll ein ganzzahliges Vielfaches von 24 Stunden sein
- Kriterium 3: Der Unterschied zwischen dem Messwert 24 h vor dem Ende der Messung und dem Wert am Ende der Messperiode darf 5 % nicht übersteigen
- Kriterium 4: Der Unterschied zwischen dem Messwert am Tag nach zwei Dritteln der Messperiode, D_T , und dem Wert am letzten Tag der Messperiode darf nicht mehr als 5 % betragen

$$\text{Messwert} \left(\text{int} \left(\frac{2}{3} \cdot D_T \right) \right) - \text{Messwert}(D_T) \leq 5\% \quad \text{Formel 21}$$

- Kriterium 5: Falls sich die in der Wand gespeicherte Wärme während der Messperiode um mehr als 5 % des Wärmestroms, welcher durch die Wand fliesst, ändert, sind spezielle Analysemethoden anzuwenden.

Wenn im Laufe der Messzeit die Änderung der gespeicherten Wärme im Bauteil mehr als 5 % der durch das Bauteil fliesenden Wärme beträgt, so soll die dynamische Methode zur Auswertung der Messergebnisse verwendet werden. Eine andere Möglichkeit ist, die Berechnung von sogenannten thermischen Massefaktoren, mit welchen die Messwerte korrigiert werden können. Dieses Vorgehen ist vor allem für Bauteile mit hohen R-Werten und einer grossen thermischen Masse relevant, welche die oben aufgeführten Bedingungen nicht erfüllen.

4.1.1.5 Messgenauigkeit

In der Norm ISO 9869-1 werden folgende Einschätzungen in Bezug auf die Messunsicherheiten gegeben:

- Messgenauigkeit der Sensoren, sofern diese kalibriert sind, von 5 %
- Abweichungen durch unvollständigen Kontakt der Sensoren mit den Bauteiloberflächen bei sorgfältiger Installation von 5 %
- Abweichungen durch Wärmebrückeneffekt verursacht durch die Wärmeflussplatte von 2-3 %
- Fehler durch instabile Randbedingungen betreffend die Umgebungstemperaturen und den Wärmefluss, sofern die zuvor genannten Bedingungen während der Messung eingehalten werden, von 10 %
- Temperaturänderungen im Raum sowie Abweichungen zwischen Luft- und Strahlungstemperatur bei U-Wert Messungen von 5 %

Gemäss ISO 9869-1 kann angenommen werden, dass die Gesamtunsicherheit der Messung zwischen der Quadratsumme und der arithmetischen Summe liegt, z.B. zwischen

$$\left(\sqrt{5^2 + 5^2 + 3^2 + 10^2 + 5^2} \right) \% = 14 \% \quad \text{Formel 22}$$

und

$$(5 + 5 + 3 + 10 + 5) \% = 28 \% \quad \text{Formel 23}$$

Werden die zuvor genannten Bedingungen nicht eingehalten, so ist die Messung dennoch gültig, sofern die höhere Messunsicherheit dargestellt wird.

Die Wahrscheinlichkeit für hohe Unsicherheiten steigt unter folgenden Umständen:

- Grosse Temperaturänderungen auf einer Seite des Bauteils (v.a. innen) im Vergleich zu den Änderungen der Temperaturdifferenz zwischen beiden Seiten
- Schwere Bauweise bei geringer Messdauer
- Einfluss von Solarstrahlung und anderer thermischer Einflüsse
- Fehlende Angabe der Messgenauigkeit der Wärmeflussplatte, die bis zu 30 % sein kann
- Annahmen betreffend die zugrunde gelegten Umgebungstemperaturen bei U-Wert Messungen

4.1.2 gSKIN® Messgerät

Die gSKIN® Messgeräte der Firma greenTEG AG bestehen jeweils aus einer abnehmbaren Wärmeflussplatte, zwei Temperatursensoren verbunden mit einem Datenlogger sowie einem USB-Auslesekabel (vgl. Abbildung 3).

Betreffend die Genauigkeit der Sensoren gibt der Hersteller folgende Werte an:

- Temperatursensoren: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ in einem Messbereich von $(-10 \dots +65^\circ\text{C})$ und $\pm 2.0^\circ\text{C}$ in einem Messbereich von $(-55 \dots +125^\circ\text{C})$
- Wärmeflussplatten: relativer Fehler $\pm 3\%$; Auflösung $<0.11 \text{ W/m}^2$; Messbereich $\pm 200 \text{ W/m}^2$

Mit einer Abmessung von 3 auf 3 cm weisen die Wärmeflussplatten eine Fläche von 9 cm^2 auf.

Im Anhang B.1 ist ein Datenblatt mit weiteren technischen Angaben aufgeführt.

Das Messsystem verfügt über eine Software, mit welcher eine automatische Auswertung der Messung nach den Bedingungen der ISO 9869-1 erfolgt. Dabei werden die meisten in Abschnitt 4.1.1.4 aufgeführten Bedingungen berücksichtigt. Nicht berücksichtigt werden kann die Vorgabe, dass die Änderung der in der Wand gespeicherten Wärme kleiner 5 % der Wärme, die durch die Wand fliesst, sein muss.



Abbildung 3 : Aufnahme des Messsystems «gSKIN®» der Firma greenTEG AG, bestehend aus einer abnehmbaren Wärmeflussplatte (grau), zwei Temperatursensoren (weiss) verbunden mit einem Datenlogger (blau) sowie einem USB-Auslesekabel (schwarz).

Für die Messungen an den zwei Prüfwänden In-Situ und auch im Labor steht jeweils ein eigenes gSKIN®-Messsystem zur Verfügung. An den Massivholzwänden wird mit Messsystem «gSKIN® A» und an den Holzrahmenwänden mit Messsystem «gSKIN® B» gemessen.

4.1.3 Almemo® Messgerät

Die Almemo® Messgeräte bestehen grösstenteils aus Produkten der Firma Ahlborn. Ein Messsystem umfasst jeweils eine digitale Wärmeflussplatte (Typ FQA018C), vier Temperaturfühler aus Thermodraht (Typ T, WT-328) und einen Datenlogger (Typ 2890-9) für die Datenaufzeichnung (vgl. Abbildung 4). Die Temperaturfühler werden in den Laboren der Berner Fachhochschule verschweisst und mit Datensteckern der Firma Ahlborn verbunden. Mit den Temperaturfühlern werden Luft- und Oberflächentemperaturen innen und aussen aufgezeichnet. Betreffend die Genauigkeit der Sensoren gelten folgende Werte:

- Temperatursensoren:

$$d\theta = \begin{cases} \pm 1 K \text{ oder} \\ 0,0075 \cdot |\theta| \end{cases} \quad \text{Formel 24}$$

- Wärmeflussplatten: $\pm 5\%$ des Kalibrierwertes bei Nenntemperatur (von 23°C).

Mit einer Abmessung von 12 auf 12 cm weisen die Wärmeflussplatten eine Fläche von 144 cm^2 auf. Die Wärmeflussplatten sind in Plattenmitte jeweils mit einem Miniaturtemperatursensor ausgestattet. Mit diesen erfolgt eine automatische Korrektur der Temperaturkoeffizienten der Wärmeflussplatten, um die Nichtlinearität der Thermoelemente in der Wärmeflussplatte auszugleichen.

Im Anhang B.2 sind Datenblätter mit weiteren technischen Angaben aufgeführt.



Abbildung 4 : Beispielhafte Aufnahme des Messsystems «Almemo®» der Firma Ahlborn GmbH, bestehend aus einer Wärmedurchgangsplatte (grau), vier Temperatursensoren (braun), einem Datenlogger (grau) mit Netzgerät (schwarz) sowie einem USB-Auslesekabel (schwarz).

Auch von der Almemo®-Messtechnik stehen zwei Gerätesätze für die In-Situ- und Labormessungen zur Verfügung. An den Massivholzwänden wird mit Messsystem «Almemo® A» und an den Holzrahmenwänden mit Messsystem «Almemo® B» gemessen.

4.2 Labormessungen

Die Labormessungen erfolgen nach den Vorgaben der EN ISO 8890 «Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand; Verfahren mit dem kalibrierten und dem geregelten Heizkasten» an den kleineren Testelementen der Wandaufbauten, welche für den Einbau in die Hotbox konstruiert und gebaut wurden (vgl. dazu Anhang A.1 Produktionspläne der Testelemente).

Nachfolgend ist eine Beschreibung der zur Verfügung stehenden Anlage sowie des Messprinzips aufgeführt.

Weitere Informationen sind den jeweiligen Messberichten der Labormessungen zu entnehmen, welche dem Forschungsbericht als Anlage beigefügt sind. Dabei handelt es sich um folgende Dokumente:

Dabei handelt es sich um folgende Dokumente:

- «Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Massivholzwand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10- PB-03
- «Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Holzrahmenwand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10- PB-04

4.2.1 Beschreibung der Anlage

In den Laboren der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau steht ein geregelter Heizkasten (Typ TDW 4242) der Firma Taurus Instruments AG zur Verfügung (vgl. Abbildung 5).

Die Anlage besteht aus zwei Klimakammern, die als Warm- und als Kaltseite bezeichnet werden. Die Abmessungen (Breite, Höhe und Tiefe) der Warmseite sind 3.6 m auf 3.6 m auf 2.1 m. Innerhalb der Kammer der Warmseite befindet sich die sogenannte Hotbox. Die Hotbox, auch Messkasten genannt, hat die Dimensionen 2.74 m auf 2.74 m auf 1.05 m. Die Dimensionen der Kaltseite betragen 3.6 m auf 3.6 m auf 1.5 m.

Zwischen beiden Klimakammern ist der Prüfrahmen mit der Prüfmaske installiert, in den der Probekörper eingebaut wird. Dieser Prüfrahmen ist 3.6 m auf 3.5 m auf 0.196 m gross. Die Öffnung in der Prüfmaske misst 1.23 m auf 1.48 m auf 0.196 m. Der Prüfrahmen weist einen hohen Wärmedurchlasswiderstand auf, hält den Probekörper in der richtigen Stellung und trennt die Warmseite von der Kaltseite. In Anhang B.3 sind detaillierte Prinzipskizzen des Heizkastens und Prüfrahmens aufgeführt.



Abbildung 5 : Ansicht des geregelten Heizkastens im Labor der BFH AHB. Die linke Kammer stellt die Kaltseite dar, die rechte Kammer die Warmseite. Zwischen den zwei Kammern steht ein auf Rollen verfahrbarer Prüfrahmen.

4.2.2 Prinzip der Messung

Während einer Messung werden auf der Innen- (Warmseite) und auf der Aussenseite (Kaltseite) des geregelten Heizkastens, sowie in den Querschnitten der beteiligten Bauteile stationäre Temperaturbedingungen hergestellt. Warm- und Kaltseite sind durch die Prüfwand und den Prüfkörper getrennt. Durch den Temperaturgradienten zwischen Warm- und Kaltseite entsteht ein Wärmestrom von warm nach kalt.

Abbildung 6 zeigt das Messprinzip des geregelten Heizkastens.

Der Wärmestrom vom Messkasten durch den Prüfkörper auf die Kaltseite (Φ_{sp}) entspricht der Gesamteingangsleistung in den Messkasten (Heizung, Lüftung und Strömungsmessung, Φ_{in}) minus der Verluste durch die Messkastenwand (Φ_3), minus der Verluste über die Prüfmaske (Φ_{sur}), minus der Flankenverluste (Φ_2), minus der Verluste über die Randzone zwischen Prüfkörper und Prüfmaske (Φ_{edge}):

$$\Phi_{sp} = \Phi_{in} - \Phi_3 - \Phi_{sur} - \Phi_2 - \Phi_{edge} \quad \text{Formel 25}$$

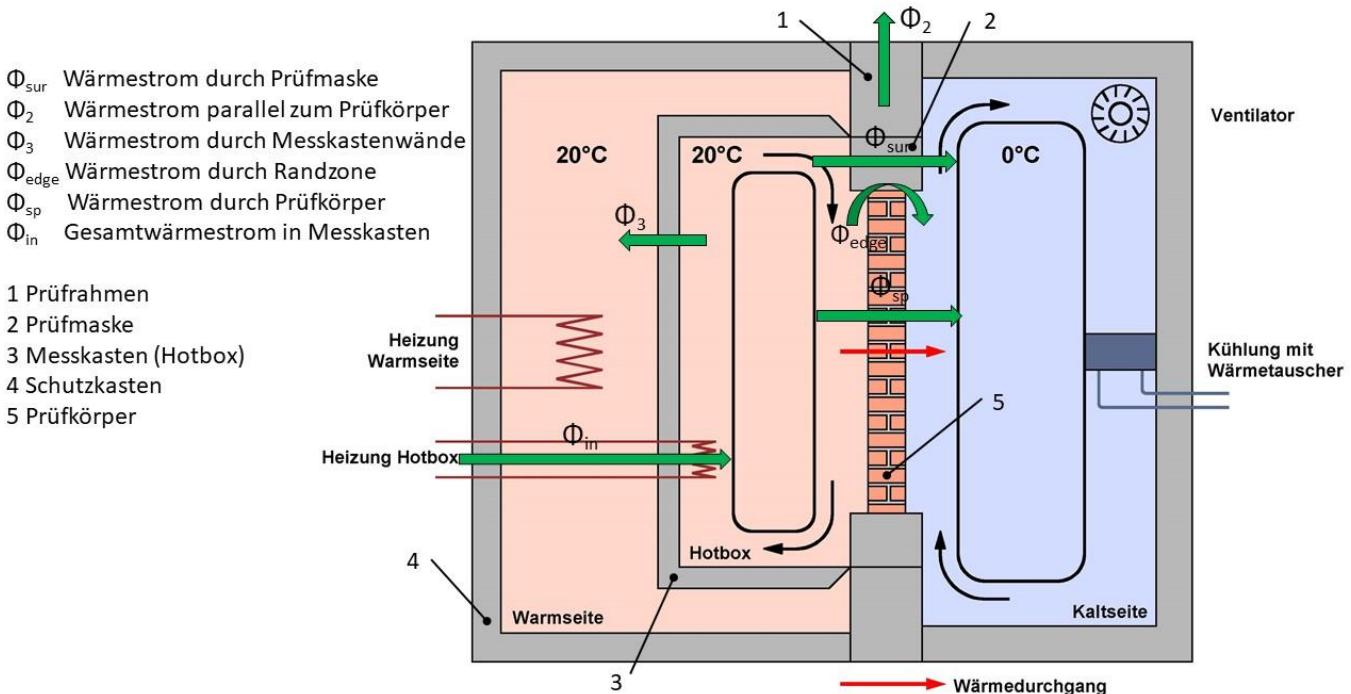


Abbildung 6 : Schema Messprinzip geregelter Heizkasten zur Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand (Quelle: Taurus Instruments AG mit eigenen Ergänzungen).

Die Messung der Gesamteingangsleistung Φ_{in} geschieht direkt am Messkasten. Φ_{sur} und Φ_2 werden aus bei Kalibriermessungen ermittelten Daten errechnet und bilden einen Gesamtwert. Φ_{edge} wird mit Hilfe des längenbezogenen Wärmebrückenkoeffizienten der Laibung ψ_{edge} , der Umfangslänge der Prüffönnung und der Lufttemperaturdifferenz berechnet. ψ_{edge} kann z.B. mit einem Wärmebrückenprogramm berechnet werden. Die Verluste durch die Messkastenwand (Φ_3) gehen beim geregelten Heizkasten der BFH-AHB gegen Null und werden daher vernachlässigt.

Zusammen mit der bekannten Fläche des Prüfkörpers (A_{sp}) und den ermittelten Umgebungstemperaturen auf der Kalt- (Θ_{ne}) bzw. der Warmseite (Θ_{ni}) kann der gemessene Wärmedurchgangskoeffizient U_m des Prüfkörpers ermittelt werden.

Mit der bekannten Fläche (A_{sp}) des Prüfkörpers kann die durchschnittliche Wärmestromdichte ϕ_{sp} durch den Prüfkörper errechnet werden. ϕ_{sp} wird auch benötigt, um den Gesamtwärmeübergangswiderstand $R_{s,t}$ zu ermitteln.

$$U_m = \frac{\Phi_{sp}}{A_{sp} \cdot \Delta \theta_n} \text{ bzw. } q_{sp} = \frac{\Phi_{sp}}{A_{sp}} \quad \text{Formel 26}$$

Der gemessene Wärmedurchgangskoeffizient des Probekörpers U_m muss mit dem gemessenen Gesamtwärmeübergangswiderstand $R_{s,t}$ berichtet werden, um mit Hilfe des Normwärmeübergangswiderstandes $R_{(s,t)st}$ den Norm-Wärmedurchgangskoeffizienten U_{st} in $W/(m^2 \cdot K)$ nach Formel 27 zu bestimmen. Der Normwärmeübergangswiderstand $R_{(s,t)st}$ beträgt $0.17 (m^2 \cdot K)/W$.

$$U_{st} = [U_m^{-1} - R_{s,t} + R_{(s,t)st}]^{-1} \quad \text{Formel 27}$$

Der Norm-Gesamtwärmeübergangswiderstand $R_{(s,t)st}$ beträgt $0.17 (m^2 \cdot K)/W$.

4.2.3 Stabilitätskriterien für eine gültige Messung

Grundsätzlich kann die Messung beendet werden, wenn das Resultat keine signifikanten Veränderungen und keinen Trend in eine Richtung aufweist.

Die SN EN ISO 8990 [6] bietet den Ansatz, dass die Werte des Wärmedurchlasswiderstands R , des Wärmedurchgangskoeffizienten U , der Wärmezufuhr zum Messkasten Φ_{in} , und der Temperatur T (Mitteltemperatur in K) über zwei aufeinanderfolgenden Messzeiten von 3 h innerhalb einer Bandbreite von 1 % stabil sein müssen. Gleichzeitig sollen diese Werte keinen Trend in eine Richtung haben.

Um die Stabilität während der Messung zu überprüfen, werden Stundenwerte einer Zwischenergebnisliste der Hotbox-Software überprüft. Es wird empfohlen, eine dreistündige Auswertung anzustreben. Es darf von der dreistündigen Messzeit abweichen und diese entsprechend verlängert werden, falls einzelne Stabilitätskriterien nicht erreicht werden. Dies kann vor allem an der thermischen Masse des Prüfkörpers liegen. Schwankungen in der Hallentemperatur, die auf die Messung durchschlagen, müssen vermieden werden.

5 Ablauf und Ergebnisse In-Situ-Messungen

In diesem Kapitel werden der Prüfaufbau, die Messperiode sowie die Ergebnisse der In-Situ-Messungen an den zwei Prüfwänden beschrieben.

Die Angaben in den nachfolgenden Abschnitten sind allgemein gehalten. Die Messergebnisse werden zusammenfassend dargestellt. Detaillierte Beschreibungen sowie Herleitungen sind in den jeweiligen Messberichten zu den In-Situ-Messungen aufgeführt, welche neben vorliegendem Forschungsbericht als Anlagen beigefügt sind. Dabei handelt es sich um folgende Dokumente:

Dabei handelt es sich um folgende Dokumente:

- «Vor-Ort-Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Massivholzwand nach ISO 9869-1»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10-PB-01
- «Vor-Ort-Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Holzrahmenbauwand nach ISO 9869-1»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10-PB-02

5.1 Prüfaufbau

Für die In-Situ-Messungen werden die in Kapitel 3 beschriebenen Prüfwände an der Nordfassade einer Montagehalle der Firma Nägeli AG in der Zwislenstr. 27, CH-9056 Gais eingebaut. Durch Orientierung der Wand soll der Einfluss solarer Strahlung auf die Messung minimiert werden. Die Prüfkörper werden in Fensteröffnungen der Fassade eingebaut. Sie weisen jeweils Abmessungen von 1.06 m auf 2.38 m auf (vgl. dazu Produktionspläne, Anhang A).

Nachfolgende Abbildung zeigt eine Luftaufnahme des Produktionsgeländes mit Lage und Ansicht der Testfassade.



Abbildung 7: Links: Luftaufnahme des Produktionsgeländes der Firma Nägeli (Quelle: Google Earth). Die Fassade, in der die Prüfelemente eingebaut werden, ist mit einem roten Pfeil gekennzeichnet. Rechts: Ansicht der Testfassade mit Prüfelementen, eingebaut in Fensteröffnungen.

Die Sensoren der In-Situ-Messgeräte werden mittels Klebeband, ohne Einsatz von Wärmeleitpaste auf den Testwänden angebracht. Bei der Holzständerwand wird darauf geachtet, dass die Sensoren sich in der Mitte des Gefaches möglichst ausserhalb des thermischen Einflussbereiches der Holzunterkonstruktion befinden (s.a. Produktionspläne, Anhang A).

Die Aussenlufttemperatursensoren werden durch Wetterschutzgehäuse vor Strahlungseinflüssen geschützt.

In den nachfolgenden Abbildungen sind Innen- und Aussenansichten des Prüfaufbaus (Abbildung 8), Lage der Wärmeflussplatten und Oberflächentemperatursensoren innen (Abbildung 9), Befestigung der Lufttemperatursensoren innen (Abbildung 10), Befestigung der Oberflächen- und Lufttemperatursensoren aussen (Abbildung 11) sowie Ansichten der Datenlogger (Abbildung 12) zu sehen.



Abbildung 8 : Linkes Bild: Ansicht der Prüfkörper von innen. Auf der linken Seite die Holzständer- und auf der rechten Seite die Massivholzwand. Rechtes Bild: Ansicht der Prüfkörper von aussen. Auf der linken Seite die Massivholz- und auf der rechten Seite die Holzständerwand.



Abbildung 9 : Lage der Wärmeflussplatten sowie Oberflächentemperatursensoren innen an Holzständer- (linkes Bild) sowie Massivholzwand (rechtes Bild).

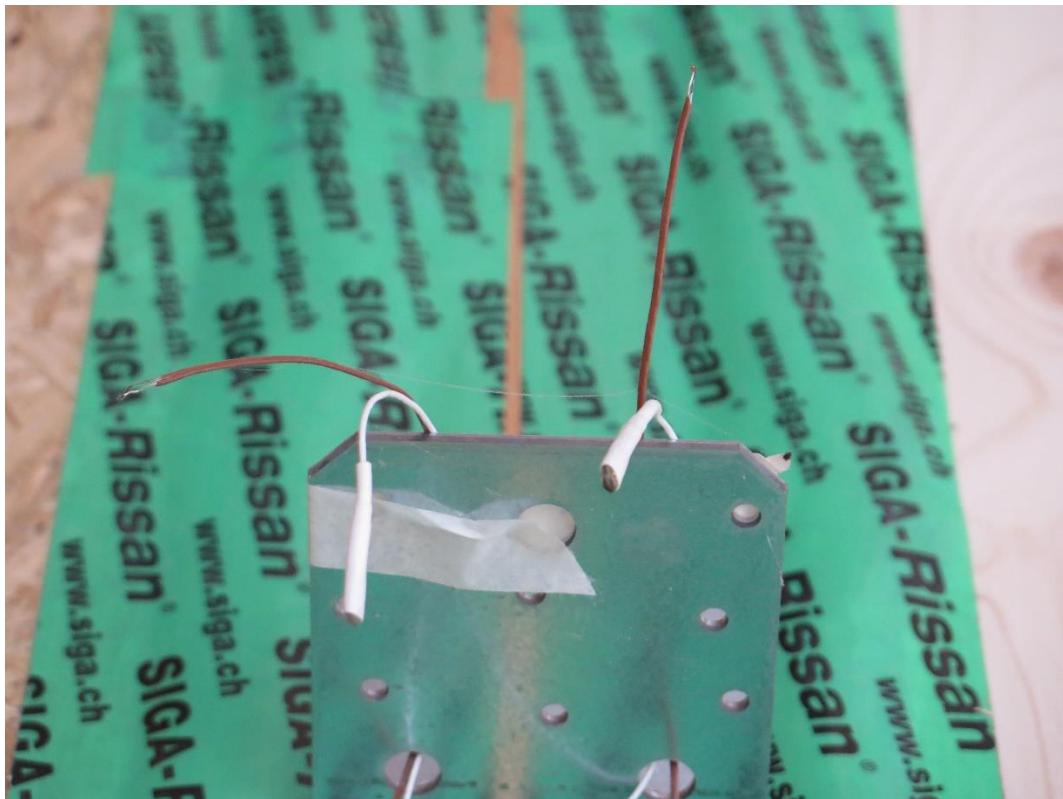


Abbildung 10 : Befestigung der inneren Lufttemperatursensoren an einem Metallwinkel im Abstand von ca. 12 cm vor den Prüfwänden.



Abbildung 11 : Linkes Bild: Befestigung der Oberflächentemperatursensoren auf der Aussenseite der Prüfwände. Rechtes Bild: Installation der Aussenlufttemperatursensoren in einem Wetterschutzgehäuse.



Abbildung 12: Ansicht der Almemo- (links) sowie gSKIN-Datenlogger (rechts).

5.2 Messperiode

Die Messgeräte werden am 09.02.2018 in der Produktionshalle installiert. Die Messung endet am 20.04.2018.

5.3 Eigenschaften der Prüfwände

Die Berechnungen der spezifischen Wärmekapazität der Prüfkörper der Massivholzwand sowie des Gefaches der Holzrahmenwand in den Abschnitten 3.1.2 und 3.2.2 zeigt, dass beide Wandaufbauten in die Kategorie «schwere Bauteile» fallen.

Damit werden die am Tag aufgezeichneten Messwerte bei der Messauswertung nach ISO 9869-1 mitberücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.1.1.4).

5.4 Prüfergebnisse

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der mit den In-Situ-Messgeräten ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten der Massivholzwand (vgl. Abschnitt 5.4.1) sowie der Holzrahmenwand (vgl. Abschnitt 5.4.2) gegeben. Für die Almemo-Messgerätesätze werden zudem die gemessenen Wärmedurchlasswiderstände, die gemessenen inneren Wärmeübergangswiderstände und die daraus abgeleiteten äusseren Wärmeübergangswiderstände dargestellt.

5.4.1 Massivholzwand

In Zeile 3 der Spalten 3 und 4 der nachfolgenden Tabelle sind zunächst die nach Formel 20 durch Mittelwertbildung nach ISO 9869-1 ermittelten U-Werte des Almemo «A»- sowie gSkin «A» Messgerätesatzes aufgeführt.

In den folgenden Zeilen der Spalten 3 und 4 werden nacheinander die in Abschnitt 4.1.1.4 aufgeführten Kriterien 1-4 der ISO 9869-1 angewendet. In der letzten Spalte sind jeweils die Differenzen der U-Werte der zwei getesteten Messgeräte aufgeführt.

Die Fehler sind als jeweils 95 % Vertrauensintervall, d. h. mit 2σ der Verteilung der Mittelwerte, angegeben.

Tabelle 5 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 unter Berücksichtigung verschiedener Auswahlkriterien. Die Fehler sind als 95 %-Vertrauensintervall angegeben.

Kri- terium	Beschreibung	Mittelwerte der U-Werte in W/(m ² K) inkl. 95 %-Vertrauensintervall ($\mu \pm 2\sigma$)	Differenz der U-Werte in W/(m ² K) inkl. 95 %- Vertrauensintervall ($\mu \pm 2\sigma$)
		Almemo «A»	gSkin «A»
	Mittelwert nach ISO 9869-1	0.430 ± 0.0053	0.386 ± 0.0082
1	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d	0.430 ± 0.0056	0.386 ± 0.0080
1-2	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d	0.431 ± 0.0060	0.387 ± 0.0088
1-3	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d & $\frac{\Delta U_{ISO}(t, t-24h)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$	0.431 ± 0.0062	0.387 ± 0.0088
1-4	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d & $\frac{\Delta U_{ISO}(t, t-24h)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$ & & $\frac{\Delta U_{ISO}(t, \frac{2}{3}t)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$	0.431 ± 0.0060	0.387 ± 0.0092

Das folgende Histogramm zeigt die Verteilung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 ohne und mit Beachtung der Kriterien 1 bis 4.

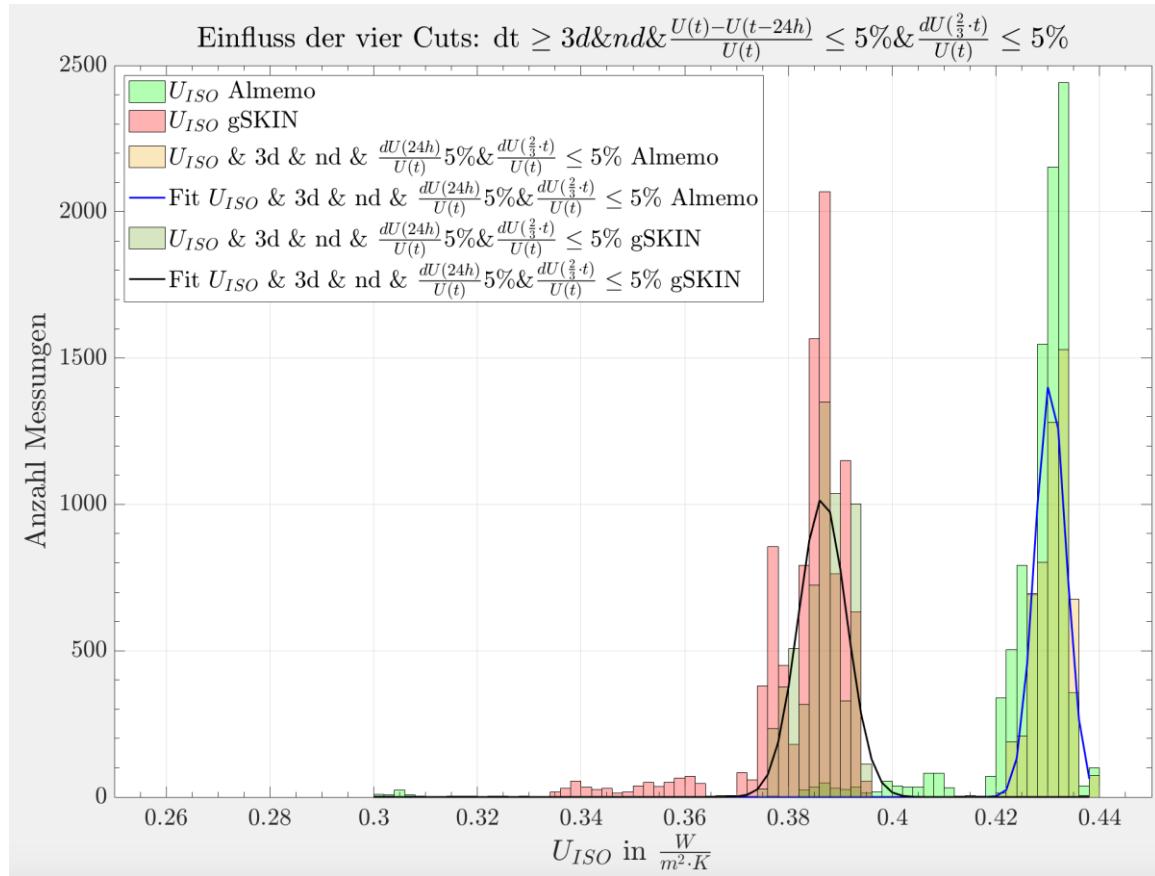


Abbildung 13: Vergleich der Verteilung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der beiden Messgeräte ohne und mit Berücksichtigung der Kriterien 1 bis 4. Bei der Berechnung der zweiten Histogramme wurden folgende Kriterien eingehalten: Messzeit von mehr als 72 h, Messzeit gleich ganzzahliges Vielfaches eines Tages, relative Änderung des Mittelwertes des Wärmedurchgangskoeffizienten $\leq 5\%$ für 24 h vor Ende der Messung sowie für $2/3$ der Messzeit. Dargestellt sind die In-Situ-Messwerte der Massivholzwand.

Mit dem Almemo-Messgerätesatz werden zusätzlich zu den Lufttemperaturen auch die inneren und äusseren Oberflächentemperaturen aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser können die Wärmedurchlasswiderstände, die inneren Wärmeübergangswiderstände und die daraus abgeleiteten äusseren Wärmeübergangswiderstände dargestellt werden (vgl. Tabelle 6). Dabei wird der Mittelwert des Wärmedurchlasswiderstands aus dem Mittelwert der Temperaturdifferenz der Oberflächentemperaturen und dem Mittelwert des Wärmestroms berechnet.

Der äussere Wärmeübergangswiderstand wird über die Mittelwerte der Verteilung des Wärmedurchgangskoeffizienten, des Wärmedurchlasswiderstands und des inneren Wärmeübergangswiderstands nach folgender Formel abgeschätzt:

$$R_{se}(t_i) = \frac{1}{U(t_i)} - R_{si}(t_i) - R(t_i) \text{ in } \frac{W}{m^2 K} \quad \text{Formel 28}$$

Diese Gleichung gilt allerdings nur dann, wenn die Wärmestromdichte im ganzen Bauteil konstant ist.

Tabelle 6 : Zusammenstellung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten, der Wärmedurchlasswiderstände, der inneren Wärmeübergangswiderstände und der daraus abgeleiteten äusseren Wärmeübergangswiderstände nach ISO 9869-1 unter Berücksichtigung verschiedener Auswahlkriterien. Die Fehler sind als 95 %-Vertrauensintervall angegeben. Die Messwerte stammen vom Almemo-Messgerätesatz, angebracht an der Massivholzwand.

Kri- terium	Beschreibung	Wärme- durchgangs- koeffizient	Wärme- durchlass- widerstand	innerer Wärme- übergangs- widerstand	äusserer Wärme- übergangs- widerstand
		U_{Almemo}	R_{Almemo}	$R_{\text{si, Almemo}}$	$R_{\text{se, Almemo}}$
		in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$			
	Mittelwert nach ISO 9869-1	0.430 ± 0.0053	1.97 ± 0.020	0.153 ± 0.0030	0.203 ± 0.035
1	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3 d	0.430 ± 0.0056	1.97 ± 0.020	0.153 ± 0.0028	0.203 ± 0.036
1-2	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d	0.431 ± 0.0060	1.98 ± 0.017	0.153 ± 0.0042	0.187 ± 0.037
1-3	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d & $\frac{\Delta U_{ISO}(t, t-24h)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$	0.431 ± 0.0062	1.98 ± 0.017	0.153 ± 0.0044	0.187 ± 0.038
1-4	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d & $\frac{\Delta U_{ISO}(t, t-24h)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$ & $\frac{\Delta U_{ISO}\left(t, \frac{2}{3}t\right)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$	0.431 ± 0.0060	1.98 ± 0.017	0.153 ± 0.0040	0.187 ± 0.037

Mit Hilfe des Norm-Gesamtwärmeübergangswiderstand $R_{(s,t),st} = 0.17 \text{ (m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ wird aus dem gemessenen Wärmedurchlasswiderstand R nach Anwendung der Kriterien 1-4 der Norm-Wärmedurchgangskoeffizient U_{st} nach Formel 27 berechnet:

$$U_{st} = \frac{1}{R + 0,17 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = \frac{1}{(1,98 \pm 0,015) \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 0,17 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = (0,46 \pm 0,038) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{Formel 29}$$

Dieser Wert kann z.B. mit den Labormesswerten der Hotboxmessungen in Abschnitt 6.3.2.1 und dem Rechenwert aus Abschnitt 3.1.2 verglichen werden.

5.4.2 Holzrahmenwand

In Tabelle 7 sind wiederum die nach Formel 20 durch Mittelwertbildung nach ISO 9869-1 ermittelten U-Werte des Almemo® «B»- sowie gSkin® «B» Messgerätesatzes aufgeführt. Zudem werden die in Abschnitt 4.1.1.4 aufgeführten Kriterien 1-4 der ISO 9869-1 nacheinander angewendet. In der letzten Spalte sind jeweils die Differenzen der U-Werte der zwei getesteten Messgeräte aufgelistet.

Die Fehler sind jeweils als 95 % Vertrauensintervall, d. h. mit 2σ der Verteilung der Mittelwerte, angegeben.

Tabelle 7 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzrahmenwand nach ISO 9869-1 unter Berücksichtigung verschiedener Auswahlkriterien. Die Fehler sind als 95 %-Vertrauensintervall angegeben.

Kriterium	Beschreibung	Mittelwerte der U-Werte in W/(m ² K) inkl. 95 %-Vertrauensintervall ($\mu \pm 2\sigma$)		Differenz der U-Werte in W/(m ² K) inkl. 95 %-Vertrauensintervall ($\mu \pm 2\sigma$)
		Almemo «B»	gSkin «B»	
	Verteilung			Differenz
	Mittelwert nach ISO 9869-1	0.190 ± 0.0020	0.242 ± 0.0019	0.052± 0.0028
1	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d	0.191 ± 0.0020	0.242 ± 0.0019	0.051± 0.0028
1-2	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d	0.191 ± 0.0020	0.242 ± 0.0019	0.051± 0.028
1-3	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d & $\frac{\Delta U_{ISO}(t,t-24h)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$	0.191 ± 0.0020	0.243 ± 0.0020	0.052± 0.020
1-4	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d & $\frac{\Delta U_{ISO}(t,t-24h)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$ & $\frac{\Delta U_{ISO}(t,\frac{2}{3}t)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$	0.191 ± 0.0019	0.243 ± 0.0054	0.052± 0.0057

Das folgende Histogramm zeigt die Verteilung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten ohne und mit Beachtung der Kriterien 1 bis 4.

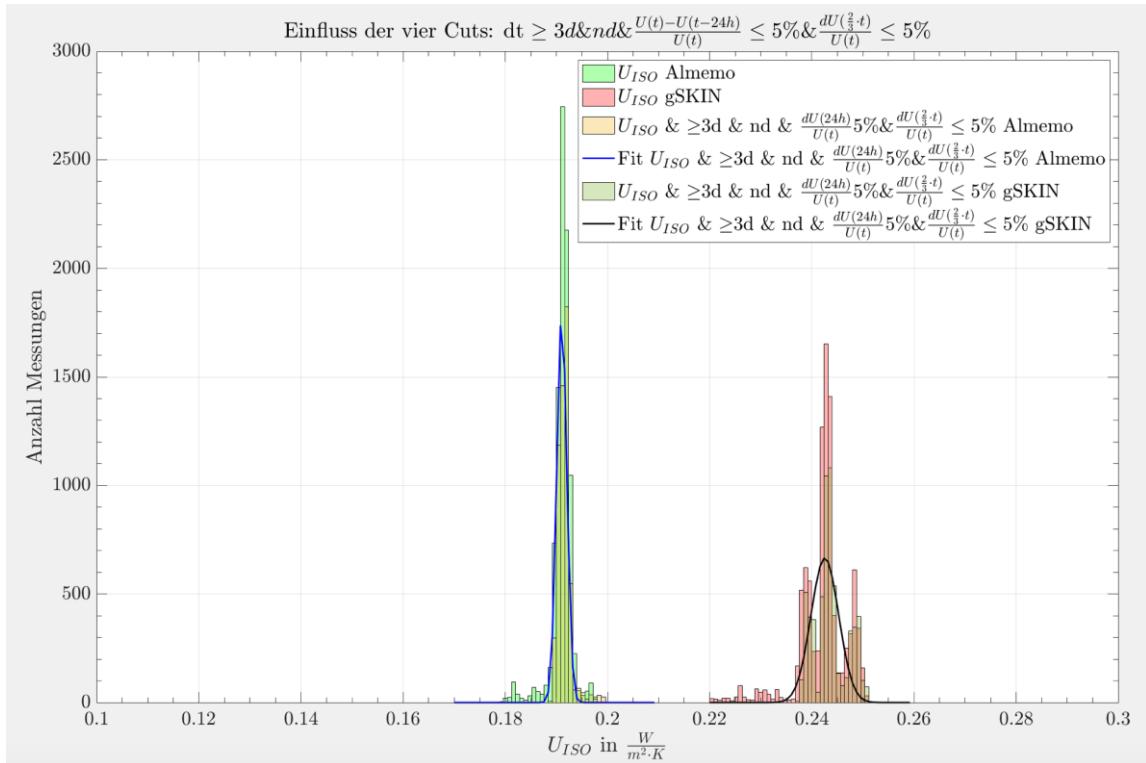


Abbildung 14: Vergleich der Verteilung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der beiden Messgeräte ohne und mit Berücksichtigung der Kriterien 1 bis 4. Bei der Berechnung der zweiten Histogramme wurden folgende Kriterien eingehalten: Messzeit von mehr als 72 h, ganzzahliges Vielfaches eines Tages, relative Änderung des Mittelwertes des Wärmedurchgangskoeffizienten $\leq 5\%$ für 24 h vor Ende der Messzeit sowie für 2/3 der Messzeit. Dargestellt sind die In-Situ-Messwerte der Holzrahmenwand.

Auch an der Holzrahmenwand werden mit dem Almemo-Messgerätesatz zusätzlich zu den Lufttemperaturen auch die inneren und äusseren Oberflächentemperaturen aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser werden wiederum die Wärmedurchlasswiderstände, die inneren Wärmeübergangswiderstände und die nach Formel 28 abgeleiteten äusseren Wärmeübergangswiderstände dargestellt (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 8 : Zusammenstellung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten, der Wärmedurchlasswiderstände, der inneren Wärmeübergangswiderstände und der daraus abgeleiteten äusseren Wärmeübergangswiderstände nach ISO 9869-1 unter Berücksichtigung verschiedener Auswahlkriterien. Die Fehler sind als 95 %-Vertrauensintervall angegeben. Die Messwerte stammen vom Almemo-Messgerätesatz, angebracht an der Holzrahmenwand.

Kri- terium	Beschreibung	Wärme- durchgangs- koeffizient	Wärme- durchlass- widerstand	innerer Wärme- übergangs- widerstand	äusserer Wärme- übergangs- widerstand
		U	R	R_{si}	R_{se}
		in $W/(m^2K)$			
	Mittelwert nach ISO 9869-1	0.190 ± 0.0020	4.8 ± 0.14	0.21 ± 0.014	0.25 ± 0.15
1	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3 d	0.191 ± 0.0020	4.8 ± 0.14	0.21 ± 0.014	0.23 ± 0.15
1-2	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d	0.191 ± 0.0020	4.8 ± 0.15	0.21 ± 0.013	0.23 ± 0.16
1-3	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d & $\frac{\Delta U_{ISO}(t,t-24h)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$	0.191 ± 0.0020	4.8 ± 0.15	0.21 ± 0.012	0.23 ± 0.16
1-4	Mittelwert nach ISO 9869-1 & Messzeit > 3d & Messzeit = n d & $\frac{\Delta U_{ISO}(t,t-24h)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$ & $\frac{\Delta U_{ISO}(t,\frac{2}{3}t)}{U_{ISO}(t)} \leq 5\%$	0.191 ± 0.0019	4.8 ± 0.13	0.21 ± 0.0091	0.23 ± 0.14

Analog zur Massivholzwand wird auch für die Holzrahmenwand der mit Hilfe des Norm-Gesamtwärmeübergangswiderstand $R_{(s,t),st}=0.17 \text{ (m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ aus R nach Anwendung der Kriterien 1-4 der Norm-Wärmedurchgangskoeffizient U_{st} nach Formel 27 berechnet. Dieser ergibt sich zu:

$$U_{st} = \frac{1}{R + 0.17 \frac{m^2K}{W}} = \frac{1}{(4.8 \pm 0.13) \frac{m^2K}{W} + 0.17 \frac{m^2K}{W}} = (0.201 \pm 0.0056) \frac{W}{m^2K} \quad \text{Formel 30}$$

Dieser Wert kann z.B. mit dem berechneten U-Wert des Gefaches nach Formel 19 in Abschnitt 3.2.2 verglichen werden.

6 Ablauf und Ergebnisse Labormessungen

In diesem Kapitel werden der Prüfaufbau, die Prüfbedingungen sowie die Ergebnisse der Labormessungen an den zwei Prüfwänden beschrieben. Dabei werden in Abschnitt **Fehler! V erweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sowohl die Ergebnisse der Hotbox-Messungen als auch die der In-Situ-Messgeräte aufgezeigt und miteinander verglichen.

Die Angaben in den nachfolgenden Abschnitten sind zum Teil eher allgemein gehalten. Die Messergebnisse der Hotboxmessungen werden zusammenfassend dargestellt. Detaillierte Beschreibungen sowie Herleitungen zu den Hotbox-Messungen sind den jeweiligen Messberichten zu entnehmen, welche dem vorliegenden Forschungsbericht als Anlage beigefügt sind. Dabei handelt es sich um folgende Dokumente:

- «Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Massivholzwand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10- PB-03
- «Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Holzrahmenwand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990»; Berichtnummer 72FE-008702-R-10- PB-04

Die Genauigkeit der In-Situ-Messgeräte wurden ebenfalls in der Hot Box überprüft, um systematische Fehler erkennen oder ausschliessen zu können. Zum Einsatz der In-Situ-Messgeräte im Labor gibt es daher keine eigenständigen Prüfberichte.

6.1 Prüfaufbau

Der Einbauvorgang sowie genaue Prüfaufbau der Hotboxmessungen ist in oben genannten Prüfberichten erläutert. Nachdem die jeweilige Prüfwand in den Prüfrahmen der Hotbox eingebaut worden ist, werden an dieser zunächst Thermoelemente zur Messung der Oberflächentemperaturen im Rahmen der Hotboxmessung befestigt.

Neben den Thermoelementen der Hotbox werden auch die Sensoren der In-Situ-Messgeräte am Prüfkörper befestigt. An der Massivholzwand wird mit den Messsystemen «Almemo A» und «gSKIN A» gemessen. An der Holzrahmenwand wird mit den Messsystemen «Almemo B», «gSKIN B» und «gSKIN A» gemessen. Die Lage der Sensoren der In-Situ-Messgeräte ist in Anhang C dokumentiert.

Die Datenlogger werden ausserhalb der Hotbox platziert, um Wärmeeinträge durch die Stromversorgung der In-Situ-Messgeräte zu vermeiden

Um sicher zu gehen, dass diese Sensoren keinen Einfluss auf die Resultate der Hotbox haben, wurden zudem im Zeitraum vom 06.07.2018 bis 15.07.2018 zunächst Messungen der Massivholzwand ohne installierte In-Situ-Messgeräte gemacht. Ein Vergleich der Ergebnisse der Hotboxmessungen inklusive In-Situ-Messgeräte zeigt, dass die Sensoren der In-Situ-Messgeräte keinen Einfluss auf das Resultat der Hotbox-Messung haben.

6.2 Prüfbedingungen

Die Messungen der Wärmedurchgangskoeffizienten der Prüfkörper werden in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 [7] bzw. SN EN ISO 8990 [6] jeweils bei drei verschiedenen Mitteltemperaturen durchgeführt. Als Mitteltemperatur wird der Mittelwert der Lufttemperaturen zwischen Warm- und Kaltseite der Hotbox bezeichnet. Ausgehend von einer konstanten Temperatur von i. d. R. 20°C auf der Warmseite werden Mitteltemperaturen von 5°C, 10°C und 15°C angestrebt. Dazu werden die Lufttemperaturen auf der Kaltseite zwischen -10°C, 0°C und 10°C variiert.

Bei der Holzrahmenwand wird die Messung bei der Mitteltemperatur von 10°C mehrmals wiederholt. Grund hierfür sind die parallel zur Hotbox-Messung laufenden Messungen mit den In-Situ-Messgeräten, bei welchen verschiedene Anordnungen der Wärmeflussplatten getestet werden.

Tabelle 9: Temperaturrandbedingungen der Messungen der Wärmedurchgangskoeffizienten der Prüfkörper Massivholzwand und Holzrahmenwand.

Prüfkörper	Prüfzeitraum	Mittel-temperatur (K)	Temp. Kaltseite (°C)	Temp. Warmseite (°C)
Massivholzwand	23.09.2018	15	10	20
	25.09.2018	10	0	20
	26.-27.09.2018	5	-10	20
Holzrahmenwand	23.-24.10.2018	15	0	30
	25.10.2018	10	0	20
	28.10.2018	10	0	20
	30.10.2018	10	0	20
	02.11.2018	10	0	20
	26.10.2018	5	-10	20

6.3 Prüfergebnisse

In folgendem Abschnitt werden sowohl die Prüfergebnisse der U-Wertbestimmung mit der Hotbox (vgl. Abschnitt 6.3.1) als auch mit den In-Situ-Messgeräten (vgl. Abschnitt 6.3.2) beschrieben.

6.3.1 Hotboxmessungen

Wie in Abschnitt 4.2.2 dargestellt, wird im Rahmen der Messauswertung nach SN EN ISO 12567-1 [7] der Norm-Wärmedurchgangskoeffizient U_{st} in $W/(m^2 \cdot K)$ nach Formel 27 bestimmt.

In nachfolgender Tabelle sind die Norm-Wärmedurchgangskoeffizienten der Prüfkörper, jeweils gemessen bei drei verschiedenen Mitteltemperaturen, aufgeführt.

Die Messunsicherheit als 2 Sigma der Messwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten wird nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz ermittelt.

Tabelle 10 : Zusammenfassung der Norm-Wärmedurchgangskoeffizienten U_{st} von Massivholzwand und Holzrahmenwand, jeweils ermittelt bei drei Temperaturrandbedingungen.

Prüfkörper	Mitteltemperatur (K)	Norm-Wärmedurchgangskoeff. U_{st} ($W/m^2 \cdot K$)
Massivholzwand	15	0.52 ± 0.05
	10	0.55 ± 0.03
	5	0.53 ± 0.02
Holzrahmenwand	15	0.34 ± 0.03
	10 (erster Messdurchlauf)	0.29 ± 0.03
	10 (zweiter Messdurchlauf)	0.30 ± 0.03
	10 (dritter Messdurchlauf)	0.31 ± 0.03
	10 (vierter Messdurchlauf)	0.30 ± 0.03
	5	0.30 ± 0.02

6.3.2 In-Situ-Messgeräte

Mit Hilfe der parallel zu den Hotboxmessungen aufgezeichneten Messwerten der In-Situ-Messgeräte sollen systematische Fehler und Abweichungen der Messgeräte ausgeschlossen werden.

Nachfolgend werden zunächst die aufgezeichneten Messwerte der In-Situ-Messgeräte an der Massivholzwand und anschliessend an der Holzrahmenwand behandelt. Die Messwerte der Hotboxmessungen werden bei der Massivholzwand zum Vergleich ebenfalls aufgeführt. Bei der Holzrahmenwand wird jeweils der berechnete U-Wert des Gefachs genannt.

6.3.2.1 Massivholzwand

6.3.2.1.1 Resultate der Mitteltemperaturen 15°C, 10°C und 5°C

Zunächst werden die Messergebnisse bei einer Mitteltemperatur von 15°C der Hotbox-Messung ausgewertet. In Abbildung 15 sind die Einzelmessungen der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall des gSkin-Messgerätesatzes «A» sowie Almemo-Messgerätesatzes «A» aufgeführt. Vergleichend dazu sind die stündlichen Mittelwerte der Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} aus den Hotbox-Messungen ebenfalls dargestellt. Die gSkin U-Werte liegen oberhalb der Almemo U-Werte. Der mittlere U-Wert des Auswertezeitraums des gSkin-Messgerätes liegt bei $0.57 \pm 0.04 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der mittlere U-Wert des Almemo-Messgerätes liegt mit $(0.52 \pm 0.01) \text{ W/m}^2\text{K}$ im Bereich des U_{st} -Wertes der Hotboxmessung. Die Schätzwerte der Standardabweichungen der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten berechnen sich nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz aus den Schätzwerten der Standardabweichungen der Wärmestromdichten und der Temperaturdifferenzen.

Die mit der gSkin Wärmeflussplatte aufgezeichneten Wärmeströme liegen mit $(5.66 \pm 0.42) \text{ W/m}^2$ höher als die mit der Almemo Wärmeflussplatte aufgezeichneten Wärmeströme von $(5.07 \pm 0.14) \text{ W/m}^2$. Zudem schwanken sie stärker. Der auf die Prüffläche bezogene Wärmestrom der Hotbox liegt mit $(5.14 \pm 0.40) \text{ W/m}^2$ im Mittel zwischen den Werten der In-Situ-Sensoren, weisst dabei aber eine höhere Abweichung auf.

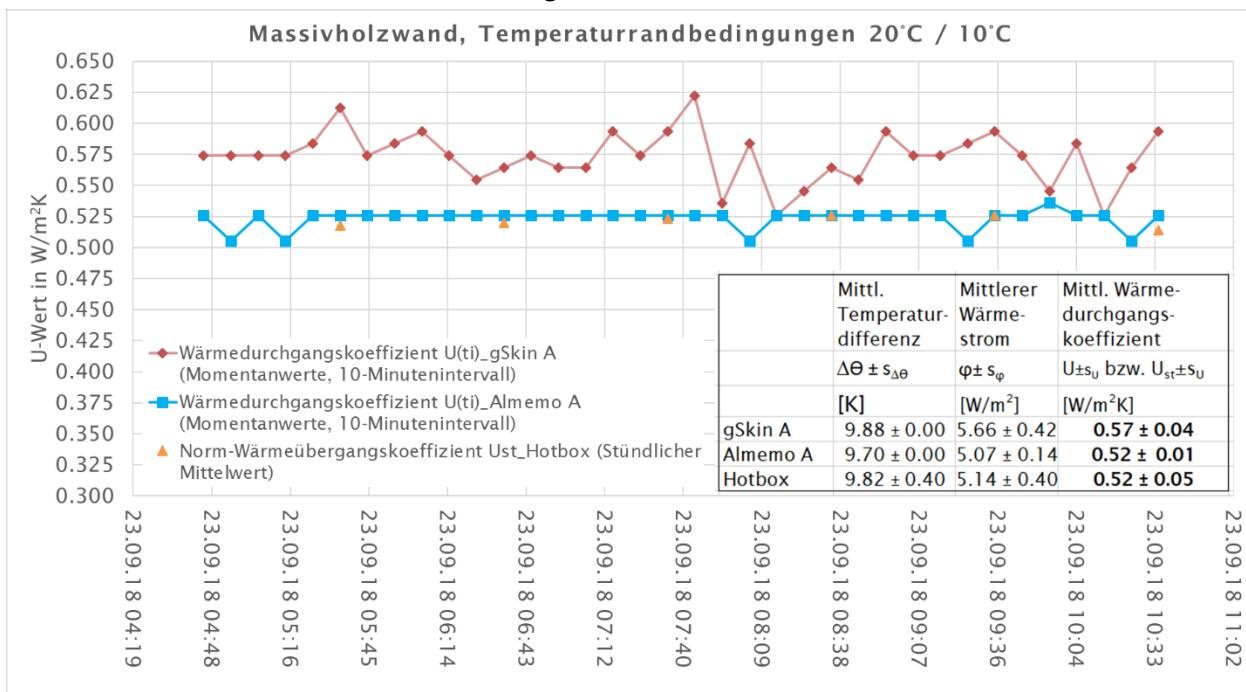


Abbildung 15 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall des gSkin-Messgerätesatzes «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «A» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 15°C. Stündliche Mittelwerte der Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} aus den Hotbox-Messungen (in Orange). Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt ist der mittlere Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} des Auswertezeitraumes der Hotbox-Messung.

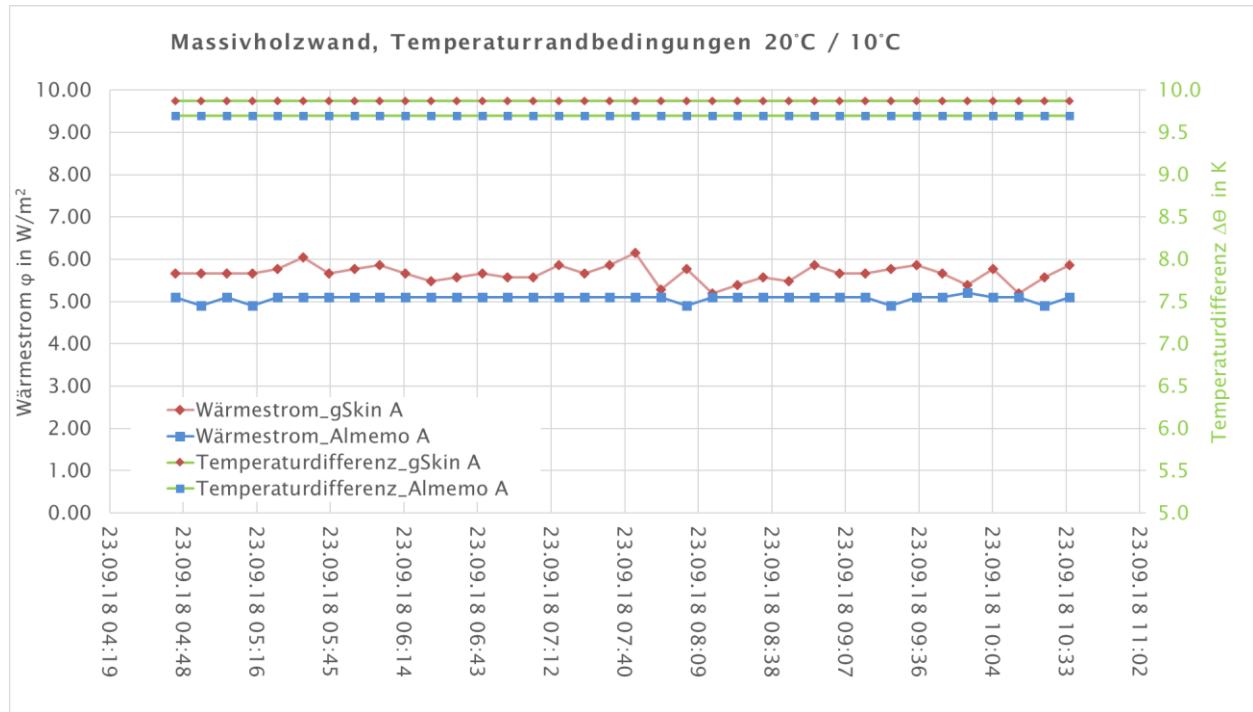


Abbildung 16 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 15°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Temperatursensoren (in Blau) auf der Warm- und Kaltseite.

Die Auswertungen der Messdaten der In-Situ-Messgeräte bei einer Mitteltemperatur der Hotbox-Messung von 10°C erfolgt analog zu den Auswertungen bei einer Mitteltemperatur von 15°C. Wiederum liegen die gSkin U-Werte oberhalb der Almemo U-Werte und weisen zudem eine grössere Streuung auf (vgl. Abbildung 17). Der mittlere U-Wert des Auswertezeitraums des gSkin-Messgerätes liegt bei (0.59 ± 0.04) W/m²K. Der mittlere U-Wert des Almemo-Messgerätes liegt bei (0.54 ± 0.01) W/m²K. Der mittlere U_{st} -Wert der Hotboxmessung liegt mit (0.55 ± 0.03) W/m²K dazwischen, jedoch näher an den Almemo U-Werten.

Die mit der gSkin Wärmeflussplatte aufgezeichneten Wärmeströme liegen mit (11.55 ± 0.74) W/m² wiederum deutlich höher als die mit der Almemo-Wärmeflussplatte aufgezeichneten Wärmeströme von (10.47 ± 0.29) W/m². Zudem schwanken sie stärker. Der auf die Prüffläche bezogene Wärmestrom der Hotbox liegt mit (10.90 ± 0.55) W/m² im Mittel wiederum zwischen den Werten der In-Situ-Sensoren.

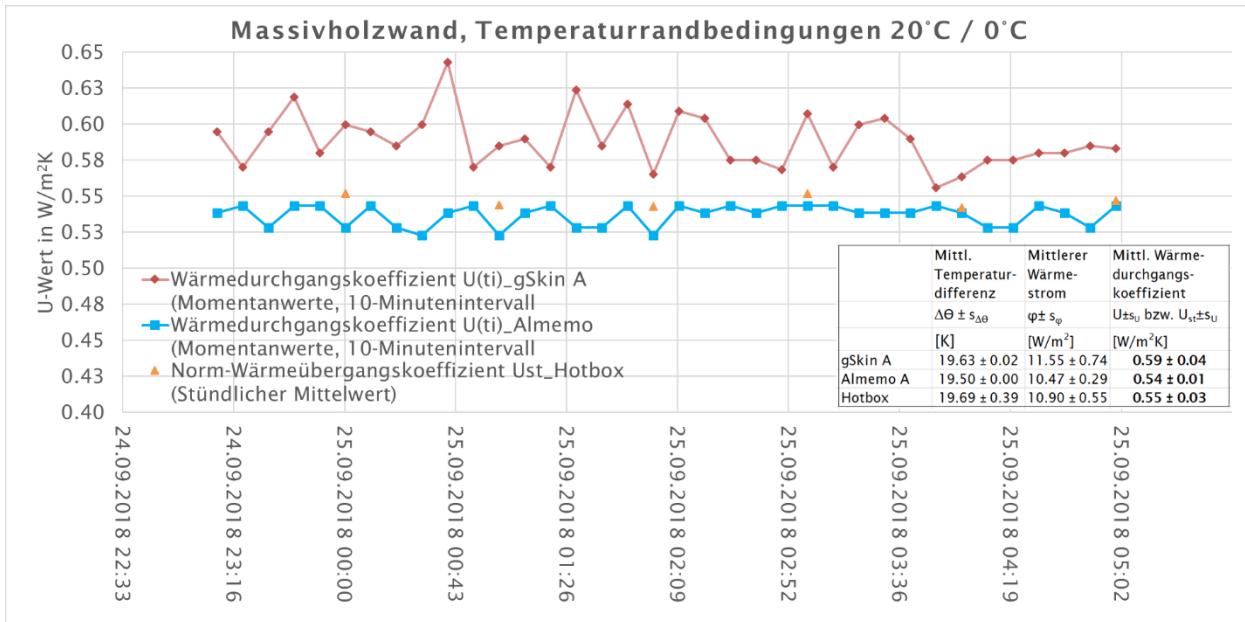


Abbildung 17 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall des gSkin-Messgerätesatzes «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «A» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C. Stündliche Mittelwerte der Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} aus den Hotbox-Messungen (in Orange). Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . der mittlere Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} ist auch über den Auswertezeitraum der Hotbox-Messung dargestellt.

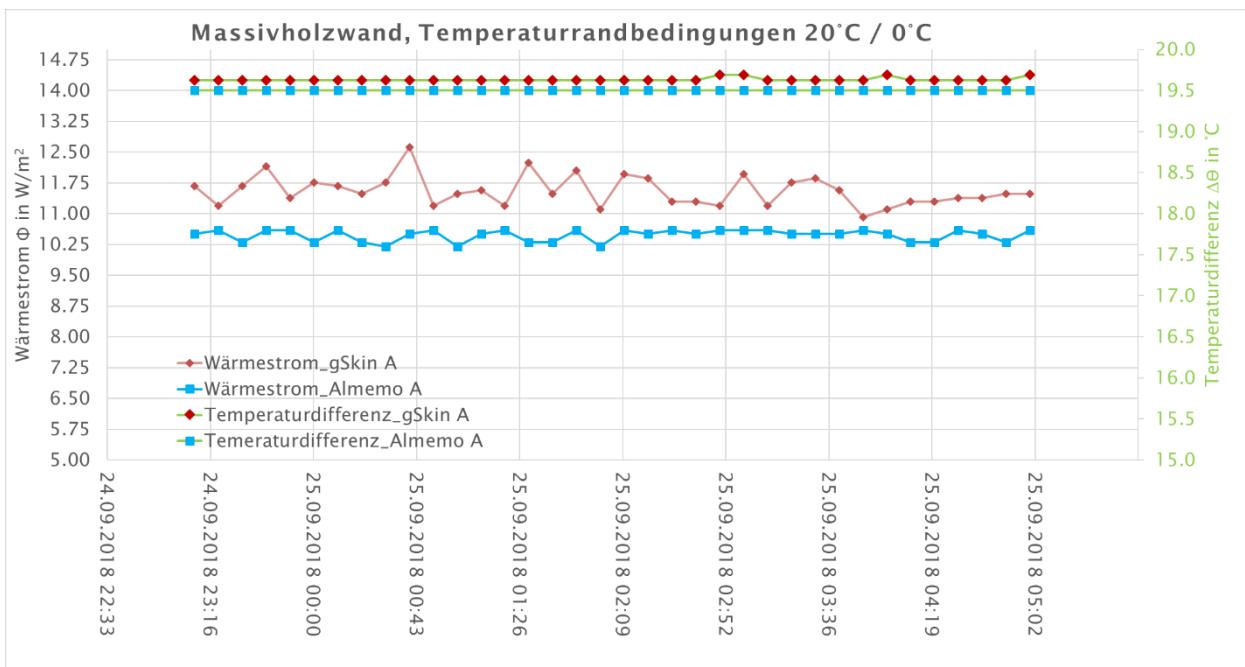


Abbildung 18 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.

Während der Hotbox-Messung bei einer Mitteltemperatur von 5°C zeigen die In-Situ-Messgeräte die höchste Übereinstimmung der Messergebnisse untereinander und in Bezug auf den Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} . Alle drei mittleren U-Werte liegen im Bereich von 0.53 W/m²K. Einzig die Messabweichung liegt bei der Hotbox-Messung etwas höher als bei den In-Situ-Messgeräten (vgl. Abbildung 19, Tabelle).

Die Wärmeströme der In-Situ-Messgeräte sowie der Hotbox stimmen innerhalb der Messunsicherheit überein. Der auf die Prüffläche bezogene Wärmestrom der Hotbox liegt mit $(15.83 \pm 0.64) \text{ W/m}^2$ im Mittel etwas höher als die Wärmeströme der gSkin Wärmeblusplatte mit $(15.69 \pm 0.85) \text{ W/m}^2$ sowie der Almemo Wärmeblusplatte mit $(15.73 \pm 0.48) \text{ W/m}^2$.

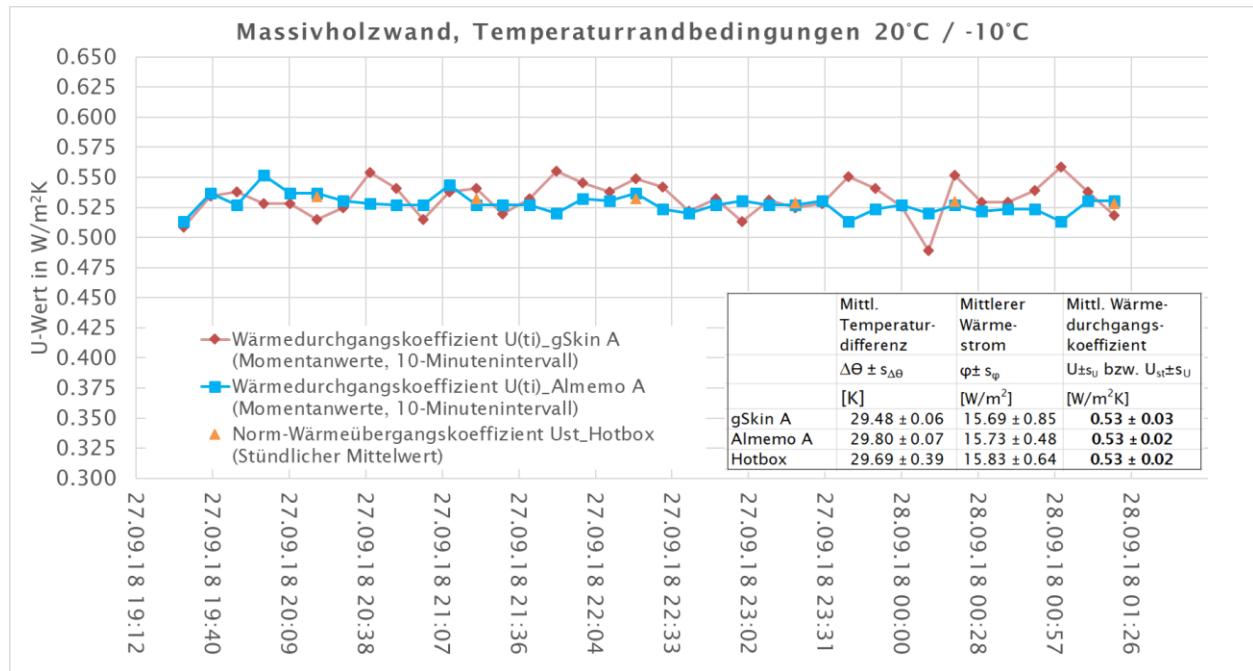


Abbildung 19 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall des gSkin-Messgerätesatzes «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «A» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 5°C. Stündliche Mittelwerte der Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} aus den Hotbox-Messungen (in Orange). Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt der mittlere Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} des Auswertezeitraumes der Hotbox-Messung.

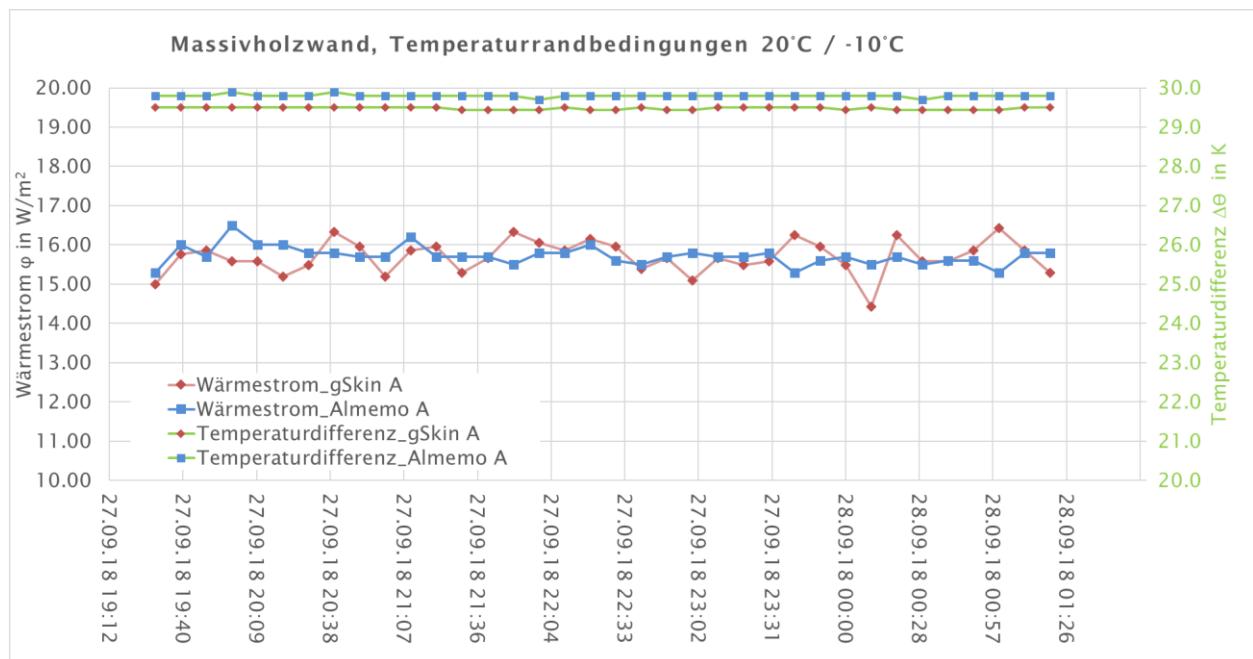


Abbildung 20 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeblusplatte (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.

6.3.2.1.2 Zusammenfassende Darstellung

In Tabelle 11 sind die Messergebnisse der Hotbox sowie In-Situ-Messgeräte bei den drei Mitteltemperaturen zusammengefasst. Dargestellt sind die mittleren Temperaturdifferenzen, Wärmeströme und Wärmedurchgangskoeffizienten inklusive Messunsicherheiten (2 Sigma).

Tabelle 11 : Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse der Hotbox sowie In-Situ-messgeräte bei drei verschiedenen Mitteltemperaturen an der Massivholzwand. Dargestellt sind die mittleren Temperaturdifferenzen, Wärmeströme und Wärmedurchgangskoeffizienten inklusive Messunsicherheiten (2 Sigma).

Mittel-tempera-tur	Messgerät	Mittl. Temperatur-differenz	Mittlerer Wärme-strom	Mittl. Wärme-durchgangs-koeffizient
15 °C		$\Delta\Theta \pm s_{\Delta\Theta}$ in K	$\varphi \pm s_{\varphi}$ in W/m ²	$U \pm s_U$ bzw. $U_{st} \pm s_U$ in W/m ² K
	gSkin A	9.88 ± 0.00	5.66 ± 0.21	0.57 ± 0.02
	Almemo A	9.70 ± 0.00	5.07 ± 0.07	0.52 ± 0.01
10 °C	Hotbox	9.82 ± 0.40	5.14 ± 0.40	0.52 ± 0.05
	gSkin A	19.63 ± 0.02	11.55 ± 0.37	0.59 ± 0.02
	Almemo A	19.50 ± 0.00	10.47 ± 0.14	0.54 ± 0.01
5 °C	Hotbox	19.69 ± 0.39	10.90 ± 0.55	0.55 ± 0.03
	gSkin A	29.48 ± 0.03	15.69 ± 0.42	0.53 ± 0.01
	Almemo A	29.80 ± 0.03	15.73 ± 0.24	0.53 ± 0.01
	Hotbox	29.69 ± 0.39	15.83 ± 0.64	0.53 ± 0.02

6.3.2.2 Holzrahmenwand

Bei den In-Situ-Messungen an der Holzrahmenwand der Werkstatthalle in Gais waren die Messgerätesätze Almemo «B» und gSkin «B» im Einsatz. Im Rahmen der Labormessungen in der Hotbox wurden beide gSkin-Messgerätesätze, also «A» und «B», am Gefach des Prüfkörpers installiert. So konnten verschiedene Einflüsse auf die Installationsweise der Wärmeflussplatten untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden in einigen Messungen eine der Wärmeflussplatten falsch herum, also mit der Unterseite nach oben, montiert. Beim Umdrehen der Wärmeflussplatte wurde jeweils darauf geachtet, dass diese wieder an der gleichen Position befestigt wurde. Bei einer anderen Messung wurde Wärmeleitpaste unter alle drei Wärmeflussplatten geschmiert. Die Untersuchung des Einflusses der Montage der gSkin-Wärmeflussplatten wurden jeweils bei der Mitteltemperatur von 10°C durchgeführt. Insgesamt wurden bei dieser Mitteltemperatur vier Messdurchgänge durchgeführt. In nachfolgender Tabelle sind die unterschiedlichen Anordnungen der Wärmeflussplatten beschrieben.

Tabelle 12 : Übersicht Installationsweise der Wärmeflussplatten. «Richtig» bedeutet Installation gemäss Herstellervorgaben. «Falsch» bedeutet, dass die Unterseite der Wärmeflussplatte nach oben gekehrt ist.

Datum der Messung	Mitteltemperatur	Installationsweise Wärmeflussplatten		
		Almemo «B»	gSkin «A»	gSkin «B»
23.10.2018	15°C	richtig	falsch	richtig
25.10.2018	10°C (erster Messdurchlauf)	richtig	falsch	richtig
28.10.2018	10°C (zweiter Messdurchlauf)	richtig	richtig	richtig
30.10.2018	10°C (dritter Messdurchlauf)	richtig	richtig	falsch
02.11.2018	10°C (vierter Messdurchlauf)	richtig, zzgl. Wärmeleitpaste	richtig, zzgl. Wärmeleitpaste	richtig, zzgl. Wärmeleitpaste
26.10.2018	5°C	richtig	falsch	richtig

Die Sensoren der In-Situ-Messgeräte wurden im Bereich eines Gefachs, ausserhalb des Einflussbereichs der Unterkonstruktion der Holzrahmenwand befestigt. Da aus den Hotbox-Messungen U-Werte des Prüfkörpers inklusive Unterkonstruktion resultieren, werden die mit den In-Situ-Messgeräten aufgezeichneten U-Werte nachfolgend mit dem in Abschnitt 3.2.2 berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten des Gefachs verglichen. Ein direkter Vergleich der gemessenen Wärmeströme der Hotbox mit den gemessenen Wärmeströmen der Wärmeflussplatten der In-Situ-Messgerätesätze ist nicht möglich, da in der Hotbox Wärmeströme über das gesamte Bauteil inklusive Unterkonstruktion gemessen werden.

6.3.2.2.1 Resultate Mitteltemperatur von 15°C

Zunächst werden die Messergebnisse bei einer Mitteltemperatur von 15°C der Hotbox-Messung ausgewertet. Die Wärmeflussplatten sind wie in Tabelle 12 dargestellt, angeordnet. In Abbildung 21 sind wiederum die Einzelmessungen der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall des gSkin-Messgerätesatzes «B» sowie «A» und des Almemo-Messgerätesatzes «B» aufgeführt. Die gSkin «B» und «A» U-Werte liegen oberhalb der Almemo «B» U-Werte. Zudem schwanken sie auf Grund einer grösseren Schwankung der mit der gSkin-Wärmeflussplatte gemessenen Wärmeströme stärker. Der mittlere U-Wert des Auswertezeitraums des gSkin- «B» bzw. «A» Messgerätes liegt bei (0.27 ± 0.01) W/m²K bzw. (0.30 ± 0.02) W/m²K. Der mittlere U-Wert des Almemo-Messgerätes liegt mit (0.25 ± 0.01) W/m²K im Bereich des berechneten U-Wertes des Gefachs.

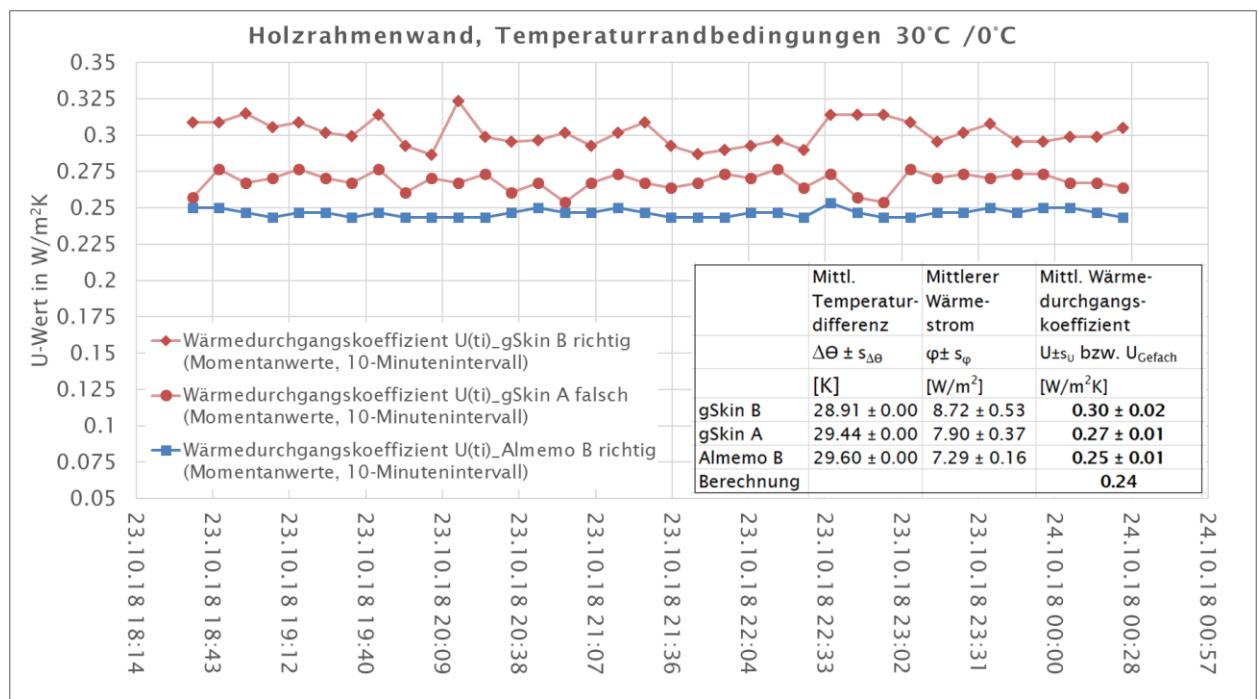


Abbildung 21 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesätze «B» und «A» (in Rot) und des Almemo-Messgerätesatzes «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 15°C. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie Wärmeströme φ . Auch dargestellt der berechnete Wärmeübergangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach} .

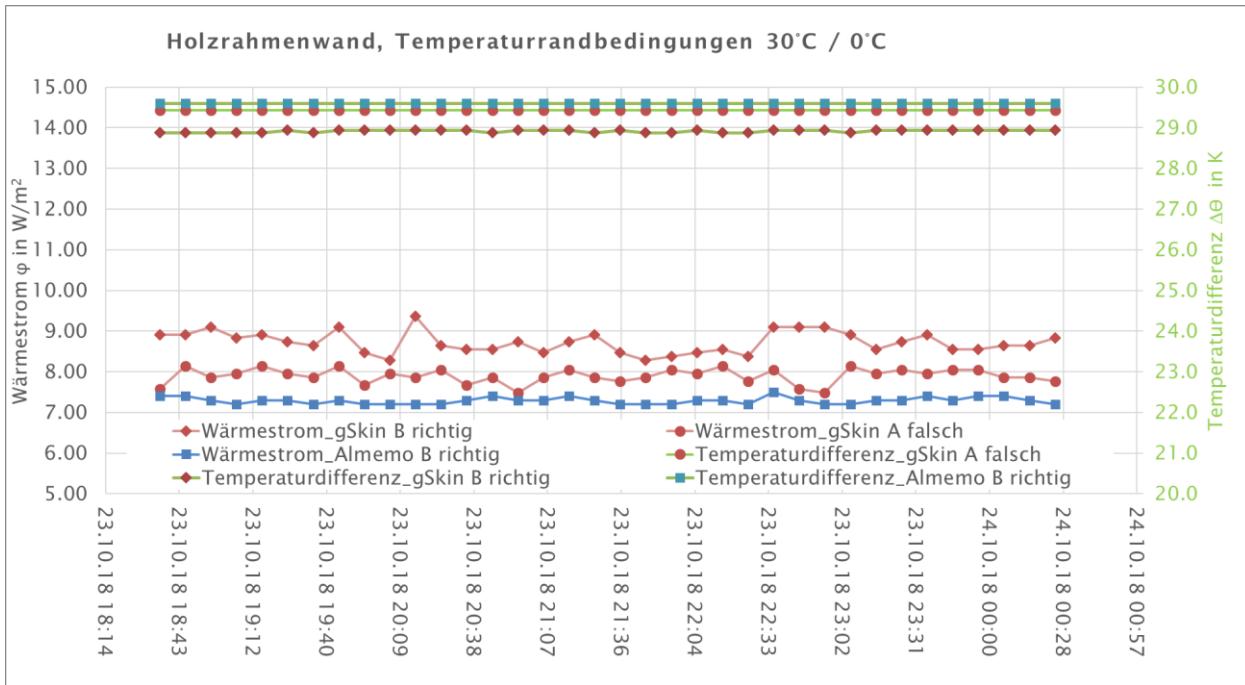


Abbildung 22 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 15°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.

6.3.2.2.2 Resultate Mitteltemperatur von 10°C

Erster Messdurchlauf:

Die Installationsweise der Wärmeflussplatten beim ersten Messdurchlauf der Mitteltemperatur von 10°C entspricht der Installationsweise bei der Mitteltemperatur von 15°C. Wiederum liegen die gSkin U-Werte oberhalb der Almemo U-Werte und sind zudem stärker schwankend (vgl. Abbildung 17). Der mittlere U-Wert des Auswertezeitraums der gSkin-Messgeräte liegt bei (0.26 ± 0.02) («B») $\text{W/m}^2\text{K}$ bzw. (0.24 ± 0.01) («A») $\text{W/m}^2\text{K}$.

Der mittlere U-Wert des Almemo «B»-Messgerätes liegt bei (0.22 ± 0.01) $\text{W/m}^2\text{K}$. Almemo «B» und gSkin «A» stimmen im Bereich der Fehlerabweichung überein. Der berechnete U-Wert des Gefaches liegt mit 0.24 im Bereich von gSkin «A» und innerhalb der Fehlerabweichung auch im Bereich von gSkin «B».

U_{Gefach}

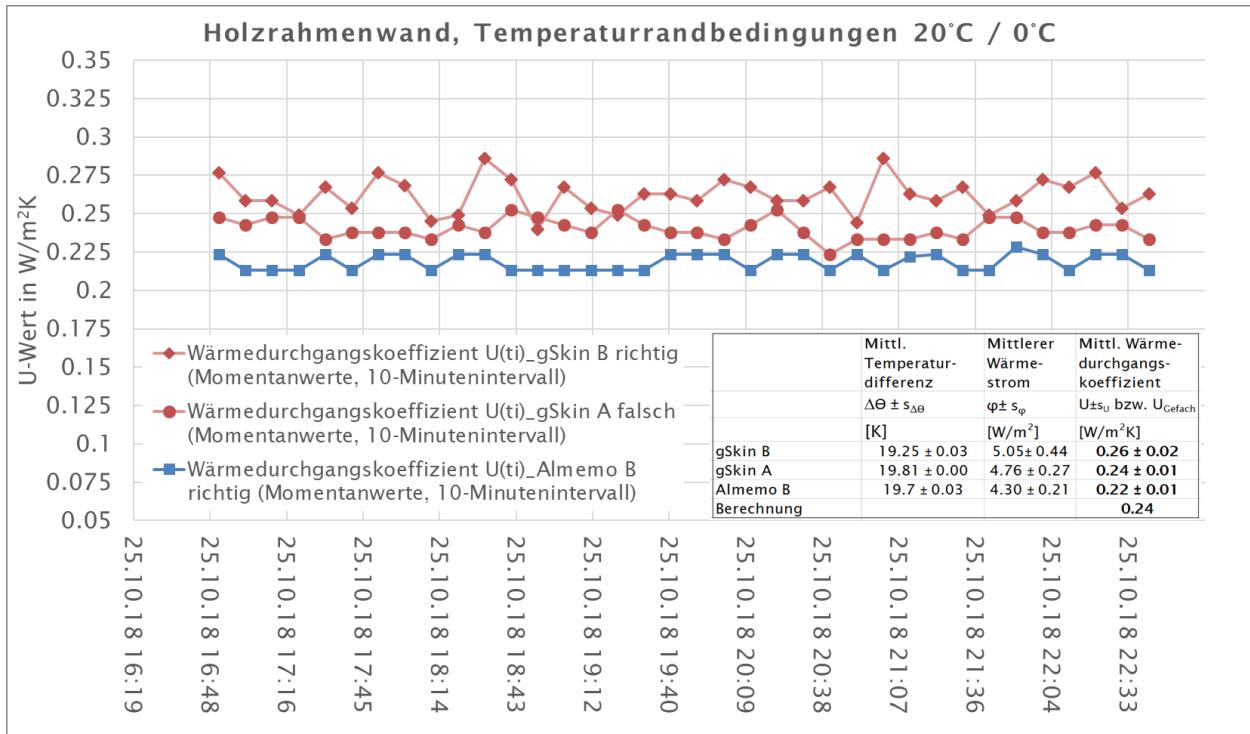


Abbildung 23 : Einzelmessungen der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesatze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C (erster Messdurchlauf). Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt der berechnete Wärmeübergangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach} .

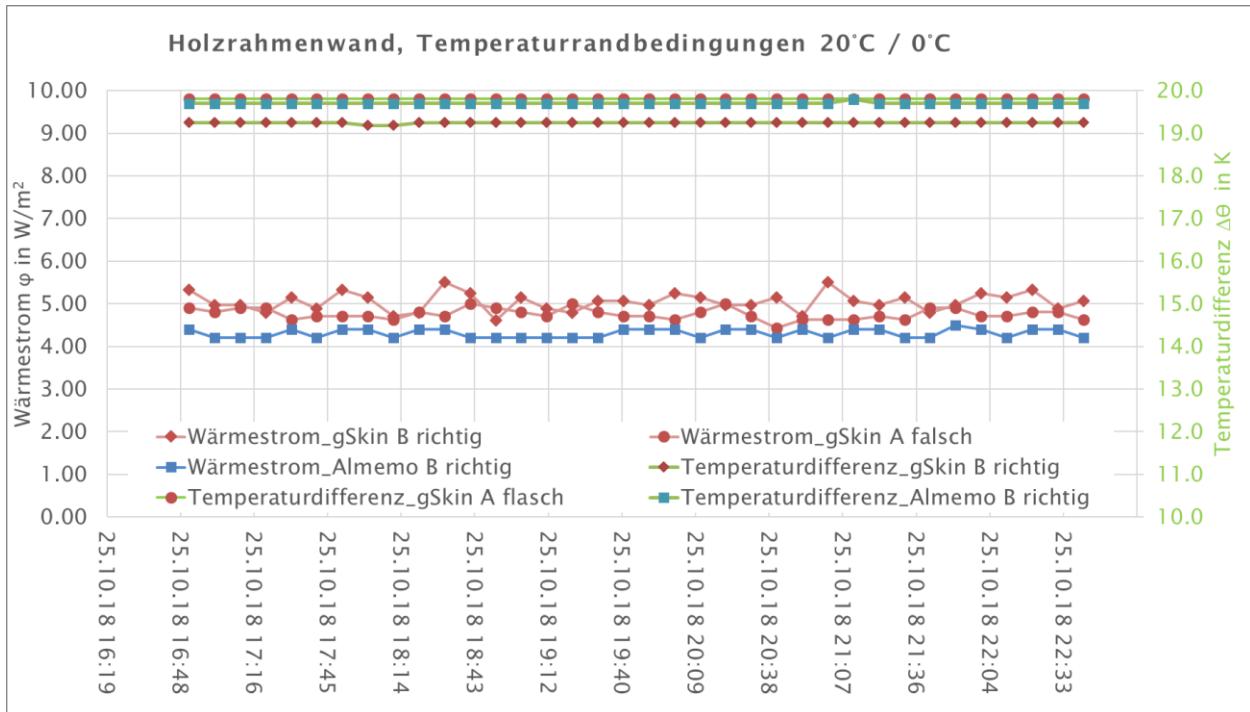


Abbildung 24 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C (erster Messdurchlauf). Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.

Zweiter Messdurchlauf:

Beim zweiten Messdurchlauf der Mitteltemperatur von 10°C werden alle drei Wärmeflussplatten richtig herum installiert. Die gemessenen Wärmeströme von Almemo «B» und gSkin «A» und damit auch die U-Werte stimmen im Bereich der Fehlerabweichung überein. Die U-Werte liegen bei (0.21 ± 0.01) (Almemo «B») und (0.20 ± 0.02) W/m²K (gSkin «A»). Der U-Wert des gSkin «B» Messgerätesatzes liegt mit (0.26 ± 0.02) W/m²K wiederum deutlich höher. Der berechnete U-Wert des Gefachs liegt mit 0.24 W/m²K dazwischen.

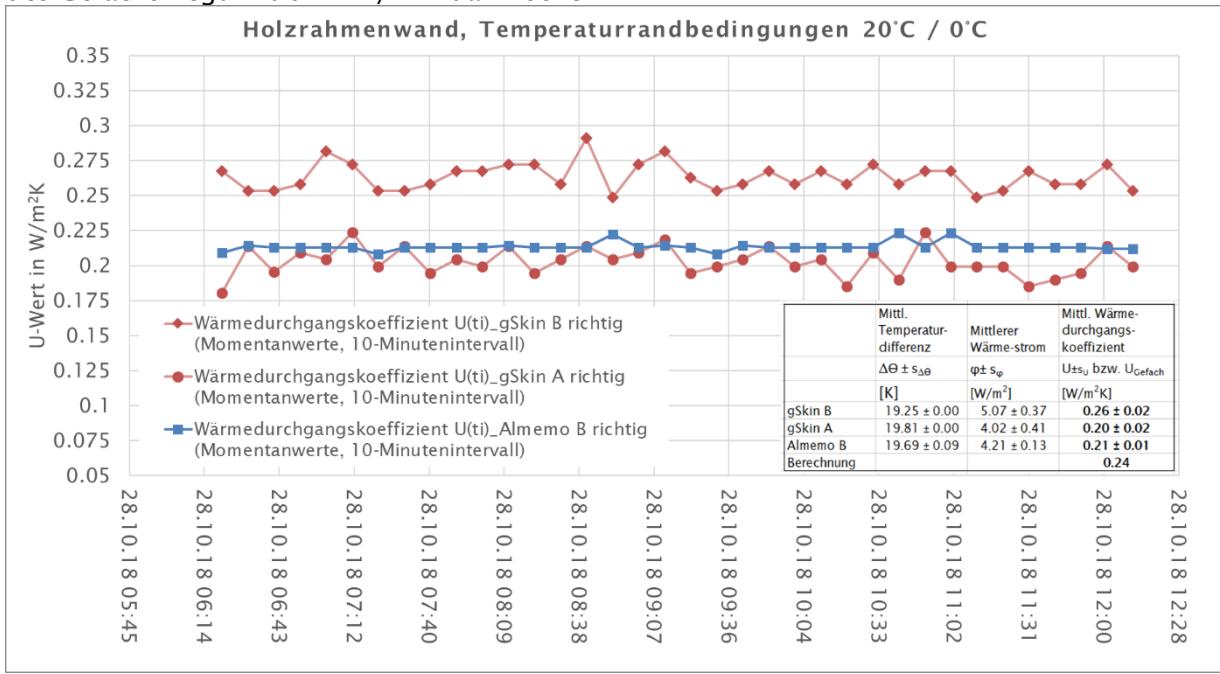


Abbildung 25 : Einzelmessungen der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesatze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «AB» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, zweiter Messdurchlauf. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt ist der berechnete Wärmeübergangskoeffizient des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach} .

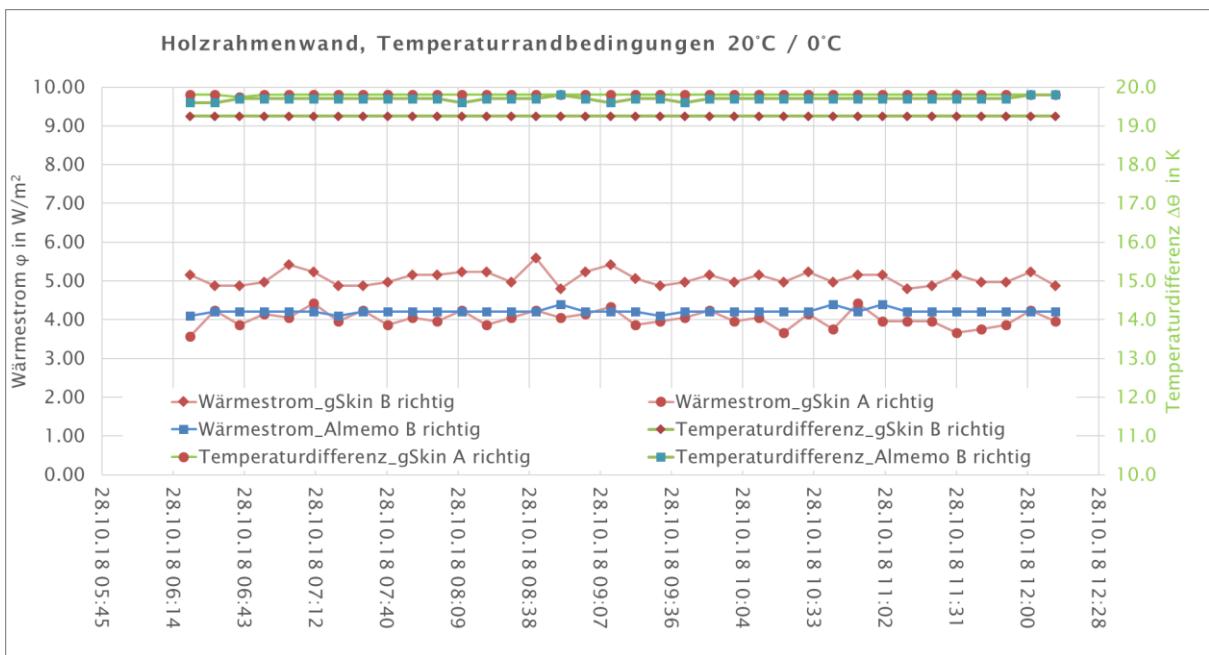


Abbildung 26 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, zweiter Messdurchlauf. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.

Dritter Messdurchlauf:

Beim dritten Messdurchlauf der Mitteltemperatur von 10°C werden die Wärmeleistungsplatten wie folgt installiert: Almemo «B» richtig, gSkin «A» richtig und gSkin «B» falsch. Der gemessenen U-Wert von gSkin «B» stimmt mit dem gemessenen U-Wert von gSkin «B» des zweiten Messdurchlaufs überein. Die gemessenen Wärmeströme von Almemo «B» und gSkin «A» und damit auch die U-Werte stimmen wiederum im Bereich der Fehlerabweichung überein. Im Vergleich zu Messdurchlauf zwei liegt der Mittelwert jedoch ca. 0.02 W/m²K höher.

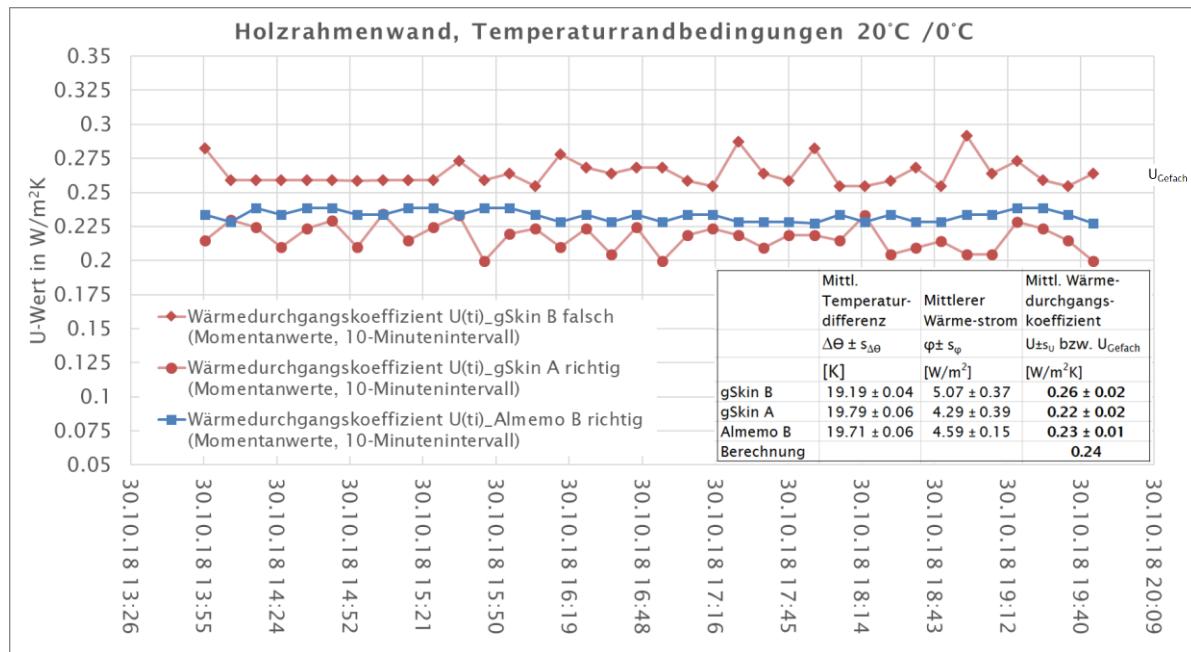


Abbildung 27 : Einzelmessungen der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesätze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «AB» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, dritter Messdurchlauf. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt ist der berechnete Wärmeübergangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach} .

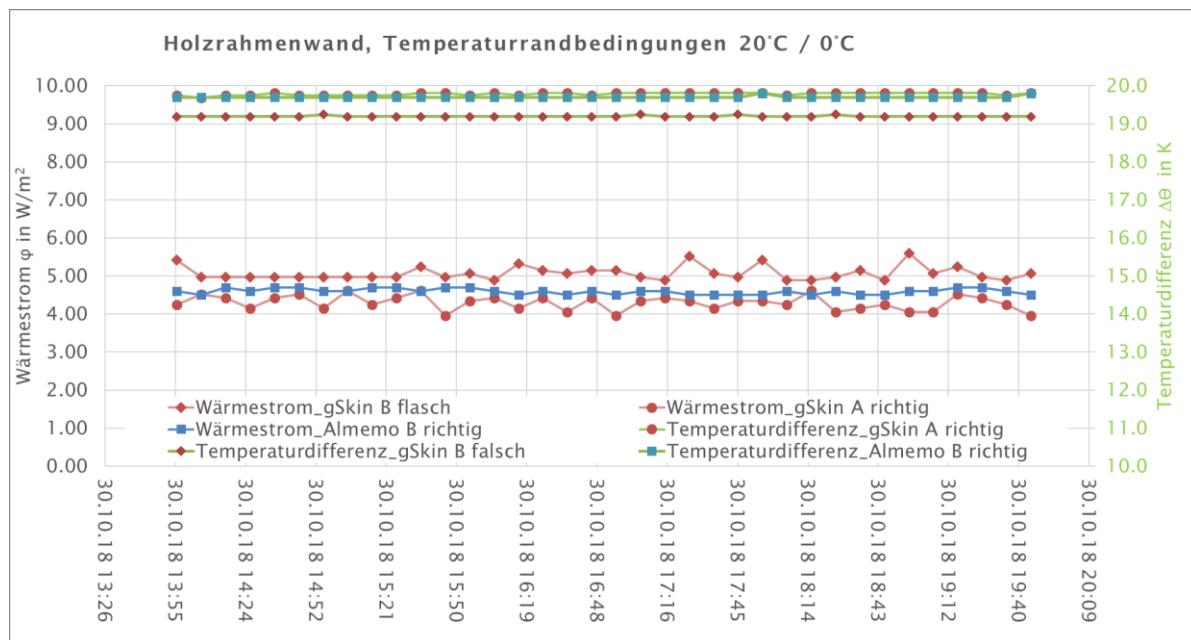


Abbildung 28 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeleistungplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, dritter Messdurchlauf. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.

Vierter Messdurchlauf:

Beim letzten Messdurchlauf der Mitteltemperatur von 10°C werden erneut alle drei Wärmeleitplatten richtig herum installiert. Zusätzlich wird unter alle drei Wärmeleitplatten Wärmeleitpaste geschmiert. Aus Abbildung 29 und Abbildung 30 wird deutlich, dass Wärmeströme und damit auch U-Werte aller drei Messgerätesätze in diesem Messdurchlauf eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen. Die gemessenen U-Werte liegen im Bereich von $(0.23 \pm 0.02$ bzw. $0.01)$ W/m²K und stimmen damit auch gut mit dem berechneten Wert des Gefaches von 0.24 W/m²K überein.

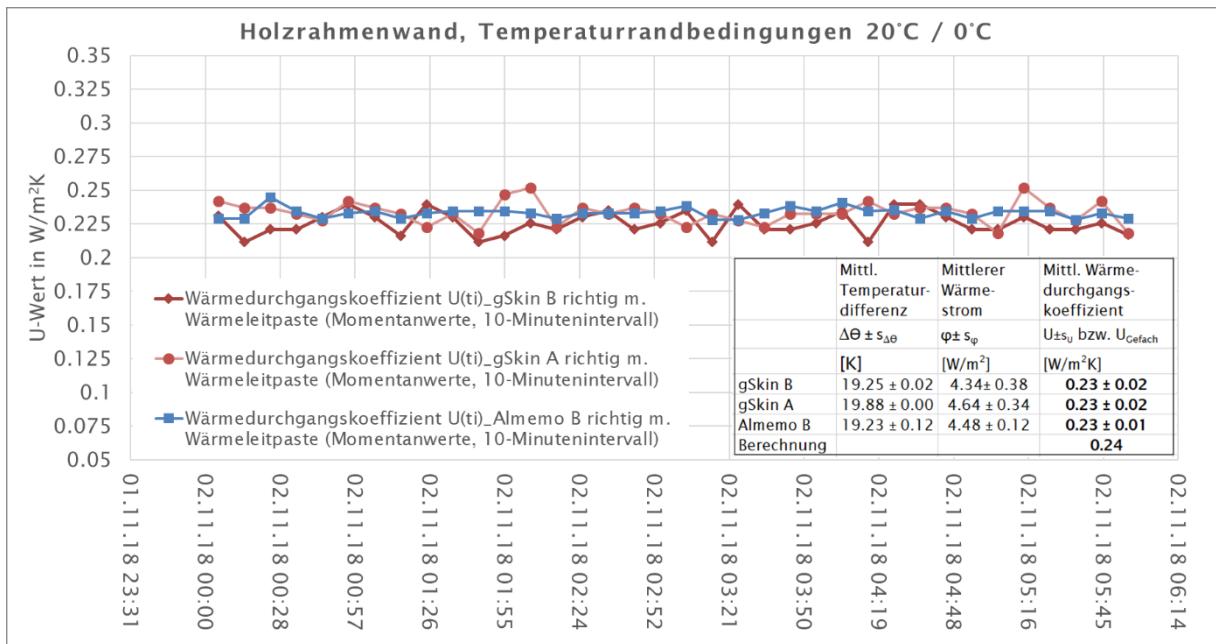


Abbildung 29 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesätze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, vierter Messdurchlauf. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\Theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt ist der berechnete Wärmeübergangskoeffizient des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach} .

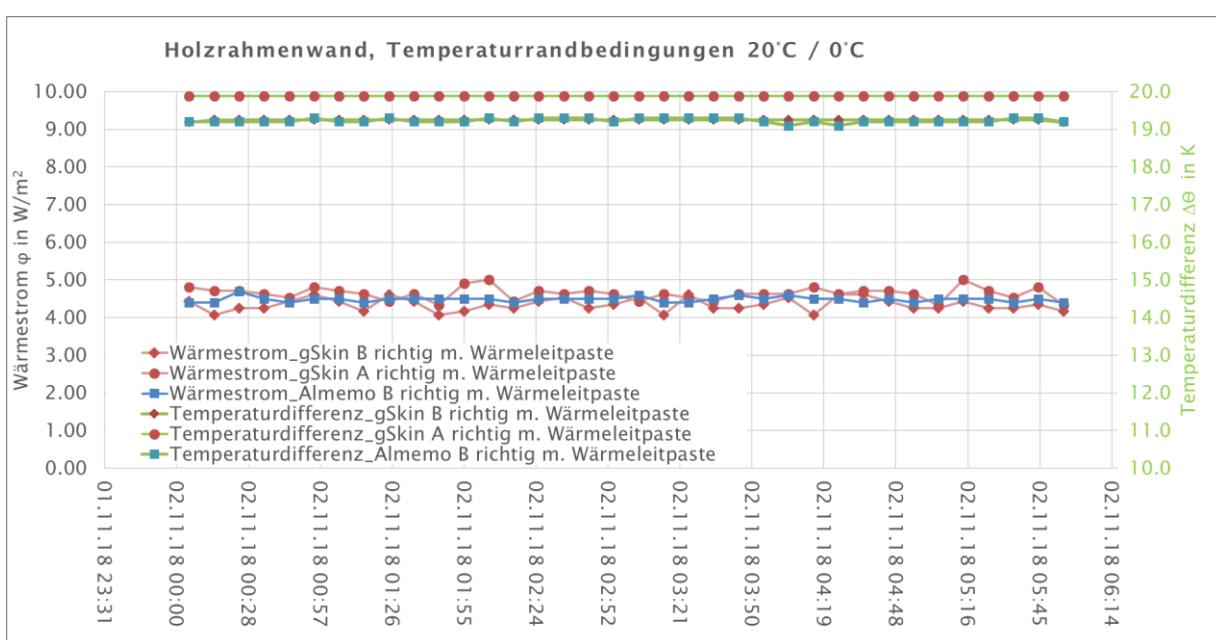


Abbildung 30 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeleitplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, vierter Messdurchlauf. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.

6.3.2.2.3 Resultate Mitteltemperatur von 5°C

Beim Messdurchlauf der Mitteltemperatur von 5°C stimmen Anordnung der Wärmeleitflächen (Almemo «B» richtig, gSkin «A» falsch, gSkin «B» richtig) sowie Messresultate im Bereich der Fehlerabweichung mit den Messresultaten des ersten Messdurchlaufs bei einer Mitteltemperatur von 10°C überein.

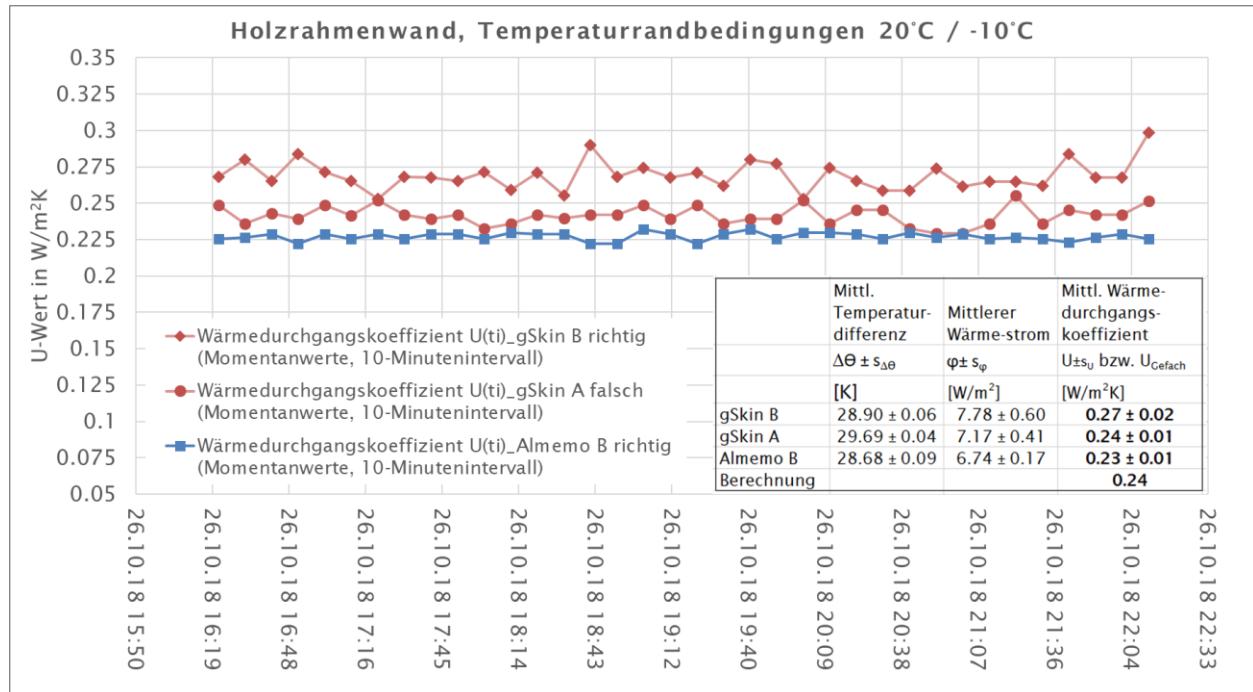


Abbildung 31 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesätze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 5°C. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt der berechnete Wärmeübergangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach} .

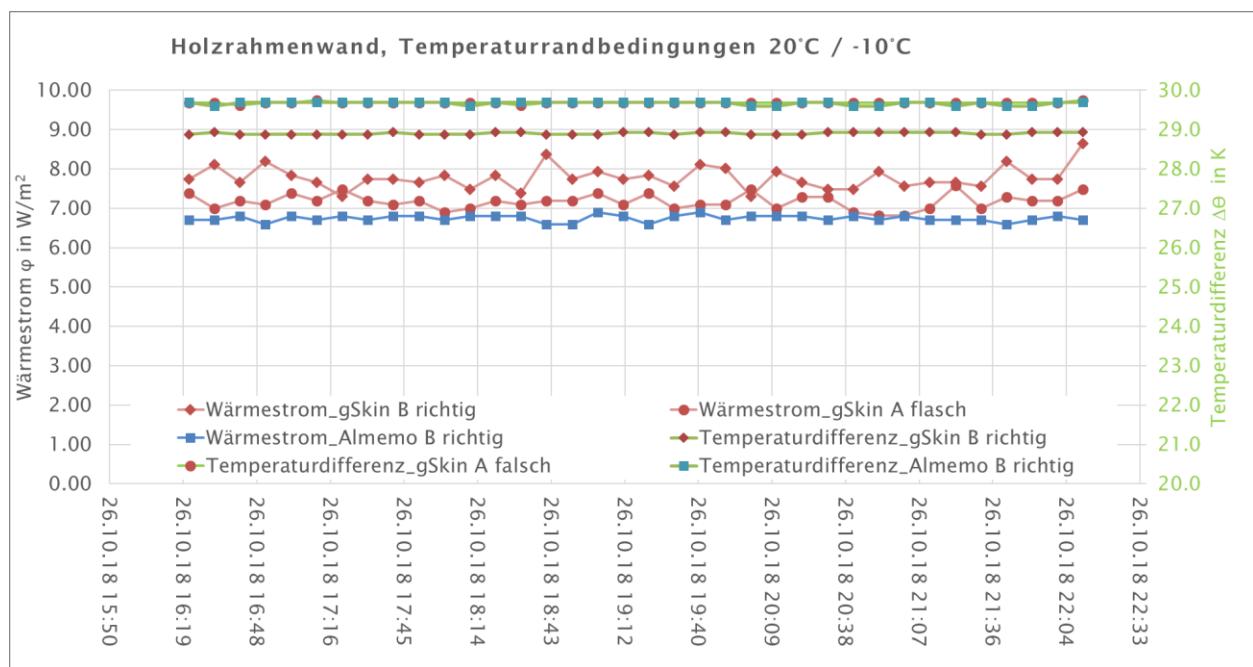


Abbildung 32 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeleitplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 5°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.

6.3.2.2.4 Zusammenfassende Darstellungen

Ergänzend zu den zuvor gezeigten Diagrammen der Messungen an der Holzrahmenwand werden die Wärmeströme der auf unterschiedliche Art installierten Wärmeleitplatten bei den verschiedenen Mitteltemperaturen in Abbildung 33 als Boxplot - Diagramm dargestellt. Mit einer Ausnahme werden mit der Wärmeleitplatte gSkin «B» unabhängig von der Montageweise jeweils die höchsten Wärmeströme aufgezeichnet. Beim Einsatz von Wärmeleitpaste ändert sich dieses Verhalten. Die Wärmeströme der drei Messplatten liegen am nächsten zusammen. Mit der Wärmeleitplatte gSkin «B» werden in diesem Messdurchlauf die niedrigsten Wärmeströme aufgezeichnet.

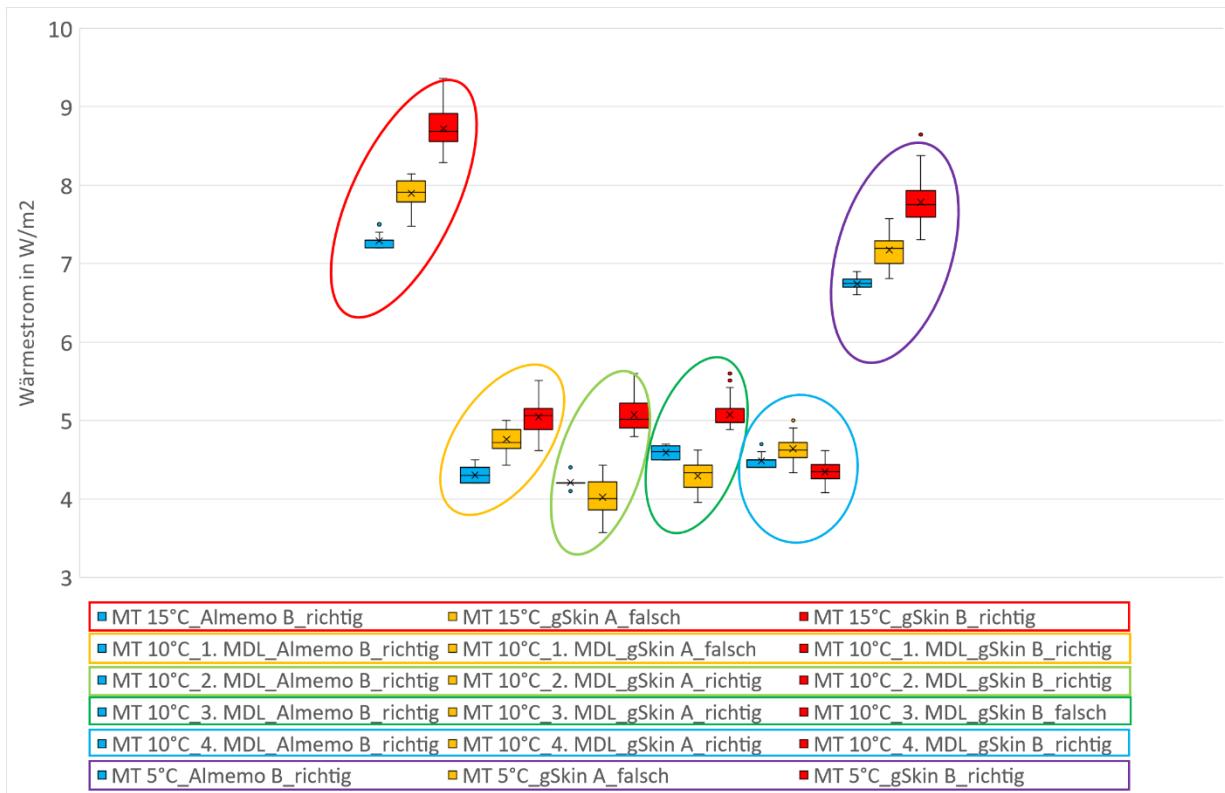


Abbildung 33 : Boxplot der aufgezeichneten Wärmeströme der In-Situ-Messgerätesätze Almemo «B», gSkin «B» und gSkin «A» während der Hotboxmessungen an der Holzrahmenwand. «MT» steht für Mitteltemperatur und «MDL» für Messdurchlauf.

Nachfolgend sollen die Wärmeströme der vier Messdurchläufe der Mitteltemperatur von 10°C detaillierter dargestellt werden. Dazu sind in Abbildung 34 die Mittelwerte der Wärmestromdichten der drei Messgeräte inklusive Messunsicherheit dargestellt.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die gemessenen mittleren Wärmeströme der vier Messdurchläufe Werte zwischen ca. 4.0 W/m² und 5.1 W/m² annehmen.

Die gSkin «B» Wärmeleitplatte liefert in den ersten drei Messdurchläufen mit Werten im Bereich von 5.0 bis 5.1 W/m² die höchsten Wärmeströme, die deutlich über den Wärmeströmen der gSkin «A»- sowie Almemo «B»-Platte liegen. Vergleicht man die mittleren Wärmeströme der ersten drei Messdurchläufe der gSkin «B», so ist festzustellen, dass diese untereinander jedoch die geringste Streuung aufweisen.

Die höchste Streuung der einzelnen Wärmeströme der Messdurchläufe eins bis drei wurden mit der gSkin «A» Platte aufgezeichnet. Diese lagen im Bereich von 4.0 bis 4.8 W/m²K.

Die mittleren Wärmeströme der Almemo «B»-Platte der ersten drei Messdurchläufe variieren im Bereich von 4.2 bis 4.6 W/m²K.

Im zweiten Messdurchlauf unterscheiden sich die mittleren Wärmeströme der drei Wärmeleitplatten mit Werten im Bereich von 4.0 W/m² und 5.1 W/m² am deutlichsten.

Im vierten Messdurchlauf bei Verwendung von Wärmeleitpaste ist der Unterschied hingegen am geringsten. Die mittleren Wärmeströme liegen hier im Bereich von 4.3 W/m² und 4.6 W/m².

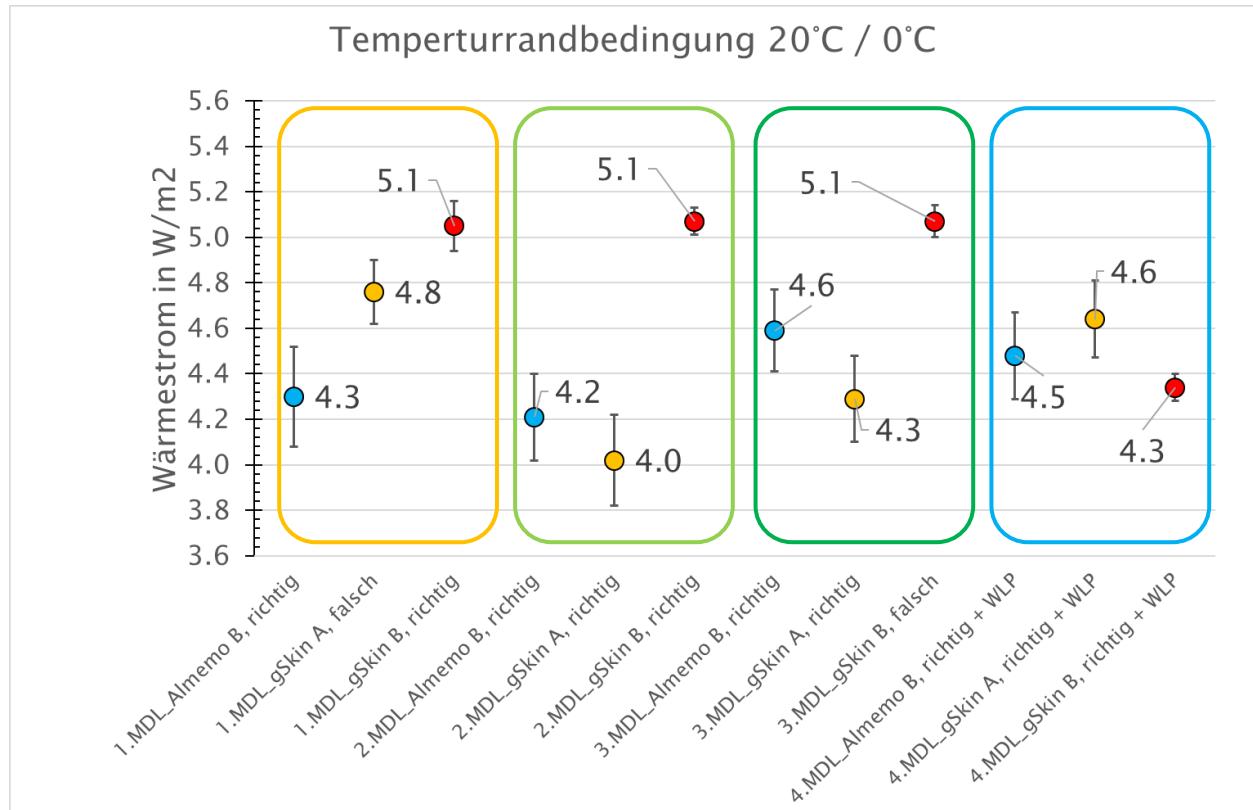


Abbildung 34 : Mittelwerte der Wärmestromdichten der drei Messgeräte bei vier verschiedenen Messdurchläufen (MDL) der Mitteltemperatur (MT) von 10°C. Die Messunsicherheit ist als 2 Sigma der Messwerte angegeben.

In Tabelle 13 sind die Messergebnisse der In-Situ-Messgeräte bei den drei Mitteltemperaturen zusammengefasst. Dargestellt sind die mittleren Temperaturdifferenzen, Wärmeströme und Wärmedurchgangskoeffizienten inklusive Messunsicherheiten (2 Sigma). Der theoretisch berechnete U-Wert des Gefaches der Holzrahmenwand liegt im Vergleich zu den gemessenen Werten bei 0.24 W/m²K.

Tabelle 13 : Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse der In-Situ-Messgeräte bei verschiedenen Mitteltemperaturen an der Holzrahmenwand. Dargestellt sind die mittleren Temperaturdifferenzen, Wärmeströme und Wärmedurchgangskoeffizienten inklusive Messunsicherheiten (2 Sigma).

Mittel-tempera-tur	Messgerät, Installationsart Wärmeleitpaste	Mittl. Temperatur-differenz	Mittlerer Wärme-strom	Mittl. Wärme-durchgangs-koeffizient
15 °C		$\Delta\Theta \pm s_{\Delta\Theta}$ in K	$\varphi \pm s_{\varphi}$ in W/m ²	$U \pm s_U$ bzw. $U_{st} \pm s_U$ in W/m ² K
	gSkin B, richtig	28.91 ± 0.03	8.72 ± 0.33	0.30 ± 0.01
	gSkin A, falsch	29.44 ± 0.23	7.90 ± 0.28	0.27 ± 0.01
10 °C_1.MDL	Almemo B, richtig	29.60 ± 0.00	7.29 ± 0.08	0.25 ± 0.00
	gSkin B, richtig	19.25 ± 0.02	5.05 ± 0.22	0.26 ± 0.01
	gSkin A, falsch	19.81 ± 0.00	4.76 ± 0.14	0.24 ± 0.01
10 °C_2.MDL	Almemo B, richtig	19.7 ± 0.02	4.30 ± 0.11	0.22 ± 0.01
	gSkin B, richtig	19.25 ± 0.00	5.07 ± 0.19	0.26 ± 0.01
	gSkin A, richtig	19.81 ± 0.00	4.02 ± 0.20	0.20 ± 0.01
10 °C_3.MDL	Almemo B, richtig	19.69 ± 0.04	4.21 ± 0.06	0.21 ± 0.00
	gSkin B, falsch	19.19 ± 0.02	5.07 ± 0.18	0.26 ± 0.01
	gSkin A, richtig	19.79 ± 0.03	4.29 ± 0.19	0.22 ± 0.01
10 °C_4.MDL	Almemo B, richtig	19.71 ± 0.03	4.59 ± 0.07	0.23 ± 0.00
	gSkin B, richtig + Wärmeleitpaste	19.25 ± 0.01	4.34 ± 0.19	0.23 ± 0.01
	gSkin A, richtig + Wärmeleitpaste	19.88 ± 0.00	4.64 ± 0.17	0.23 ± 0.01
5 K	Almemo B, richtig + Wärmeleitpaste	19.23 ± 0.06	4.48 ± 0.06	0.23 ± 0.00
	gSkin B, richtig	28.90 ± 0.03	7.78 ± 0.30	0.27 ± 0.01
	gSkin A, falsch	29.69 ± 0.02	7.17 ± 0.20	0.24 ± 0.01
	Almemo B, richtig	28.68 ± 0.04	6.74 ± 0.08	0.23 ± 0.00

7 Schlussfolgerungen

Abschliessend sollen die Ergebnisse der In-Situ-Messungen sowie der Messungen in der Hotbox zusammenfassend bewertet werden.

7.1 In-Situ-Messungen

Bei den In-Situ-Messungen wurden die Wärmedurchgangskoeffizienten der Massivholzwand und der Holzrahmenwand bestimmt. Da eine zeitliche Drift der Messwerte über die gesamte Messperiode (09.02.2018 – 20.04.2018) festgestellt wurde, wurden die Messungen für verschiedene lange Messdauern ausgewertet.

Dabei werden neben der gesamten Messperiode (Variante 1, vgl. Auswertungen in Abschnitt 5.4) folgende Varianten betrachtet:

- Variante 2: 09.02.2018 bis 20.04.2018

Ausserdem wird die Messzeit in kürzere Intervalle eingeteilt. So ergeben sich folgende Varianten:

- Variante 3: 09.02.2018 bis 16.02.2018 gleich 7.3 Tage
- Variante 4: 17.02.2018 bis 01.03.2018 gleich 13 Tage
- Variante 5: 02.03.2018 bis 14.03.2018 gleich 13 Tage
- Variante 6: 15.03.2018 bis 27.03.2018 gleich 13 Tage

7.1.1 Massivholzwand

Die Ergebnisse für den Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der Massivholzwand sind für alle Varianten der Messdauern und für beide Messgeräte in Abbildung 35 dargestellt. Für jede Variante wird der Wärmedurchgangskoeffizient ohne Auswahlkriterium, bei Anwendung des 1. Auswahlkriteriums, bis zur Anwendung aller 4 Auswahlkriterien dargestellt. Falls es nicht möglich ist, den Mittelpunkt der Verteilung durch das Anpassen einer Gauß-Verteilung zu bestimmen, wird der letzte Mittelwert des Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 verwandt. Diese Werte werden dann gelb markiert.

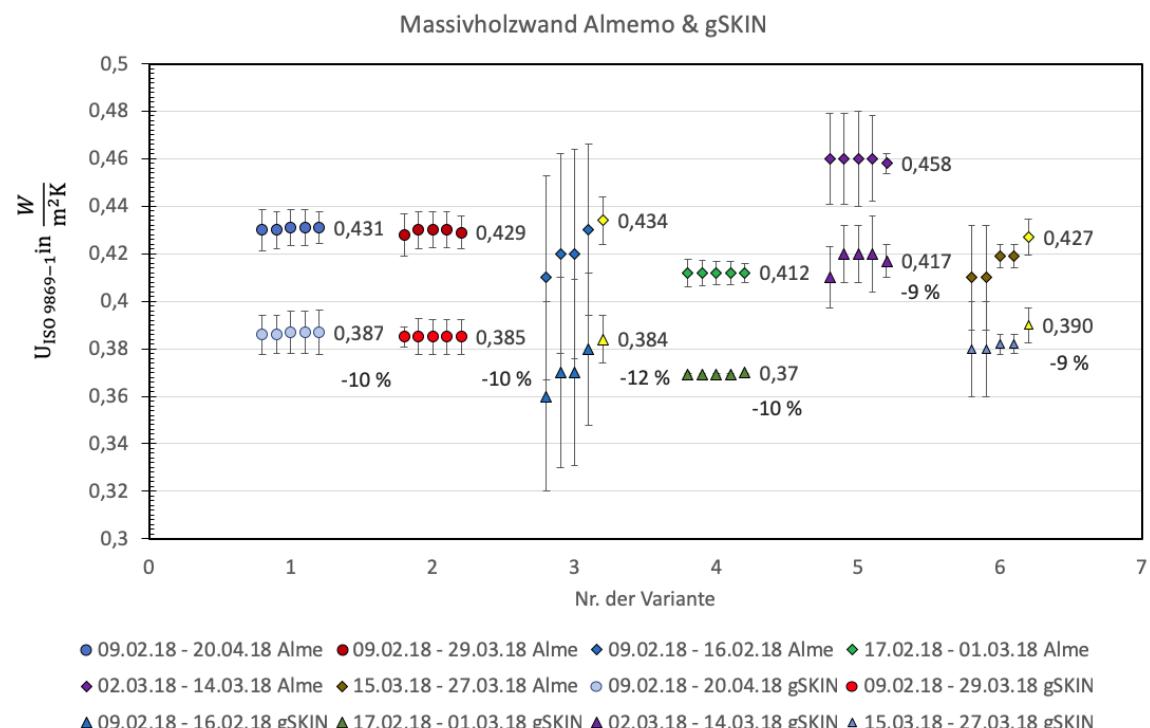


Abbildung 35: Zusammenstellung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der Massivholzwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte (obere Werte Almemo, untere Werte gSkin). Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar. Die Prozentzahlen geben die prozentuale Abweichung des Mittelwerts des Wärmedurchgangskoeffizienten des gSKIN-Messgeräts vom Almemo-Messgerät an.

Abbildung 35 zeigt zunächst, dass die Messgeräte bei allen Messdauern unterschiedliche Messwerte ergeben. Die Messwerte unterscheiden sich signifikant voneinander, d. h. der Abstand zwischen den Messwerten ist wesentlich grösser als das 95 % Vertrauensintervall der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten. Berechnet man die prozentuale Abweichung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten des gSKIN Messgeräts von dem Mittelwert des Wärmedurchgangskoeffizienten des Almemo Messgerätes, so ergeben sich Abweichungen zwischen -9 % und -12 % für die verschiedenen Messdauern.

Die Anwendung der Auswahlkriterien nach ISO 9869-1 verändern die Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten bei allen Messperioden nur geringfügig. Eine Ausnahme bildet hier die Messperiode mit nur 7.3 Tagen der Variante 3: hier sind grössere Änderungen der Mittelwerte bei Anwendung der verschiedenen Auswahlkriterien festzustellen. Allerdings sind bei dieser kurzen Messdauer auch vergleichsweise hohe Fehler der Mittelwerte festzustellen.

Vergleicht man die drei Messperioden mit jeweils 13 Tagen Länge der Varianten 4 bis 6, so stellt man auch hier eine grosse Schwankung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten fest. Diese Schwankung ist wesentlich grösser als das 95 % Vertrauensintervall der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Messungen. Eine Ursache für diese unterschiedlichen Werte konnte nicht eindeutig identifiziert werden. Insbesondere konnte keine Randbedingung festgestellt werden, die für diese Veränderung des Mittelwerts des Wärmedurchgangskoeffizienten massgeblich wäre. Die grossen Fehler der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der kurzen Messperiode von 7.3 Tagen der Variante 3 sind ein Indiz dafür, dass die Messdauer noch nicht ausreichend hoch ist, um eine genaue Messung durchzuführen.

Mit dem Almemo Messgerät ist es möglich, die raumseitige und die aussenseitige Oberflächentemperatur der Wand zu bestimmen. Damit kann der Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils ermittelt werden. Abbildung 36 zeigt eine Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869 -1 für verschiedene Messdauern (Variante 1 bis Variante 6). Zunächst fällt auf, dass sich die Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach Anwendung aller vier Auswahlkriterien nach ISO 9869-1 für die verschiedenen Messdauern wesentlich weniger unterscheiden, als dies bei den Mittelwerten des Wärmedurchgangskoeffizienten der Fall ist. Allerdings ergeben sich für die verschiedenen Messdauern sehr unterschiedlich grosse 95%-Vertrauensintervalle.

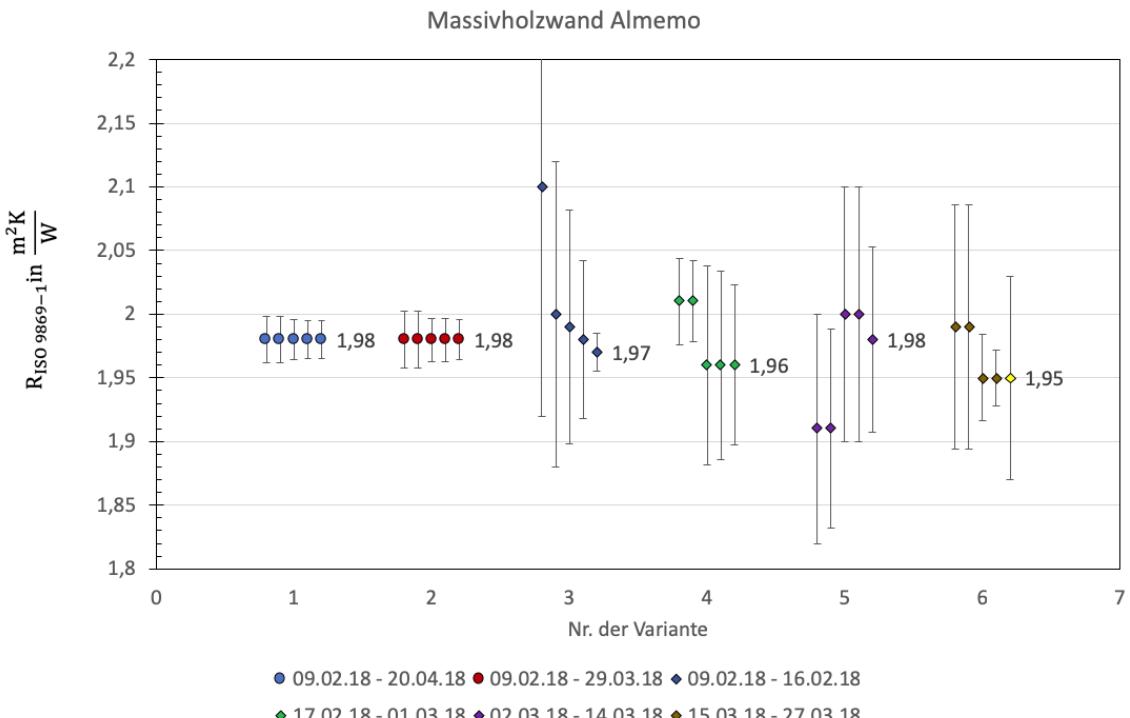


Abbildung 36 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869-1 der Massivholzwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte. Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar.

Durch Kombination der raumseitige Oberflächentemperatur und der auf der Raumseite gemessenen Wärmestromdichte kann auch der innere Wärmeübergangswiderstand mit dem Almemo-Messgerät bestimmt werden. Abbildung 37 zeigt, dass sich auch die inneren Wärmeübergangswiderstände nur gering unterscheiden. Ausnahme ist die Variante 5 mit einer Zeitdauer von 13 Tagen. Hier wird ein signifikant höherer Wert als Mittelwert des inneren Wärmeübergangswiderstands bestimmt.

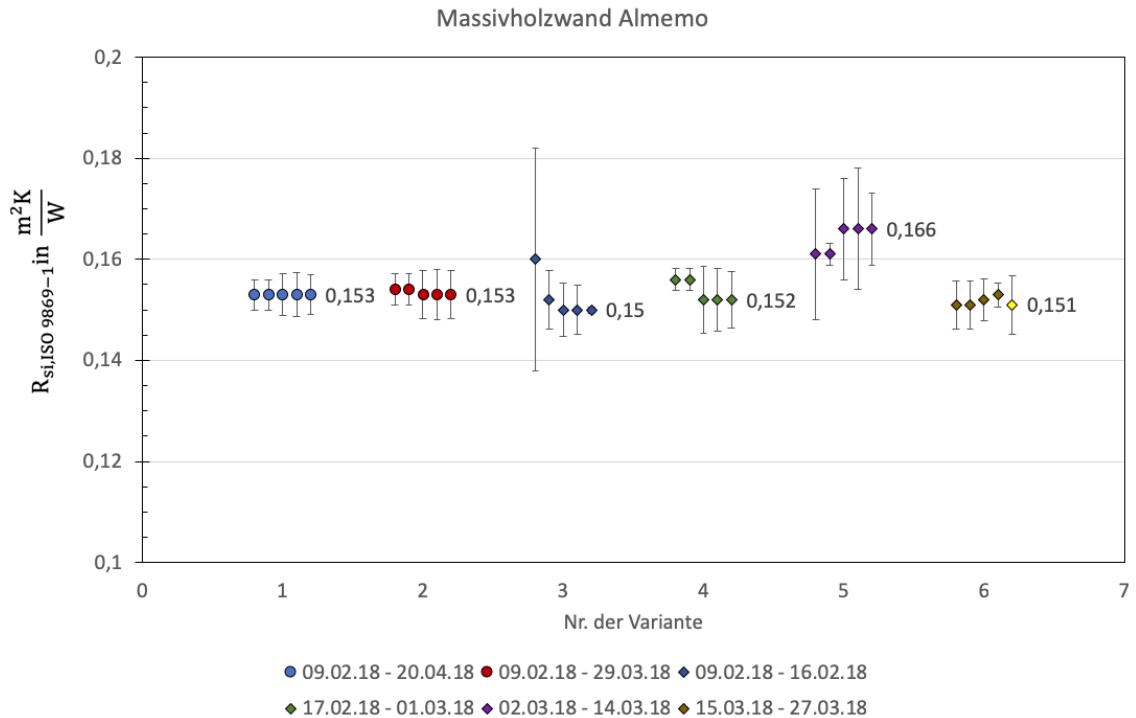


Abbildung 37 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869-1 der Massivholzwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte. Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller vier Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar.

7.1.2 Holzrahmenwand

Die Ergebnisse für den Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der Holzrahmenwand sind für alle Varianten der Messdauern und für beide Messgeräte in Abbildung 38 dargestellt. Für jede Variante wird der Wärmedurchgangskoeffizient ohne Auswahlkriterium, bei Anwendung des 1. Auswahlkriteriums, bis zur Anwendung aller 4 Auswahlkriterien dargestellt. Falls es nicht möglich ist, den Mittelpunkt der Verteilung durch das Anpassen einer Gauß-Verteilung zu bestimmen, wird der letzte Mittelwert des Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 verwandt. Diese Werte werden dann gelb markiert.

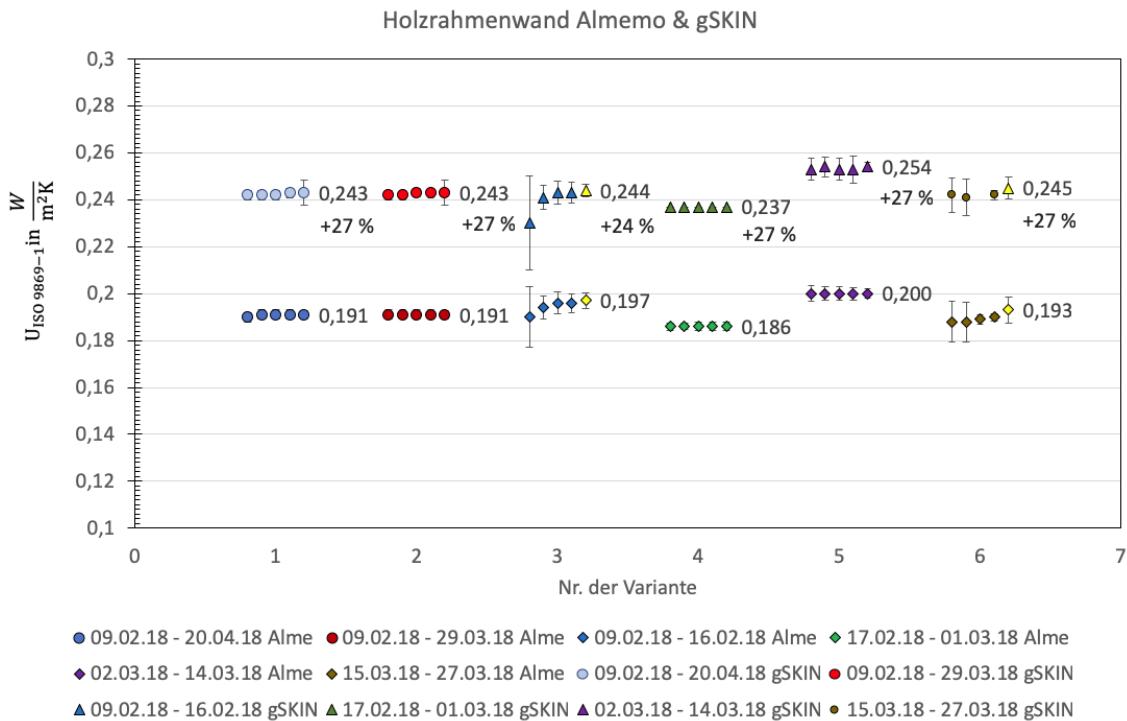


Abbildung 38: Zusammenstellung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der Holzrahmenwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte (obere Werte gSKIN, untere Werte Almemo). Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar. Die Prozentzahlen geben die prozentuale Abweichung des Mittelwerts des Wärmedurchgangskoeffizienten des gSKIN-Messgeräts vom Almemo-Messgerät an.

Abbildung 38 zeigt wiederum, dass die Messgeräte bei allen Messdauern unterschiedliche Messwerte ergeben. Die Messwerte unterscheiden sich signifikant voneinander, d. h. der Abstand zwischen den Messwerten ist wesentlich grösser als das 95 % Vertrauensintervall der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten. Allerdings liefert bei dieser Wand das gSKIN Messgerät wesentlich grössere Werte als das Almemo Messgerät. Berechnet man sich die prozentuale Abweichung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten des gSKIN Messgeräts von dem Mittelwert des Wärmedurchgangskoeffizienten des Almemo Messgerätes aus, so ergeben sich prozentuale Abweichungen zwischen +24 % und +27 % für die verschiedenen Messdauern.

Die Anwendung der Auswahlkriterien nach ISO 9869-1 verändern auch bei diesem Versuch die Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten bei allen Messperioden nur geringfügig. Eine Ausnahme bildet hier wiederum die Messperiode mit nur 7.3 Tagen der Variante 3: hier sind grössere Änderungen der Mittelwerte bei Anwendung der verschiedenen Auswahlkriterien nach ISO 9869-1 festzustellen. Allerdings sind bei dieser kurzen Messdauer auch vergleichsweise hohe Fehler der Mittelwerte vorhanden.

Vergleicht man die drei Messperioden mit jeweils 13 Tagen Länge der Varianten 4 bis 6, so stellt man auch hier eine grosse Schwankung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten fest. Diese Schwankung ist wesentlich grösser als das 95 % Vertrauensintervall der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Messungen. Eine Ursache für diese unterschiedlichen Werte konnte auch hier nicht eindeutig identifiziert werden. Insbesondere

konnte keine Randbedingung festgestellt werden, die für diese Veränderung des Mittelwerts des Wärmedurchgangskoeffizienten massgeblich wäre.

Die grossen Fehler der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der kurzen Messperiode von 7.3 Tagen der Variante 3 sind ein Indiz dafür, dass die Messdauer noch nicht ausreichend hoch ist, um eine genaue Messung durchzuführen.

Mit dem Almemo Messgerät ist es wiederum möglich, die raumseitige und die aussenseitige Oberflächentemperatur der Wand zu bestimmen. Damit kann der Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils ermittelt werden. Abbildung 36 zeigt eine Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869-1 der Holzrahmenwand für verschiedene Messdauern (Variante 1 bis Variante 6).

Zunächst fällt auf, dass die Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach Anwendung aller vier Auswahlkriterien nach ISO 9869-1 für die verschiedenen Messdauern sich signifikant unterscheiden. Dies ist ein Unterschied zur Messung der Massivholzwand.

Allerdings ergeben sich für die verschiedenen Messdauern sehr unterschiedlich grosse 95 %-Vertrauensintervalle.

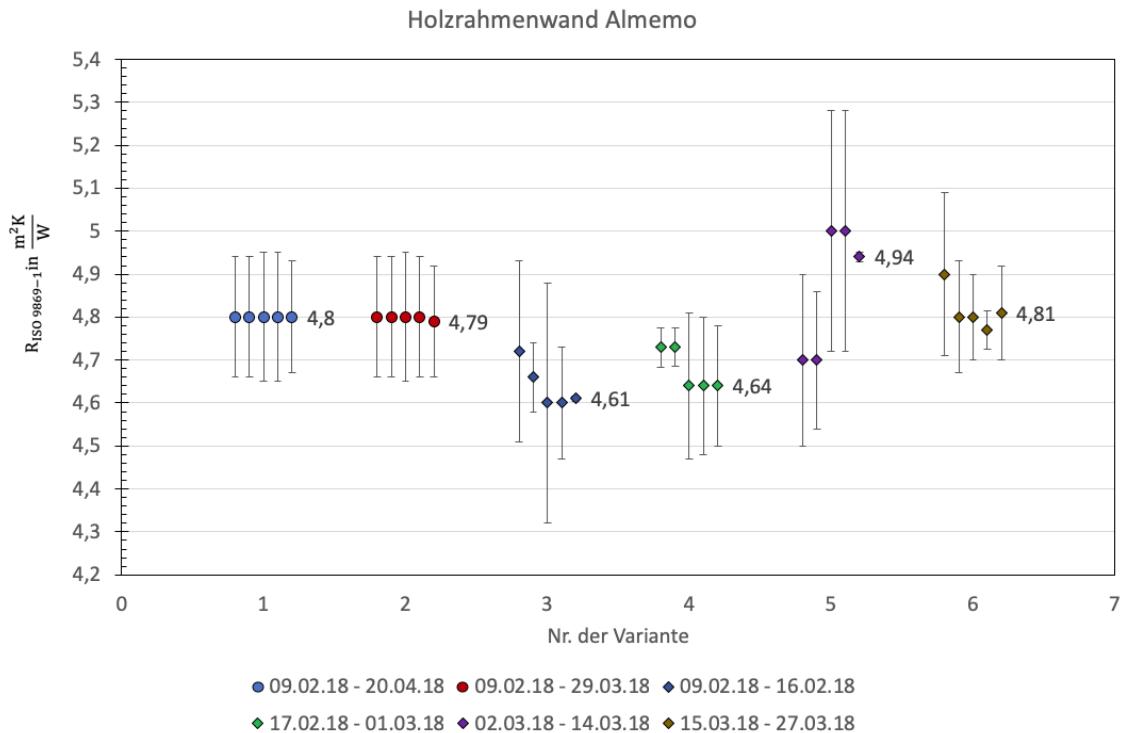


Abbildung 39 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869-1 der Holzrahmenwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte. Die Zahl neben den Wertemarkierungen gibt den Mittelwert nach Anwendung aller Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar.

Durch Kombination der raumseitige Oberflächentemperatur und der auf der Raumseite gemessenen Wärmestromdichte kann auch der innere Wärmeübergangswiderstand der Holzrahmenwand mit dem Almemo Messgerät bestimmt werden. Abbildung 40 zeigt, dass sich die inneren Wärmeübergangswiderstände nur gering unterscheiden. Ausnahme bilden allerdings die letzten beiden Messungen der Varianten 5 und 6 mit einer Zeitdauer von 13 Tagen. Hier werden signifikant höhere Werte als Mittelwert des inneren Wärmeübergangswiderstands bestimmt.

Erstaunlich ist auch, dass die Mittelwerte des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands dieser Messung signifikant höher sind, als die der Massivholzwand.

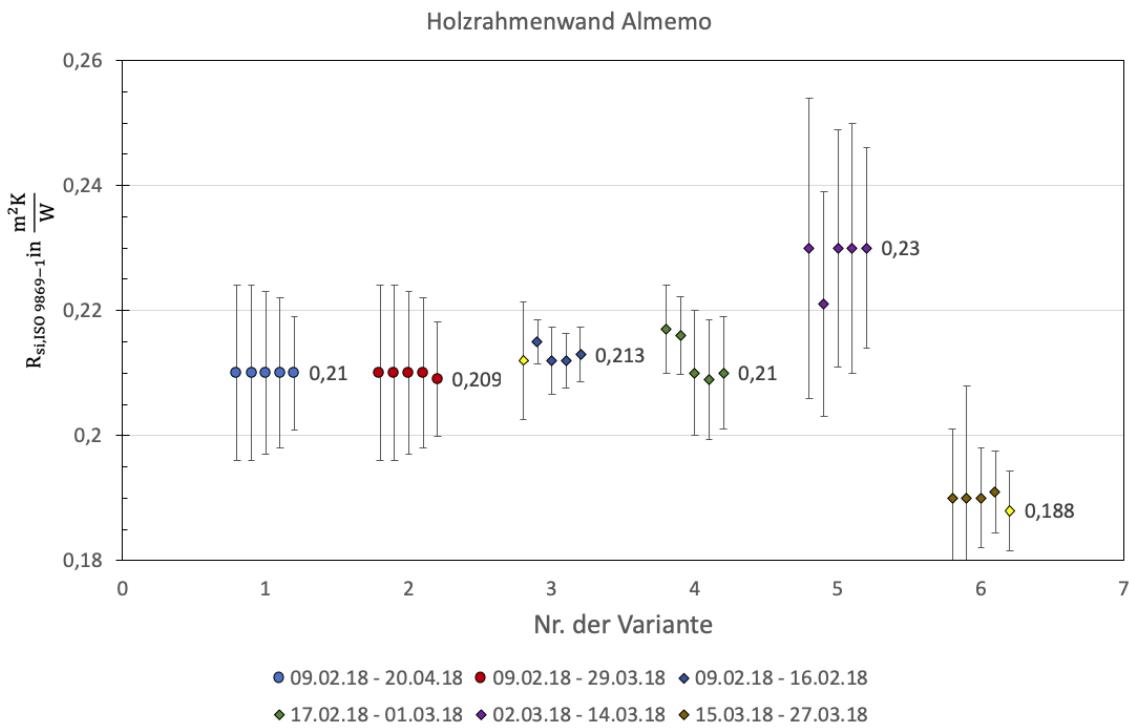


Abbildung 40 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869-1 der Massivholzwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte. Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller vier Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar.

7.2 Labormessungen

7.2.1 Hotboxmessungen

Aus Tabelle 10 in Abschnitt 6.3.1 ist ersichtlich, dass die in der Hotbox gemessenen U-Werte der Massivholzwand im Bereich von 0.52 bis 0.55 W/m²K liegen, wobei die Messabweichung der Einzelmessungen zwischen 4 % und 10 % liegt (vgl. Abschnitt 6.3.1, Tabelle 10). Die Einzelmessungen der verschiedenen Mitteltemperaturen stimmen innerhalb der Messunsicherheit mit dem theoretisch berechneten U-Wert des Wandbauteils von 0.53 W/m²K überein (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Der niedrigste gemessene U-Wert der Holzrahmenwand in der Hotbox liegt bei 0.29 W/m²K mit einer Messabweichung von 0.03 W/m²K oder anders ausgedrückt 10 %. Der höchste gemessene U-Wert der Holzrahmenwand in der Hotbox liegt bei 0.34 W/m²K mit einer Messabweichung von 0.03 W/m²K oder 8 %. Damit weisen die Hotboxmessungen der Holzrahmenwand eine höhere Streuung auf als die Hotboxmessungen der Massivholzwand (vgl. Abschnitt 6.3.1, Tabelle 10).

Vergleicht man diese Resultate mit dem theoretisch berechneten U-Wert des Wandbauteils von 0.28 W/m²K (vgl. Abschnitt 3.2.2), so liegt dieser tiefer als die gemessenen U-Werte. Die Einzelmessungen der verschiedenen Mitteltemperaturen stimmen mit einer Ausnahme jedoch innerhalb der Messunsicherheit mit dem theoretisch berechneten U-Wert des Wandbauteils überein (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Ein Grund für die relativ grosse Streuung der Hotbox-Messwerte der Holzrahmenwand kann sein, dass die Hotbox üblicherweise für Bauteile (Fenster) mit höheren U-Werten im Bereich von 1.0 W/m²K verwendet wird und somit auch für diese kalibriert ist. Bei den deutlich niedrigeren U-Werten der Holzrahmenwand kommt die Hotbox an ihre Regelgrenzen, was die Messgenauigkeit und die Stabilität reduziert. Aufgrund der noch sehr warmen Außenlufttemperaturen tags und einer deutlichen Abkühlung nachts, schwankten die Raumtemperaturen der Prüföhle relativ stark. Dies erschwerte das Einstellen von stabilen Randbedingungen während der Hotboxmessungen.

7.2.2 In-Situ-Messgeräte

Da es sich bei der Massivholzwand um ein homogenes Bauteil handelt, ist ein Vergleich der Messergebnisse der In-Situ-Messgeräte mit den Resultaten der Hotbox-Messung möglich.

Es zeigt sich, dass die mittleren U-Werte der Hotbox innerhalb der Fehlergrenzen mit den mittleren U-Werten der In-Situ-Messgeräte übereinstimmen (vgl. Tabelle 11, Abschnitt 6.3.2.1.2). Dies liegt zum Teil an der im Vergleich zu den In-Situ-Messgeräten höheren Messunsicherheit der Hotbox-Messungen. Ein Vergleich der mittleren U-Werte der In-Situ-Messgeräte untereinander zeigt, dass diese bei zwei von drei Mitteltemperaturen nicht innerhalb der Messunsicherheit übereinstimmen. Bei der Mitteltemperatur von 5°C stimmen die Messergebnisse der In-Situ-Messgeräte untereinander sowie mit der Hotboxmessung sehr gut überein.

Prinzipiell könnte ein Grund für die abweichenden Messergebnisse der In-Situ-Messgeräte untereinander eine ungenügende Haftung der Wärmeflussplatten auf der Prüfkörperoberfläche sein. Da keine Wärmeleitpaste verwendet wurde, sind Lufthohlräume unter den Platten nicht auszuschliessen. Die Position der Wärmeflussplatten wurden zwischen den einzelnen Messungen jedoch nicht geändert. Daher fehlt bei diesem Erklärungsversuch eine Begründung für die gute Übereinstimmung der Ergebnisse bei der Mitteltemperatur von 5°C.

Bei der Holzrahmenwand werden die mit den In-Situ-Messgeräten aufgezeichneten Messwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten mit dem Rechenwert des Gefaches des Wärmedurchgangskoeffizienten verglichen, der bei 0.24 W/m²K liegt (vgl. Tabelle 13, Abschnitt 6.3.2.2.4).

Die gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten weichen grösstenteils signifikant vom Rechenwert ab. Zudem gibt es signifikante Abweichungen zwischen den drei In-Situ-Messgeräten Almemo «B», gSkin «A» und gSkin «B». Nur durch den Einsatz von Wärmeleitpaste kann eine hohe Übereinstimmung der Messgeräte untereinander sowie mit dem Rechenwert erzielt werden.

7.3 Vergleich der Ergebnisse In-Situ-Messungen zu Hotboxmessungen

Zunächst werden für die Massivholzwand die Rechenwerte, die Hotbox Messwerte und die In-Situ-Messwerten (nach Variante 1, Abschnitt 7.1) für die Wärmedurchgangskoeffizienten verglichen. Abbildung 41 fasst diese Werte in einem Diagramm zusammen.

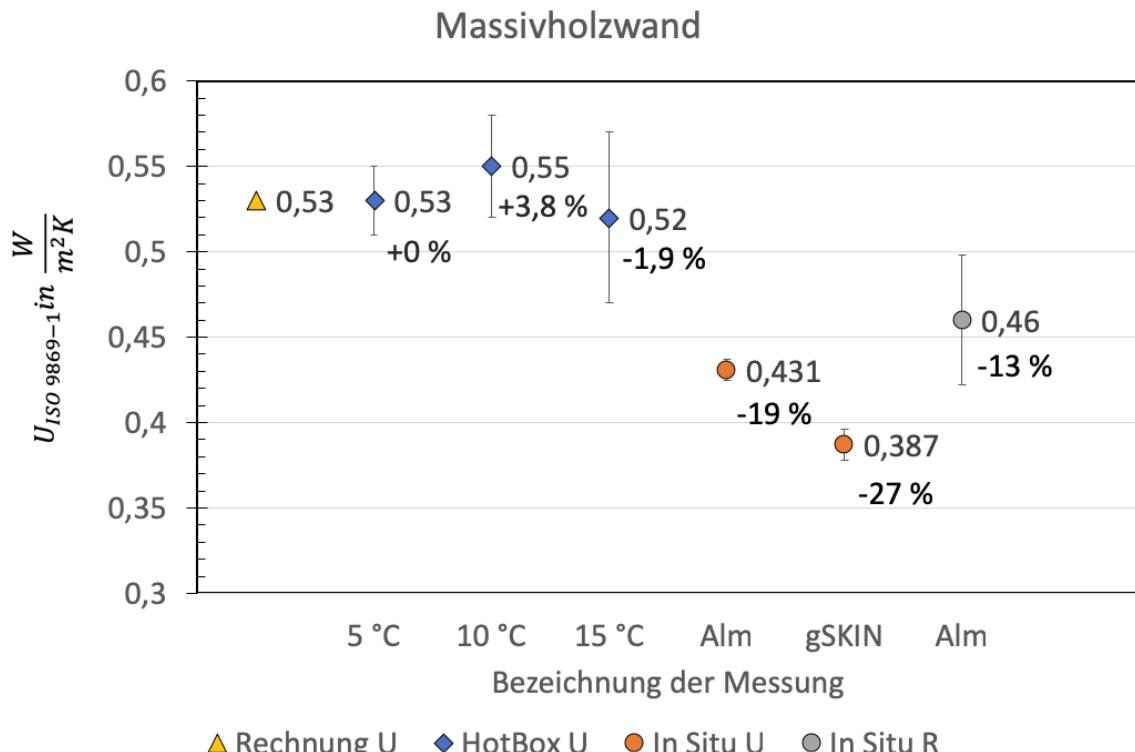


Abbildung 41 : Vergleich des Rechenwerts, des Labormesswerts aus der Hotbox Messung und der In-Situ- Messungen für den Wärmedurchgangskoeffizienten der Massivholzwand. Die Prozentzahlen geben die Abweichung des jeweiligen Messwertes relativ zum Rechenwert an.

Die Abbildung 41 zeigt, dass die Messwerte der Hotbox innerhalb der 95 % Vertrauensintervalle mit dem Rechenwert übereinstimmen. Diese Aussage gilt für alle drei untersuchten Mitteltemperaturen von 5 °C, 10 °C und 15 °C. Die In-Situ-Messwerte unterscheiden sich dagegen signifikant von dem Rechenwert mit einer Abweichung von -19 % für das Almemo Messgerät und einer Abweichung von -27 % für das gSKIN Messgerät, bezogen auf den Rechenwert. Damit kann mit der Mittelungsmethode nach ISO 9869 -1 weder der Rechenwert nach EN ISO 6949 noch der Messwert aus der Hotbox Messung erreicht werden. Die Abweichungen sind auch signifikant grösser als 95 % Vertrauensintervalle der In-Situ- Messung.

Berechnet man aus dem Messwert für den Wärmedurchlasswiderstand der Massivholzwand einen Norm-Wärmedurchgangskoeffizienten, also mit einem inneren Wärmeübergangswiderstand von 0.17 m² K/W und einem äusseren Wärmeübergangswiderstand von 0.04 m² K/W, so ergibt sich ein höherer Messwert, der sich zumindest vom Labormesswert bei einer Bauteil-Mittentemperatur von 15 °C nicht mehr signifikant unterscheidet.

Dies ist ein Hinweis darauf, dass sich während der In-Situ--Messung die inneren und die äusseren Wärmeübergangswiderstände von den oben aufgeführten Normwerten deutlich unterschieden. Durch die Messung des Wärmedurchlasswiderstands kann demnach der Einfluss der abweichenden Wärmeübergangswiderstände auf die Messung reduziert werden.

Der noch verbleibende Unterschied zwischen In-Situ--Messwert und den Labormesswerten der Hotbox ist vermutlich auf die zeitlich stark variierenden Temperaturrandbedingungen und die hierdurch ausgelöste Verfälschung der Messung durch Wärmeströme in und aus der Wärmekapazität des Bauteils zurückzuführen. Allerdings konnten hierfür noch keine genauen Zusammenhänge aus den Messungen abgeleitet werden. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Für die Holzrahmenwand kann der Labormesswert aus der Hotbox leider nicht direkt mit den In-Situ-Messwerten verglichen werden, da die Hotbox nur den Wärmedurchgangskoeffizienten des zusammengesetzten Bauteils messen kann, während die In-Situ-Messgeräte nur den Wärmedurchgangskoeffizienten des Gefachs messen. Allerdings können die Messwerte der Hotbox für das gesamte Bauteil mit dem Rechenwert für das gesamte Bauteil verglichen werden. Dieser Vergleich wird in Abbildung durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass die Hotbox-Messung je nach Mitteltemperatur um 7 % bis 21 % höhere Werte als der Rechenwert ergibt. Dies bedeutet, dass die thermischen Eigenschaften der Holzrahmenbauwand etwas schlechter sind, als die in der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten angenommenen Normwerte.

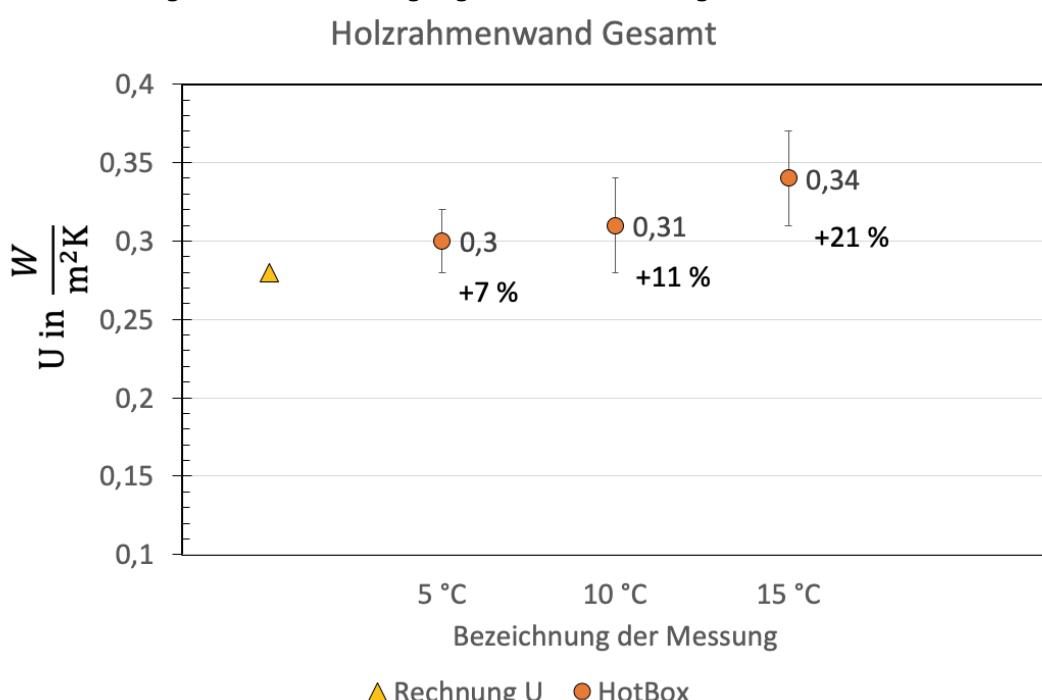


Abbildung 42 : Vergleich des Rechenwertes und der Messwerte der Hotbox bei drei Mitteltemperaturen für die Holzrahmenwand. Die Prozentzahlen geben die Abweichung der Messwerte zum Rechenwert an.

Daher wird in Abbildung 43 nur ein Vergleich zwischen dem Rechenwert und den In-Situ-Messwerten (nach Variante 1, Abschnitt 7.1) des Wärmedurchgangskoeffizienten des Gefachs durchgeführt.

Bei dieser Messung ergibt das gSKIN Messgerät überraschenderweise einen höheren Messwert für den Wärmedurchgangskoeffizienten im Vergleich zum Almemo Messgerät. Der Wärmedurchgangskoeffizient des gSKIN Messgerätes stimmt mit dem Rechenwert des Gefachs überein. Dagegen weicht der Messwert des Wärmedurchgangskoeffizienten des Almemo Messgerätes um 20 % nach unten ab. Auch der aus der Messung des Wärmedurchlasswiderstands mit dem Almemo Messgerät abgeleitete Norm-Wärmedurchgangskoeffizient ergibt nur einen Wert von 0,201 W/(m²K) und damit einen um 16 % zu niedrigen Wert. Hierbei handelt es sich um eine signifikante Abweichung, die wesentlich grösser ist als das 95 % Vertrauensintervall.

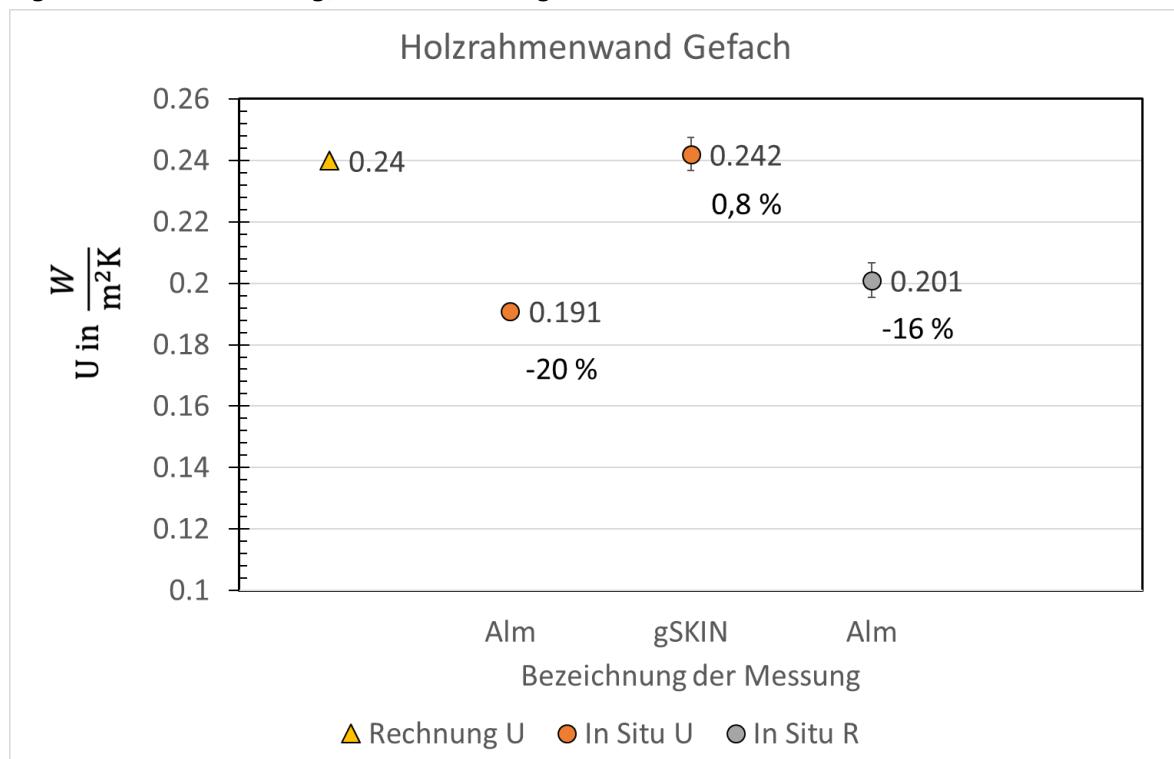


Abbildung 43 : Vergleich des Rechenwerts und der In-Situ- Messungen für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand. Die Prozentzahlen geben die Abweichung des jeweiligen Messwertes relativ zum Rechenwert an.

Da bei der Holzrahmenwand nur Laborwerte für den Wärmedurchgangskoeffizienten des gesamten Bauteils bestimmt werden konnten und diese Laborwerte höher sind, als die Rechenwerte, ist es unwahrscheinlich, dass die zu kleinen Messwerte der In-Situ- Messgeräte auf eine Abweichung der Materialeigenschaften zurückzuführen sind. Trotzdem sollten bei zukünftigen Vergleichen zwischen Labor- und In-Situ- Messungen zusätzliche Messungen im Plattenmessgerät zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten des Gefachs erfolgen.

Es kann aufgrund der bisher durchgeföhrten Messungen nicht verstanden werden, warum die In-Situ- Messgeräte solch unterschiedlichen Messwerten liefern.

Ergänzende Messungen in der Hotbox haben ergeben, dass bei unterschiedlichen Mitteltemperaturen Abweichungen von bis zu 33 % zwischen den Messwerten der In-Situ- Messgeräte liegen. Die verschiedenen Wärmestromplatten ergaben erst dann praktisch identische Messwerte, wenn die Wärmestromplatten mit Wärmeleitpaste mit dem Bauteil verbunden wurden. Da es sich bei den untersuchten Holzbauteilen um Bauteile mit einer vergleichsweise glatten Oberfläche handelt, muss dieser Effekt bei weiteren Messungen beachtet und näher untersucht werden. Dies gilt insbesondere für geputzte Wände mit rauen Putzen, wo durch die rauen Oberflächen noch grössere Effekte erwartet werden. Allerdings ist die Anwendung von Wärmeleitpasten in bewohnten Gebäuden als problematisch anzusehen, da die meisten Wärmeleitpasten nur schwer zu entfernende Flecken hinterlassen. Auch hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Schliesslich ist darauf hinzuweisen, dass die Aussenlufttemperatursensor in einem Wetter- und Strahlungsschutz untergebracht werden muss, wie er in der Meteorologie üblich ist. Andernfalls besteht ein hohes Risiko der Verfälschung der Messwerte der Aussenlufttemperatur.

Handelsübliche Messgeräte für die Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten verfügen nach unserer Kenntnis nicht über solch ein Wetterschutzgehäuse.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass die bisherigen handelsüblichen In-Situ-Messgeräte teilweise signifikant abweichende Messwerte für den Wärmedurchgangskoeffizienten ergeben.

Die Gründe für diese Abweichungen können von den Normwerten abweichenden Wärmeübergangswiderstände bei den In-Situ-Messungen, oder Verfälschungen der Messwerte durch Speichereffekte der Bauteile in Verbindung mit den zeitlich variierenden Temperaturrandbedingungen sein. Mit dem Mittelungsverfahren der ISO 9869 - 1 kann der Einfluss dieser Effekte auf die Messwerte offensichtlich nicht ausreichend kompensiert werden. Hier muss ein Verfahren gefunden werden, mit dem die Speichereffekte besser quantifiziert und korrigiert werden können.

Der Befestigung der Wärmestromplatten muss eine hohe Aufmerksamkeit geschenkt werden. Hier ist die Entwicklung von Wärmeleitpasten, welche keine Flecken auf dem Bauteilloberflächen hinterlassen von zentraler Bedeutung. Auch hier besteht Forschungsbedarf.

Es wird daher vorgeschlagen, dass In-Situ- Messverfahren von der Messung der Wärmedurchgangskoeffizienten auf die Messung von Wärmedurchlasswiderstands umzustellen, um den Einfluss der Wärmeübergangswiderstände auf der Aussen- und auf der Innenseite des Bauteils zu reduzieren.

Darüber hinaus müssen bei zukünftigen Experimenten die kapazitiven Wärmeströme, also die Wärmeströme, welche in das Bauteil und aus dem Bauteil fliessen, besser erfasst werden. Daher sollten bei zukünftigen Experimenten zwei Wärmestromplatten, eine auf der Innen- und eine auf der Aussenseite des Bauteils, verwendet werden.

Damit sollte es auch möglich sein, den äusseren Wärmeübergangswiderstand am Bauteil exakter zu messen.

Zur Reduktion von Strahlungseffekten müssen die Bauteile gegebenenfalls aussen mit einer Strahlungsabschirmung versehen werden. Auch die Effektivität solcher Lösungen ist in weiteren Experimenten zu untersuchen.

8 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.

8.1 Umfang des Berichts

Dieser Bericht besteht aus 81 Seiten inkl. Anhang.

9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Links: Schematische Zeichnung der untersuchten Massivholzelemente bestehend aus fünf Lagen Fichtenholz, verbunden mit Buchenholzdübeln. Zwischen den sägerauen Holzlagen befinden sich ca. 1 mm starke Luftspalte. In der Mitte und an der Aussenseite des Bauteils sind Winddichtungsbahnen angebracht. Rechts: Fotografie Prüfkörper.	7
Abbildung 2 : Links: Schematische Zeichnung der untersuchten Holzrahmenwand bestehend aus Unterdachfolie, Holzfaserdämmung Gefach mit Dämmung und einer OSB-Platte. Rechts: Fotografie Prüfkörper vor der Befestigung der Unterdachfolie.	9
Abbildung 3 : Aufnahme des Messsystems «gSKIN®» der Firma greenTEG AG, bestehend aus einer abnehmbaren Wärmeflussplatte (grau), zwei Temperatursensoren (weiss) verbunden mit einem Datenlogger (blau) sowie einem USB-Auslesekabel (schwarz).	17
Abbildung 4 : Beispielhafte Aufnahme des Messsystems «Almemo®» der Firma Ahlborn GmbH, bestehend aus einer Wärmeflussplatte (grau), vier Temperatursensoren (braun), einem Datenlogger (grau) mit Netzgerät (schwarz) sowie einem USB-Auslesekabel (schwarz).	18
Abbildung 5 : Ansicht des geregelten Heizkastens im Labor der BFH AHB. Die linke Kammer stellt die Kaltseite dar, die rechte Kammer die Warmseite. Zwischen den zwei Kammern steht ein auf Rollen verfahrbarer Prüfrahmen.	19
Abbildung 6 : Schema Messprinzip geregelter Heizkasten zur Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand (Quelle: Taurus Instruments AG mit eigenen Ergänzungen).	20
Abbildung 7: Links: Luftaufnahme des Produktionsgeländes der Firma Nägeli (Quelle: Google Earth). Die Fassade, in der die Prüfelemente eingebaut werden, ist mit einem roten Pfeil gekennzeichnet. Rechts: Ansicht der Testfassade mit Prüfelementen, eingebaut in Fensteröffnungen.	22
Abbildung 8 : Linkes Bild: Ansicht der Prüfkörper von innen. Auf der linken Seite die Holzständer- und auf der rechten Seite die Massivholzwand. Rechtes Bild: Ansicht der Prüfkörper von aussen. Auf der linken Seite die Massivholz- und auf der rechten Seite die Holzständerwand.	23
Abbildung 9 : Lage der Wärmeflussplatten sowie Oberflächentemperatursensoren innen an Holzständer- (linkes Bild) sowie Massivholzwand (rechtes Bild).	23
Abbildung 10 : Befestigung der inneren Lufttemperatursensoren an einem Metallwinkel im Abstand von ca. 12 cm vor den Prüfwänden.	24
Abbildung 11 : Linkes Bild: Befestigung der Oberflächentemperatursensoren auf der Aussenseite der Prüfwände. Rechtes Bild: Installation der Aussenlufttemperatursensoren in einem Wetterschutzgehäuse.	24
Abbildung 12: Ansicht der Almemo- (links) sowie gSKIN-Datenlogger (rechts).	25
Abbildung 13: Vergleich der Verteilung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der beiden Messgeräte ohne und mit Berücksichtigung der Kriterien 1 bis 4. Bei der Berechnung der zweiten Histogramme wurden folgende Kriterien eingehalten: Messzeit von mehr als 72 h, Messzeit gleich ganzzahliges Vielfaches eines Tages, relative Änderung des Mittelwertes des Wärmedurchgangskoeffizienten $\leq 5\%$ für 24 h vor Ende der Messung sowie für 2/3 der Messzeit. Dargestellt sind die In-Situ-Messwerte der Massivholzwand.	27
Abbildung 14: Vergleich der Verteilung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der beiden Messgeräte ohne und mit Berücksichtigung der Kriterien 1 bis 4. Bei der Berechnung der zweiten Histogramme wurden folgende Kriterien eingehalten: Messzeit von mehr als 72 h, ganzzahliges Vielfaches eines Tages, relative Änderung des Mittelwertes des Wärmedurchgangskoeffizienten $\leq 5\%$ für 24 h vor Ende der Messzeit sowie für 2/3 der Messzeit. Dargestellt sind die In-Situ-Messwerte der Holzrahmenwand.	30
Abbildung 15 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall des gSkin-Messgerätesatzes «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «A» (in Blau) bei einer	

Mitteltemperatur von 15°C. Stündliche Mittelwerte der Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} aus den Hotbox-Messungen (in Orange). Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt ist der mittlere Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} des Auswertezeitraumes der Hotbox-Messung.	34
Abbildung 16 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 15°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Temperatursensoren (in Blau) auf der Warm- und Kaltseite.	35
Abbildung 17 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall des gSkin-Messgerätesatzes «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «A» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C. Stündliche Mittelwerte der Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} aus den Hotbox-Messungen (in Orange). Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . der mittlere Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} ist auch über den Auswertezeitraum der Hotbox-Messung dargestellt.	36
Abbildung 18 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.	36
Abbildung 19 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall des gSkin-Messgerätesatzes «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «A» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 5°C. Stündliche Mittelwerte der Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} aus den Hotbox-Messungen (in Orange). Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt der mittlere Norm-Wärmeübergangskoeffizienten U_{st} des Auswertezeitraumes der Hotbox-Messung.	37
Abbildung 20 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der gSkin- (in Rot) bzw. der Almemo-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.	37
Abbildung 21 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesätze «B» und «A» (in Rot) und des Almemo-Messgerätesatzes «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 15°C. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie Wärmeströme φ . Auch dargestellt der berechnete Wärmeübergangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach}	39
Abbildung 22 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 15°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.	40
Abbildung 23 : Einzelmessungen der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesatze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C (erster Messdurchlauf). Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt der berechnete Wärmeübergangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach}	41
Abbildung 24 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C (erster Messdurchlauf). Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.	41

Abbildung 25 : Einzelmessungen der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesatze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «AB» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, zweiter Messdurchlauf. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt ist der berechnete Wärmeübergangskoeffizient des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach}	42
Abbildung 26 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, zweiter Messdurchlauf. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.	42
Abbildung 27 : Einzelmessungen der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesatze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «AB» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, dritter Messdurchlauf. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt ist der berechnete Wärmeübergangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach}	43
Abbildung 28 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, dritter Messdurchlauf. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.	43
Abbildung 29 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesatze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, vierter Messdurchlauf. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt ist der berechnete Wärmeübergangskoeffizient des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach}	44
Abbildung 30 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 10°C, vierter Messdurchlauf. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.	44
Abbildung 31 : Zeitlicher Verlauf der U-Werte zum Zeitpunkt t_i im Zehnminuten-Intervall der gSkin-Messgerätesätze «B» und «A» (in Rot) und Almemo-Messgerätesatzes «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 5°C. Die Tabelle zeigt die mittleren U-Werte des Auswertezeitraums, ermittelt aus den arithmetischen Mittelwerten der Lufttemperaturdifferenzen $\Delta\theta$ sowie der Wärmeströme φ . Auch dargestellt der berechnete Wärmeübergangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand U_{Gefach}	45
Abbildung 32 : Verlauf der aufgezeichneten Wärmeströme der gSkin «B»- und gSkin «A»- (in Rot) bzw. der Almemo-Wärmeflussplatte «B» (in Blau) bei einer Mitteltemperatur von 5°C. Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen der der gSkin «B»- und gSkin «A» (in Rot) bzw. der Almemo «B»-Temperatursensoren (in Blau) auf Warm- und Kaltseite.	45
Abbildung 33 : Boxplot der aufgezeichneten Wärmeströme der In-Situ-Messgerätesätze Almemo «B», gSkin «B» und gSkin «A» während der Hotboxmessungen an der Holzrahmenwand. «MT» steht für Mitteltemperatur und «MDL» für Messdurchlauf.	46
Abbildung 34 : Mittelwerte der Wärmestromdichten der drei Messgeräte bei vier verschiedenen Messdurchläufen (MDL) der Mitteltemperatur (MT) von 10°C. Die Messunsicherheit ist als 2 Sigma der Messwerte angegeben.	47
Abbildung 35: Zusammenstellung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der Massivholzwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte (obere Werte Almemo, untere Werte gSkin). Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar. Die Prozentzahlen geben die prozentuale Abweichung des Mittelwerts des Wärmedurchgangskoeffizienten des gSKIN-Messgeräts vom Almemo-Messgerät an.	49

Abbildung 36 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869-1 der Massivholzwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte. Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar.....	50
Abbildung 37 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869-1 der Massivholzwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte. Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller vier Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar.....	51
Abbildung 38: Zusammenstellung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 der Holzrahmenwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte (obere Werte gSkin, untere Werte Almemo). Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar. Die Prozentzahlen geben die prozentuale Abweichung des Mittelwerts des Wärmedurchgangskoeffizienten des gSKIN-Messgeräts vom Almemo-Messgerät an.	52
Abbildung 39 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869-1 der Holzrahmenwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte. Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Mittelwert nach Anwendung aller Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar.....	53
Abbildung 40 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchlasswiderstands nach ISO 9869-1 der Massivholzwand für verschiedene Messzeiträume, Auswahlkriterien und für beide Messgeräte. Die Zahl neben den Wertmarkierungen gibt den Wert nach Anwendung aller vier Auswahlkriterien an. Die Werte, welche mit Gelb markiert sind, stellen den Mittelwert nach ISO 9869-1 am Ende der Messperiode dar.....	54
Abbildung 41 : Vergleich des Rechenwerts, des Labormesswerts aus der Hotbox Messung und der In-Situ- Messungen für den Wärmedurchgangskoeffizienten der Massivholzwand. Die Prozentzahlen geben die Abweichung des jeweiligen Messwertes relativ zum Rechenwert an....	55
Abbildung 42 : Vergleich des Rechenwertes und der Messwerte der Hotbox bei drei Mitteltemperaturen für die Holzrahmenwand. Die Prozentzahlen geben die Abweichung der Messwerte zum Rechenwert an.....	56
Abbildung 43 : Vergleich des Rechenwerts und der In-Situ- Messungen für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Gefachs der Holzrahmenwand. Die Prozentzahlen geben die Abweichung des jeweiligen Messwertes relativ zum Rechenwert an.....	57
Abbildung 44 : Ansicht Prüfkörper Massivholzwand auf der Warm- (links) sowie Kaltseite (rechts) nach Installation der Thermoelemente der Hotbox sowie der Sensoren der In-Situ-Messgeräte..	77
Abbildung 45 : Ansicht Prüfkörper der Holzrahmenwand auf der Warm- (links) sowie Kaltseite (rechts) nach Installation der Thermoelemente der Hotbox sowie der Sensoren der In-Situ-Messgeräte.	77
Abbildung 46 : Befestigung der gSKIN- (links) sowie Almemo-Wärmeflussplatte (rechts) mittels Klebeband auf der Massivholzwand.	78
Abbildung 47 : Befestigung der gSKIN- (links) sowie Almemo-Wärmeflussplatten (rechts) mittels Klebeband auf der Holzständerwand.	78
Abbildung 48 : Befestigung eines Almemo-Oberflächentemperatursensors auf der Warmseite (links) sowie Kaltseite (rechts) der Holzrahmenwand.	79
Abbildung 49 : Links: Positionen der Thermoelemente der Hotbox (Nr. 1 – 9) sowie Lage der Sensoren der In-situ-Messgeräte (Wärmeflussplatten «Almemo A» und «gSKIN A», Oberflächentemperatursensor OFT «Almemo A») an der Massivholzwand auf der Warmseite. Rechts: Positionen der Thermoelemente der Hotbox (Nr. 1 – 9) sowie Lage der Sensoren der In-Situ-Messgeräte (ein OFT «Almemo A») an der Massivholzwand auf der Kaltseite.	79

Abbildung 50 : Links: Positionen der Thermoelemente der Hotbox (Nr. 1 – 9) sowie Lage der Sensoren der In-situ-Messgeräte (Wärmeflussplatten «Almemo B», «gSKIN B» und «gSKIN A», Oberflächentemperatursensor OFT «Almemo B») an der Holzrahmenwand auf der Warmseite. Rechts: Positionen der Thermoelemente der Hotbox (Nr. 1 – 9) sowie Lage der Sensoren der In-Situ-Messgeräte (ein OFT «Almemo B») an der Holzrahmenwand auf der Kaltseite.	80
Abbildung 51 : Befestigung der Lufttemperatursensoren der In-Situ-Messgeräte (linkes Bild Almemo, rechtes Bild gSKIN) an den Strömungsabschirmungen der Lufttemperatursensoren der Hotbox.....	80

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kontaktdaten beteiligter Wirtschaftspartner.	6
Tabelle 2 : Eigenschaften Materialien Massivholzwandsystem. « R », « T » und « L » stehen für radial, tangential und longitudinale Faserrichtung des Holzes.	8
Tabelle 3 : Eigenschaften der Materialien der Holzrahmenwand. « R », « T » und « L » stehen für radial, tangential und longitudinale Faserrichtung des Holzes.	10
Tabelle 4: Flächenbezogene Wärmekapazität des Gefachs der Holzrahmenwand zur Bestimmung der Schwere des Bauteils.	12
Tabelle 5 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten nach ISO 9869-1 unter Berücksichtigung verschiedener Auswahlkriterien. Die Fehler sind als 95 %-Vertrauensintervall angegeben.....	26
Tabelle 6 : Zusammenstellung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten, der Wärmedurchlasswiderstände, der inneren Wärmeübergangswiderstände und der daraus abgeleiteten äusseren Wärmeübergangswiderstände nach ISO 9869-1 unter Berücksichtigung verschiedener Auswahlkriterien. Die Fehler sind als 95 %-Vertrauensintervall angegeben. Die Messwerte stammen vom Almemo-Messgerätesatz, angebracht an der Massivholzwand.....	28
Tabelle 7 : Zusammenstellung der Mittelwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzrahmenwand nach ISO 9869-1 unter Berücksichtigung verschiedener Auswahlkriterien. Die Fehler sind als 95 %-Vertrauensintervall angegeben.	29
Tabelle 8 : Zusammenstellung der Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten, der Wärmedurchlasswiderstände, der inneren Wärmeübergangswiderstände und der daraus abgeleiteten äusseren Wärmeübergangswiderstände nach ISO 9869-1 unter Berücksichtigung verschiedener Auswahlkriterien. Die Fehler sind als 95 %-Vertrauensintervall angegeben. Die Messwerte stammen vom Almemo-Messgerätesatz, angebracht an der Holzrahmenwand.....	31
Tabelle 9: Temperaturrandbedingungen der Messungen der Wärmedurchgangskoeffizienten der Prüfkörper Massivholzwand und Holzrahmenwand.	33
Tabelle 10 : Zusammenfassung der Norm-Wärmedurchgangskoeffizienten U_{st} von Massivholzwand und Holzrahmenwand, jeweils ermittelt bei drei Temperaturrandbedingungen.	33
Tabelle 11 : Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse der Hotbox sowie In-Situ-messgeräte bei drei verschiedenen Mitteltemperaturen an der Massivholzwand. Dargestellt sind die mittleren Temperaturdifferenzen, Wärmeströme und Wärmedurchgangskoeffizienten inklusive Messunsicherheiten (2 Sigma).	38
Tabelle 12 : Übersicht Installationsweise der Wärmeflussplatten. «Richtig» bedeutet Installation gemäss Herstellervorgaben. «Falsch» bedeutet, dass die Unterseite der Wärmeflussplatte nach oben gekehrt ist.	38
Tabelle 13 : Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse der In-Situ-Messgeräte bei verschiedenen Mitteltemperaturen an der Holzrahmenwand. Dargestellt sind die mittleren Temperaturdifferenzen, Wärmeströme und Wärmedurchgangskoeffizienten inklusive Messunsicherheiten (2 Sigma).	48

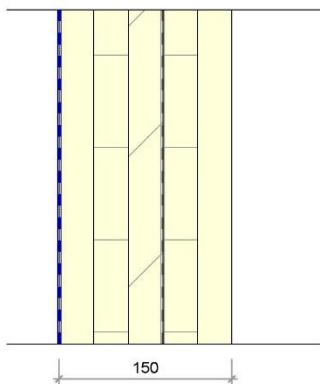
9.3 Literaturverzeichnis

- [1] D. Varesano, R. Camponovo, P. Callinelli, and L. Rinquet, «In-situ measurements of thermal transmittance U - Experience feedback» in 19. Status-Seminar «Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt», 2016, pp. 1-11.
- [2] T. Hoos, A. Merzkirch, S. Maas, F. Scholzen, and D. Waldmann, «Messtechnische Ermittlung der U-Werte von Aussenwänden im Vergleich mit Typologiewerten für den Gebäudebestand», Bauphysik, vol. 37, no. 5, pp. 273-276, 2015.
- [3] S. Wyss and W. Hässig, «Prüfen der U-Werte im GEAK durch Feldmessungen», in 19. Status- Seminar «Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt», 2016, pp. 1-9.
- [4] C. Hoffmann, A. Geissler, and L. Carisch, «Warum stimmt das denn nie? Fragen beim Einsatz der SIA 380/1 als Prognoseinstrument bei Bestandsgebäuden (Wohnen)», in 19. Status-Seminar «Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt», 2016
- [5] L. Durrer, «U-Wert Verifikationsmessungen mit dem gSKIN U-Value Kit von GreenTEC an einem Minergie-zertifiziertem Neubau», ETH Zürich 2014
- [6] SN EN ISO 8990:1996, «Wärmeschutz - Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand - Verfahren mit dem kalibrierten un dem geregelten Heizkasten», Ausgabe 1996.
- [7] EN ISO 12567-1, «Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern und Türen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heizkastenverfahrens – Teil 1: komplette Fenster und Türen», Ausgabe 2010
- [8] S. Egli, B. Egger, «Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Aussenwänden am Objekt», unveröffentlichte Projektarbeit, Biel, 2016
- [9] N. Giordano, «Bruchsteinmauerwerk - Bestandsaufnahme als Grundlage energetischer Sanierungsmöglichkeiten», unveröffentlichte Masterthesis, Biel, 2015
- [10] D. Leubin, T. Bernet, «Vor Ort Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Holzbaukonstruktionen», unveröffentlichte Projektarbeit, Biel, 2018
- [11] W. Sonderegger, S. Hering und P. Niemz, «Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions» Holzforschung, Vol 65, pp. 369-375, 2011.
- [12] M. Fleischmann; «Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines realitätsnahen orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells», Doctoral Thesis; TU Wien; 2005.
- [13] SN EN ISO 6946 – 2018-03, «Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2017», März 2018.
- [14] ISO 9869-1 «Thermal insulation – Building elements In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance», August 2014
- [15] E4tech Software SA, «Lesosai 2017.0 (build 1120)», www.lesosai.com (zuletzt abgerufen am 13.09.2018)
- [16] SN EN ISO 8990:1996, Wärmeschutz - Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand - Verfahren mit dem kalibrierten un dem geregelten Heizkasten.

Anhang A: Beschreibung Prüfelemente

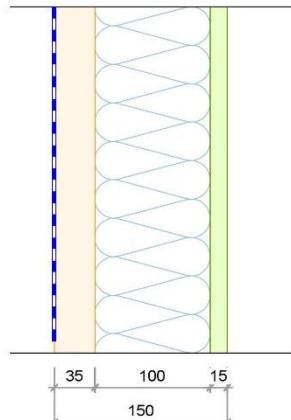
A.1 Produktionspläne der Testelemente

Wandaufbau 1



Schichtaufbau:	Stärke:	Produkt / Typ:	Gewicht:	RF:	Bemerkung:
Unterdachfolie Appenzellerholz sichtbar gebürstet	1 mm 150 mm	Knauf LDS 0.04 A 180 s	0.90 kN/m ²	RF3	-

Wandaufbau 2



Schichtaufbau:	Stärke:	Produkt / Typ:	Gewicht:	RF:	Bemerkung:
Unterdachfolie Holzfaserdämmung	1 mm 35 mm	Knauf LDS 0.04 Pavatex Isolair	0.08 kN/m ²	RF3	-
Ständer 60/120	100 mm	C24	0.17 kN/m ²	RF3	-
Dämmung	100 mm	Knauf Unifit TI 132 U	0.032 kN/m ²	RF1	-
OSB 3	15 mm	-	0.10 kN/m ²	RF3	-

APPENZELLER HOZ
NATÜRLICHER FÜNFBAU VON A-Z

NÄGELI
HOLZ + INNENAUSBAU

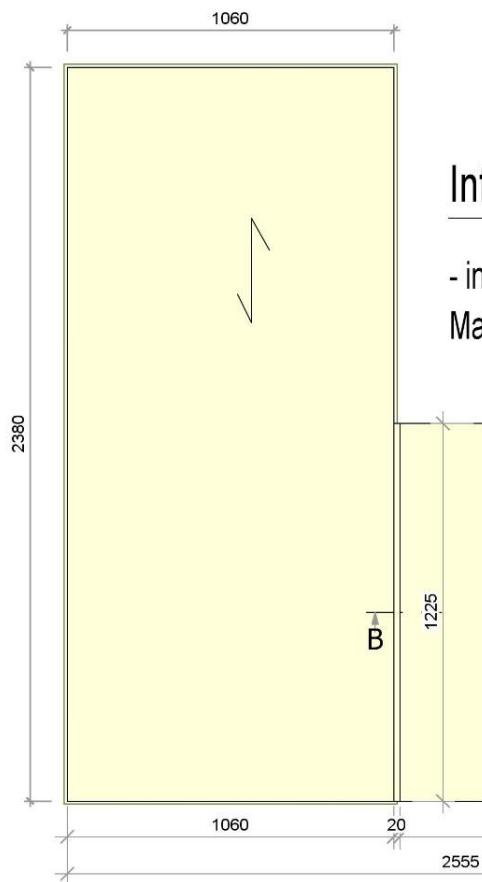
Bauherrschaft: TWOODES
Projekt: FH-Biel U-Wert Messung

1 Testelemente

Massstab: 1:5 Format A4 hoch gez. C.M Datum: 01.01.2017 Druckdatum: 01.02.2018
Dateipfad: F:\AppenzellerHolzVaz_Forschungsprojekte\2017_FH Biel_Vor Ort Wärmemessungen\Nägeli-Forschung 2d

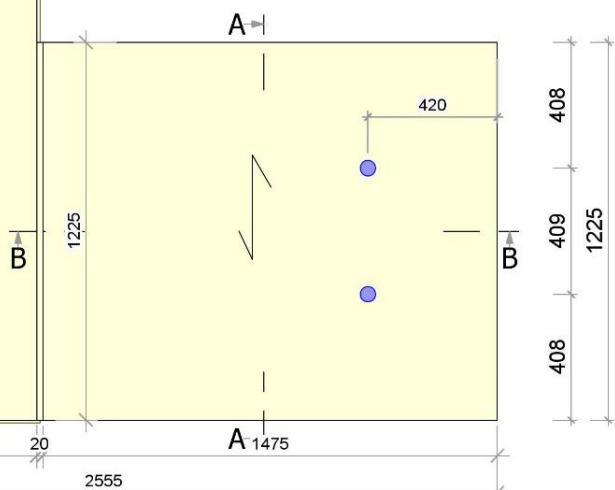
Nägeli AG
Wandaufbau 1

Forschung Biel
Wandaufbau 1



Information

- in die 50mm Löcher müssen die Dübel passen! Kontrollieren!
Maschinendatei in G / Nägeli AG



Schichtaufbau:
Unterdachfolie
Appenzellerholz sichtbar gebürstet

Stärke:
1 mm
180 mm

Produkt / Typ:
Knauf LDS 0.04

Gewicht:
0.90 kN/m²

RF:
RF3

Bemerkung:
-
-

Bauherrschaft: TWOODS
Projekt: FH-Biel U-Wert Messung

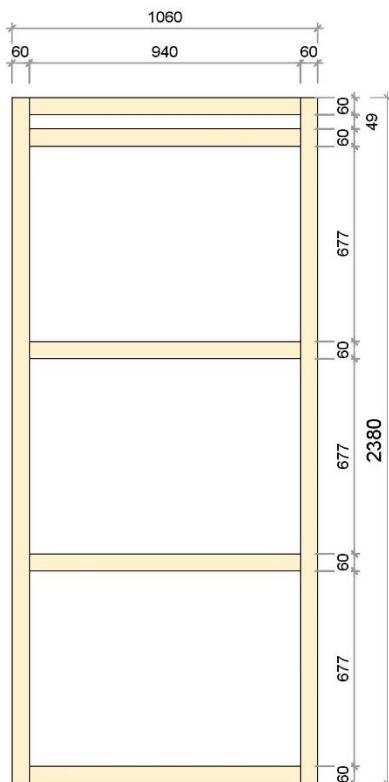
APPENZELLER HOLZ
NATURHOLZ FÜR INNENAUSBAU



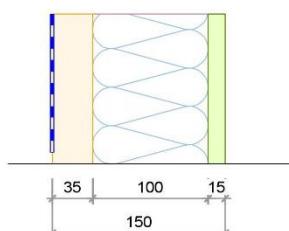
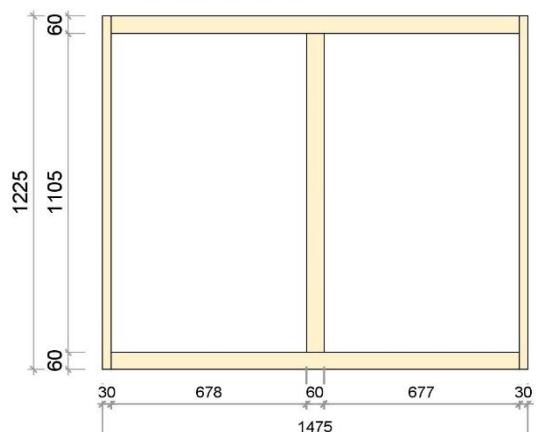
2 Testelemente

Massstab: 1:5 Format: A4 hoch gez. C.M Datum: 01.01.2017 Druckdatum: 01.02.2018
Dateipfad: F:\AppenzellerHolz\AZ_Forschungsprojekte\2017_FH Biel_Vor Ort Wärmemessungen\Nägeli-Forschung.2d

Nägeli AG
Wandaufbau 2



Forschung Biel
Wandaufbau 2



Schichtaufbau:
Unterdachfolie
Holzfaserdämmung
Ständer 60/120
Dämmung
OSB 3

Stärke: Produkt / Typ:
1 mm Knauf LDS 0.04
35 mm Pavatex Isolair
100 mm C24
120 mm Knauf Unifit TI 132 U
15 mm -

Gewicht: RF:
0.08 kN/m² RF3
0.17 kN/m² RF3
0.032 kN/m² RF1
0.10 kN/m² RF3

Bemerkung:

APPENZELLER HOLZ
NATÜRLICHER HOLZBAU VON A-Z

NÄGELI
HOLZ + INNENAUSBAU

Bauherrschaft: TWOODS
Projekt: FH-Biel U-Wert Messung

3 Testelemente

Massstab: 1:5 Format: A4 hoch gez. C.M Datum: 01.01.2017 Druckdatum: 01.02.2018
Dateipfad: F:\AppenzellerHolz\VAZ_Forschungsprojekte\2017_FH Biel_Vor Ort Wärmemessungen\Nägeli-Forschung 2d

Anhang B: Beschreibung Messtechnik

B.1 Datenblatt Messsystem gSKIN®, Fa. greenTEG AG

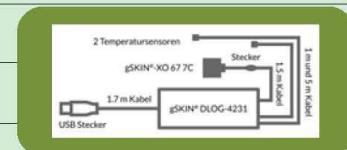
gSKIN® KIT U-Wert Kit

Eigenschaften

- Kalibrierte Plug-&-Play Messlösung
- Messung von U-Werten ($W/(m^2K)$), Wärmefluss (W/m^2), und 2 Temperaturen ($^{\circ}C$)
- Kompatibel mit ISO 9869 und ASTM C1046 / ASTM C1155
- Speichert bis zu 2 Mio. Datenpunkte
- Batterieladung >1 Monat
- Hochsensitive thermische Detektoren
- Integrierte Auslesesoftware
- Kompaktes Design
- USB Schnittstelle



Produktnam	gSKIN® KIT-2615C
Artikelnummer	A-163482
gSKIN® KIT beinhaltet*	Sensor: gSKIN®-XO 67 7C (30mm x 30mm) Logger: DLOG-4231 inkl. 2 Temperatursensoren Software Klebeband
Wärmefluss Messbereich Min / Max [W/m^2]	±200
Wärmefluss Auflösung [W/m^2]	<0.22
Min. Sensor Sensitivität* (S) [$\mu V/(W/m^2)$]	7
Genauigkeit Temperatursensoren [$^{\circ}C$]	±0.5 (-10...+65 $^{\circ}C$) ±2.0 (-55...+125 $^{\circ}C$)
Logger Abmessung (l x w x h) [mm x mm x mm]	52 x 20 x 15
Messfrequenz	1/Sek. bis 1/Std.
Bit Auflösung [bits]	12
Speicherkapazität [Anzahl Messpunkte]	>2'000'000
Batteriekapazität* [Tage]	>30 (aufladbar über USB Kabel)
Computer Schnittstelle	USB
Software	Per email zu beziehen / Download link
Betriebssystem	Windows 2000 / XP / Vista / 7 / 8
Betriebsarten	Live-Anzeige / Speicherung Analysewerte Datenlogger
Temperaturbereich Min/Max [$^{\circ}C$]	-40 / 100 (-20 / 65 für Logger)
Kalibrierungsbereich Temperatur Min/Max [$^{\circ}C$]	-30 / 70
Kalibrierungsgenauigkeit* [±%]	3
Kabellänge Temperatursensor 1 / 2 [m]	5.0 / 1.0
Kabellänge Wärmeflusssensor und Logger [m]	1.0 / 0.5 (mit Stecker)



- * Weitere Details finden Sie auf den individuellen Produktdatenblättern.
- ▷ Sensorkalibrierungsdaten sind bereits auf dem Logger gespeichert für einfache und schnelle Plug-&-Play Messungen.
- ▷ Auf höchster Messfrequenz (2/T).
- ▷ Wärmefluss Messbereich bis +/- 400 [W/m^2] auf Anfrage

Datenblatt v.1.5, © Copyright greenTEG AG, 2014 All Rights Reserved

B.2 Datenblatt Messsystem Almemo, Fa. Ahlborn GmbH

Wärmefluss

Wärmeflussplatten FQAx



- Zur Ermittlung der Wärmestromdichte bis max. 150°C.
- Anwendungsgerechte Bauformen, bestehend aus einem Mäander vieler gegeneinander geschalteter Thermoelemente, eingebettet in ein Trägermaterial.
- Kein seitliches Umlaufen des Wärmeflusses bei dickem Trägermaterial durch ausreichende Mäander-Randzone.
- Software für k-Wert-Messung siehe Kapitel Software.



Jeder Wärmeflussplatte ist ein Kalibrierwert zugeordnet, welcher der Wärmestromdichte in W/m² entspricht, wenn die Platte 1 mV ausgibt. Der Kalibrierwert wird werkseitig im ALMEMO® Stecker hinterlegt, so dass bei ALMEMO® Geräte sofort die aktuelle Wärmestromdichte in W/m² angezeigt wird.

Technische Daten:

Typ	Abmessungen (mm)	Mäandergröße (mm)	Trägermaterial	Temperatur-beständigkeit	Kalibrierwert ca. (W/m ² ≈ 1 mV)	Genauigkeit des Kalibrierwerts
117	100 x 30 x 1,5	80 x 20	Epoxidharz	-40 ... 80°C	< 50	5% bei 23°C
118	120 x 120 x 1,5	90 x 90	Epoxidharz	-40 ... 80°C	< 15	5% bei 23°C
119	250 x 250 x 1,5	180 x 180	Epoxidharz	-40 ... 80°C	< 8	5% bei 23°C
120	33 Ø x 1,5	20 Ø	Epoxidharz	-40 ... 80°C	< 150	6% bei 23°C
117SI	100 x 30 x 3	80 x 20	Silikon	-40 ... 80°C	< 50	5% bei 23°C
118SI	120 x 120 x 3	90 x 90	Silikon	-40 ... 80°C	< 15	5% bei 23°C
150-1	180 x 100 x 0,6	170 x 90	PTFE	150°C	< 80	5% bei 25°C
150-2	500 x 500 x 0,6	490 x 490	PTFE	150°C	< 10	5% bei 25°C

Zubehör

Best. Nr.

Tesa-Fix-Band für Raumtemperatur
Selbstklebefolie 24 x 100 cm für Raumtemperatur

ZQ9017KB
ZQ9017KF

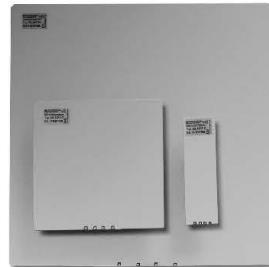
Ausführungen inkl. Anschlusskabel 2m mit ALMEMO® Stecker und Hersteller-Prüfschein

Best. Nr.

Typ	Anwendung	
117	für glatte Oberflächen, z. B. Fensterprofile	FQA017C
118	für universelle Anwendungen, z. B. Solaranlagen und Isolierplatten	FQA018C
119	speziell für den Bausektor, Mauerwerk/Isolierplatten, sowie Altbauten	FQA019C
120	kleine Wärmeflussplatte, z. B. für Medizin, Veterinärmedizin, kleine Bauteile usw.	FQA020C
117 SI	flexible Wärmeflussplatte, gut geeignet für glatte Oberflächen, z. B. Fensterprofile	FQA017CSI
118 SI	flexible Wärmeflussplatte, gut geeignet für glatte Oberflächen, z. B. Solaranlagen und Isolierplatten	FQA018CSI
150-1	flexible Wärmeflussplatte besonders geeignet für hohe Temperaturen z. B. für Mauerwerk, isolierte Kessel und Rohre	FQA0801H
150-2	besonders für hohe Temperaturen geeignet speziell für den Bausektor, gemauerte Wände und Isolierplatten	FQA0802H

ALMEMO® D6**Wärmefluss****Digitale Wärmeflußplatte FQADx mit eingebautem Temperatursensor zur automatischen Korrektur des Temperaturkoeffizienten der Wärmeflußplatte, mit ALMEMO® D6-Stecker**

- Automatische Korrektur des Temperaturkoeffizienten der Wärmeflußplatte mit Miniatur-NTC-Sensor, eingebaut in die Wärmeflußplatte zur Messung der Plattenmittentemperatur.
- Messung des Wärmeflusses und der Temperatur mit einem eigenen AD-Wandler im ALMEMO® D6-Stecker.
- 1 Messkanal ist programmiert (ab Werk) Wärmefluß, temperaturkompensiert (W/m², fq)



Typ 117, 118, 119

Technische Daten**Wärmeflußsensor** (siehe auch Tabelle Seite 13.04)

Genauigkeit
des Kalibrierwertes: 5 % bei Nenntemperatur
Nenntemperatur: 23°C
Temperaturkoeffizient: -0,12 %/K (Epoxidplatte)
bzw. -0,17 %/K (Silikonplatten)

Temperatursensor

Sensorelement: Miniatur NTC Typ N
Genauigkeit: $\pm 0,5$ K bei 0...80°C

AD-Wandler im ALMEMO D6-Stecker:

Eingang 1:	NTC-Fühler (Klemmanschluß im Stecker)
Auflösung:	0,01 K
Linearisierung:	fehlerfreies Rechenverfahren nach Galway Steinhart (kein Näherungsverfahren)
Genauigkeit:	$\pm 0,05$ K
Nenntemperatur:	23°C ± 2 K
Temperaturdrift:	0,004 %/K (40 ppm)
Eingang 2:	Spannung mV (Klemmanschluß im Stecker)
Messbereich:	0...26 mV, 0...260 mV
Präzisionsklasse:	AA, siehe Seite 01.05
Refreshrate:	0,4 Sek. für alle 2 Kanäle
Versorgungsspannung:	6 ... 13 V DC
Stromverbrauch:	4 mA

Zubehör**Best. Nr.**

siehe Seite 13.04

Allgemeine Merkmale für ALMEMO® D6-Fühler: siehe Seite 01.08

Ausführungen inkl. Hersteller-Prüfschein**Best. Nr.**

Wärmeflußplatte mit eingebautem Temperatursensor, fest angeschlossenes Kabel PVC, 2 m, mit ALMEMO® D6-Stecker.

Typ 117	Trägermaterial: Epoxidharz, Abmessungen: 100 x 30 x 1,5 mm	FQAD17T
Typ 118	Trägermaterial: Epoxidharz, Abmessungen: 120 x 120 x 1,5 mm	FQAD18T
Typ 119	Trägermaterial: Epoxidharz, Abmessungen: 250 x 250 x 1,5 mm	FQAD19T
Typ 117	Trägermaterial: Silikon, Abmessungen: 100 x 30 x 3 mm	FQAD17TSI
Typ 118	Trägermaterial: Silikon, Abmessungen: 120 x 120 x 3 mm	FQAD18TSI

ALMEMO® Universalmessgeräte

ALMEMO® 2890-9



ALMEMO® Präzisionsmessgerät mit Datenloggerfunktion umfangreiche Funktionen für alle Einsatzgebiete erhöhte Messgenauigkeit, schnelle Messrate. Große grafische Anzeige, helle Beleuchtung. 9 Messeingänge. Akkubetrieb, Ladung im Gerät.

Technik und Funktion

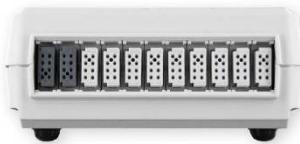
- Erhöhte Messgenauigkeit und Stabilität.
- Schnelle Messrate bis 50 Messungen/s. Mit SD-Speicherkarte bis 100 Messungen/s, optional für 1 Kanal bis 400 Messungen/s.
- 9 Messeingänge, galvanisch getrennt.
- Über 65 Standard-Messbereiche.
- Unterstützung von ALMEMO® Steckern mit Mehrpunktjustage, Sonderlinearisierung und Sonderbereichen.
- Optional eigene Mehrpunktjustage oder Sonderlinearisierungen in 30 Punkten programmierbar und Verwaltung der im Fühlerstecker und Messgerät abgelegten Kalibrierdaten (Option KL).
- Höhere Messqualität durch die galvanische Trennung der Messeingänge zur Geräteversorgung (Gerätemasse).
- verbesserte Vergleichsstellenkompensation mit 2 VK-Fühler
- Datenlogger mit internem EEPROM-Speicher für 100 000 Messwerte, konfigurierbar als Linear- oder Ringspeicher.
- Speicherstecker mit Micro-SD (Zubehör)
- Sleepmode für Langzeitaufzeichnungen.
- Große grafische Anzeige, helle Beleuchtung, große Messwertdarstellung.
- Messwertdarstellung numerisch in verschiedenen Größen, grafisch als Linien- oder Balkendiagramm.
- 3 User-Menüs aus 50 Funktionen frei konfigurierbar
- Komfortable Bedienung über 4 Softkeys und Cursorblock, menügeführt mit Assistenten und Hilfesymbolen. Zusätzliches Bedienrad zur schnellen Cursorbedienung.
- Sprachenwahl deutsch, englisch, französisch.
- 2 ALMEMO® Ausgangsbuchsen für digitale Schnittstellen, Analogausgang, Triggereingang, Alarmkontakte, Speichercard.
- Akkubetrieb standardmäßig, Schnellladung der Akkus im Gerät über mitgeliefertes Netzteil.

Technische Daten

Präzisionsklasse:	AA, siehe Seite 01.04	Tastatur:	9 Folientasten (4 Softkeys), Bedienrad
Messrate:	(100), 50, 10 und 2,5 Messungen/s	Speicher:	EEPROM für 100000 Messw.
Messeingänge	9 ALMEMO® Eingangsbuchsen	Uhrzeit und Datum:	Echtzeituhr gepuffert mit Lithiumbat.
Galv. Trennung für analoge Fühler	mit Halbleiterrelais (50V) zusätzliche galv. Trennung zwischen Messeingängen und Versorgung (Gerätemasse)	Spannungsversorgung:	Akkupack: 6 NiMH-Akkus 1600mA 2,5 h Schnellladeschaltung intern
Zusätzliche Kanäle:	4 Funktionskanäle, geräteintern	Netzadapter:	ZB1112NA10 100 ... 240V AC auf 12V DC, 2A galv. getrennt
Fühlerspannungsvers.:	Akku: 9 oder 12V, max. 0,5A Netzadapter: 12 V, max. 0,3 A	DC-Adapterkabel	galv. getr. ZB2590-UK, 10..30V, 1A
Ausgänge:	2 ALMEMO® Buchsen für alle Ausgangsmodule (Analog-, Daten-, Trigger-, Relaiskabel, Speicher, etc.	Stromverbrauch ohne Ein- und Ausgangsmodule:	Aktivmodus: ca. 37mA mit Beleuchtung: ca. 45..100mA Sleepmodus: ca. 0,05 mA
Ausstattung: Display:	Grafik 128x128 Punkte, 16 Zeilen, Beleuchtung: 5 weiße LED 3-stufig	Gehäuse:	L204 x B109 x H44 mm, ABS, 550g

ALMEMO® Universalmessgeräte

ALMEMO® 2890-9



Präzisionsmessgerät, 9 Messeingänge, Datenlogger mit internem Speicher oder externem Speicherstecker (Zubehör)

Zubehör

Speicherstecker mit Micro-SD inkl. USB Kartenleser (siehe Kapitel Allgemeines Zubehör)
Gleichspannungsadapterkabel 10 - 30V DC, 12V / 1A galv. getr.
Großer Transportkoffer, Aluprofilrahmen/ABS

Best. Nr.

ZA1904SD
ZB2590UK
ZB2590TK2

Anschlusskabel

V24-Datenkabel, galv. getr.
Ethernet-Datenkabel, galv. getr.
Analog-Ausgangskabel -1.25..2.0V, 0.1mV/Digit
Trigger- und Alarmkabel (2 Relais, 0,5A, 50V)
Netzwerktechnik, Bluetooth-Module: siehe Kapitel Netzwerktechnik

Best. Nr.

ZA1909DK5
ZA1945DK
ZA1601RK
ZA1006EKG

Optionen

Mehrpunktjustage, Sonderlinearisierungen, Kalibrierdatenverwaltung
Temperaturnummessbereiche für 8 Kältemittel
Messrate 400 Messungen/s (SD-Karte erforderlich)

Best. Nr.

OA2890KL
SB0000R2
SA0000Q4

Lieferumfang

Akkupack, Netzteil ZB1112NA10, Datenkabel USB ZA1919DKU, Gerätetkoffer ZB2490TK2,
Bedienungsanleitung, Herstellerprüfchein **Präzisionsmessgerät ALMEMO® 2890-9**

Best. Nr.

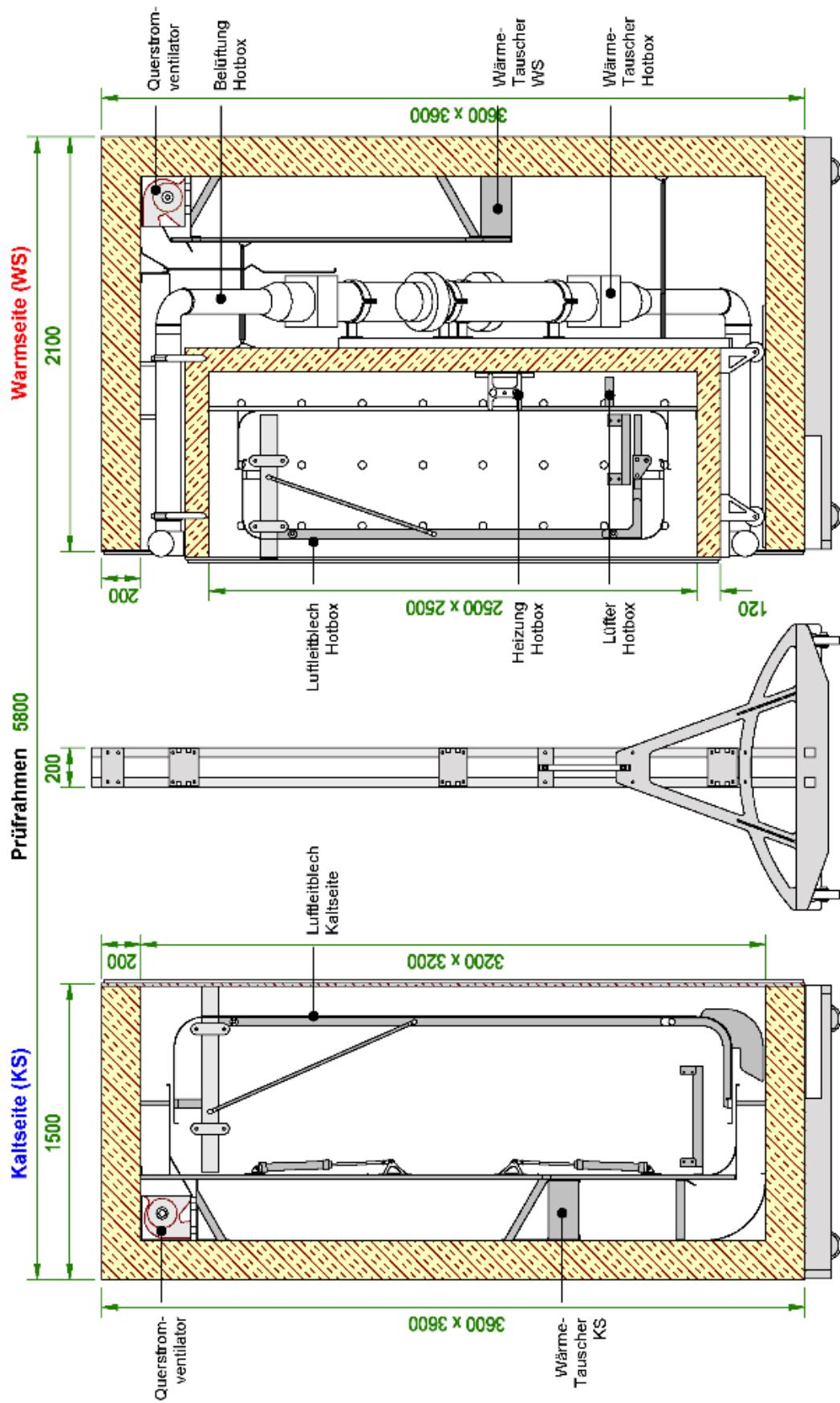
MA28909

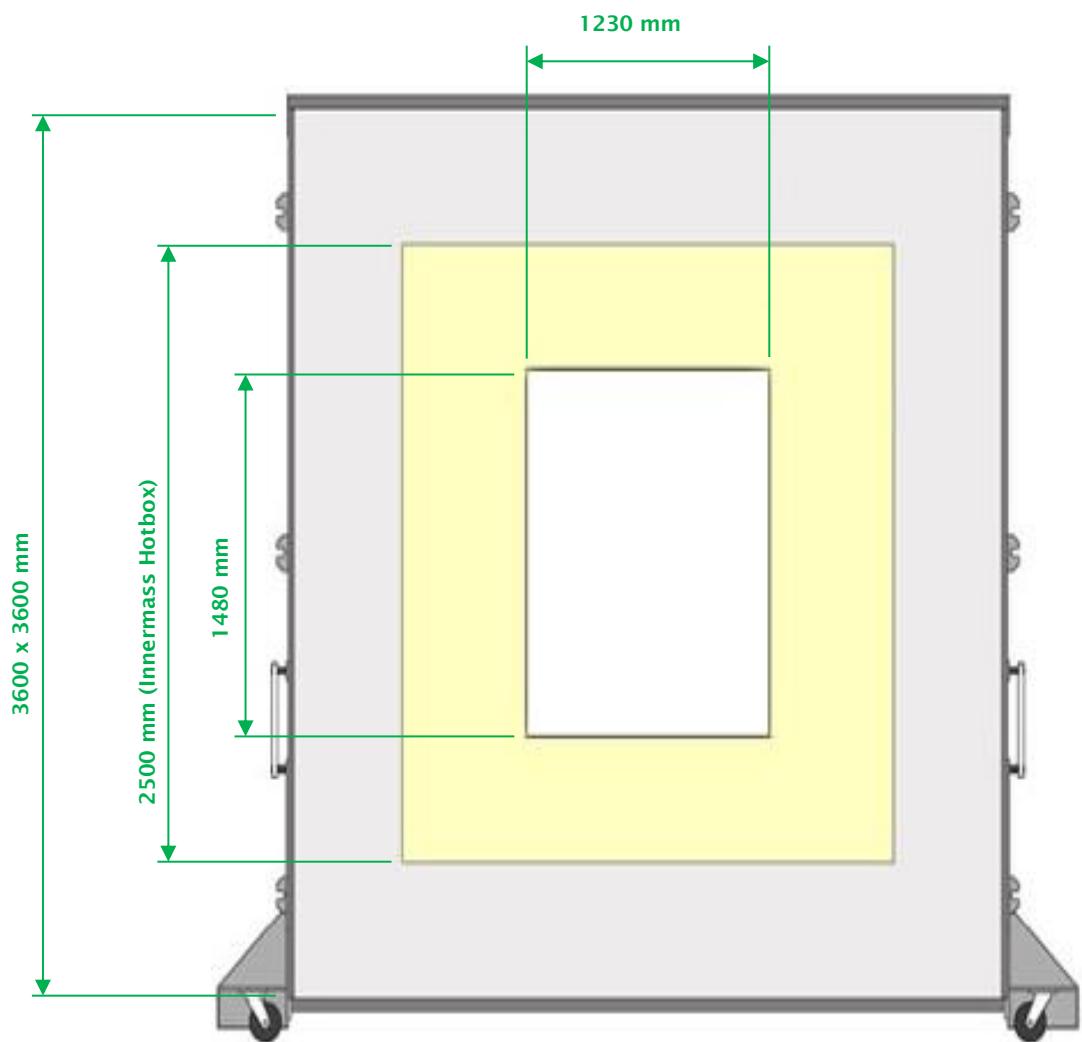
DAkkS- oder Werks-Kalibrierung KE90xx, elektrisch, für Messgeräte, siehe Kapitel Kalibrierzertifikate.
Die DAkkS-Kalibrierung erfüllt die Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 an Prüfmittel.



01.31

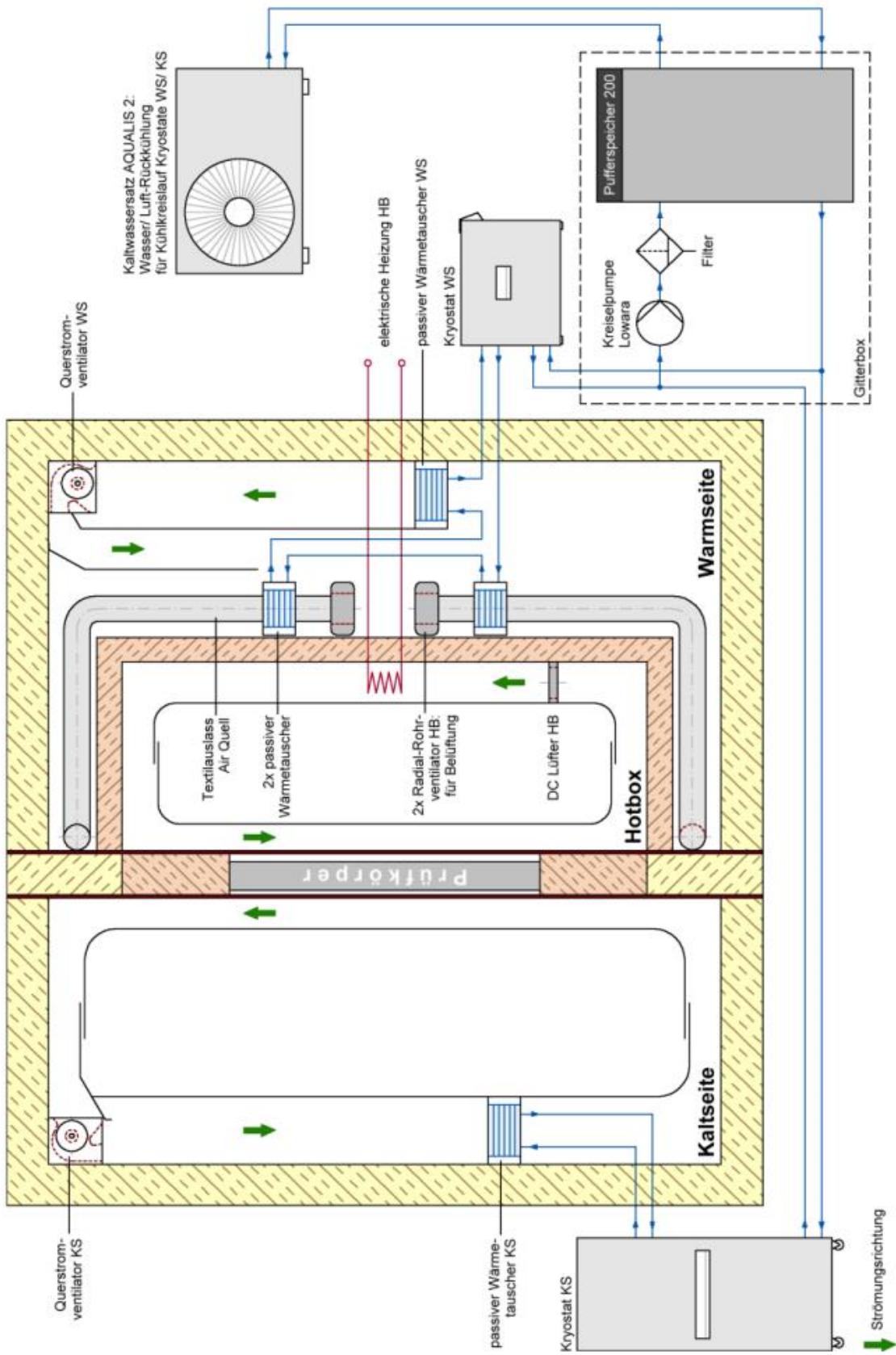
B.3 Detaillierte Prinzipskizzen Heizkasten und Prüfrahmen





B.4 Funktionsdiagramm geregelter Heizkasten TDW 4242, Firma Taurus Instruments AG

Funktionsschema Temperierung TDW - 4242



Anhang C: Lage der In-Situ-Messgeräte

Nachfolgende Bilder zeigen Ansichten des Massivholzprüfkörpers auf der Warm- bzw. Kaltseite nach Installation der Thermoelemente der Hotbox sowie In-Situ-Messgeräte.



Abbildung 44 : Ansicht Prüfkörper Massivholzwand auf der Warm- (links) sowie Kaltseite (rechts) nach Installation der Thermoelemente der Hotbox sowie der Sensoren der In-Situ-Messgeräte.

Nachfolgende Bilder zeigen Ansichten der Holzrahmenwand auf der Warm- bzw. Kaltseite nach Installation der Thermoelemente der Hotbox sowie In-Situ-Messgeräte.



Abbildung 45 : Ansicht Prüfkörper der Holzrahmenwand auf der Warm- (links) sowie Kaltseite (rechts) nach Installation der Thermoelemente der Hotbox sowie der Sensoren der In-Situ-Messgeräte.

Die Wärmeflussplatten sowie Oberflächentemperatursensoren der In-Situ-Messgeräte werden mit Klebeband auf den Prüfkörpern befestigt (vgl. Abbildung 46 bis Abbildung 48).

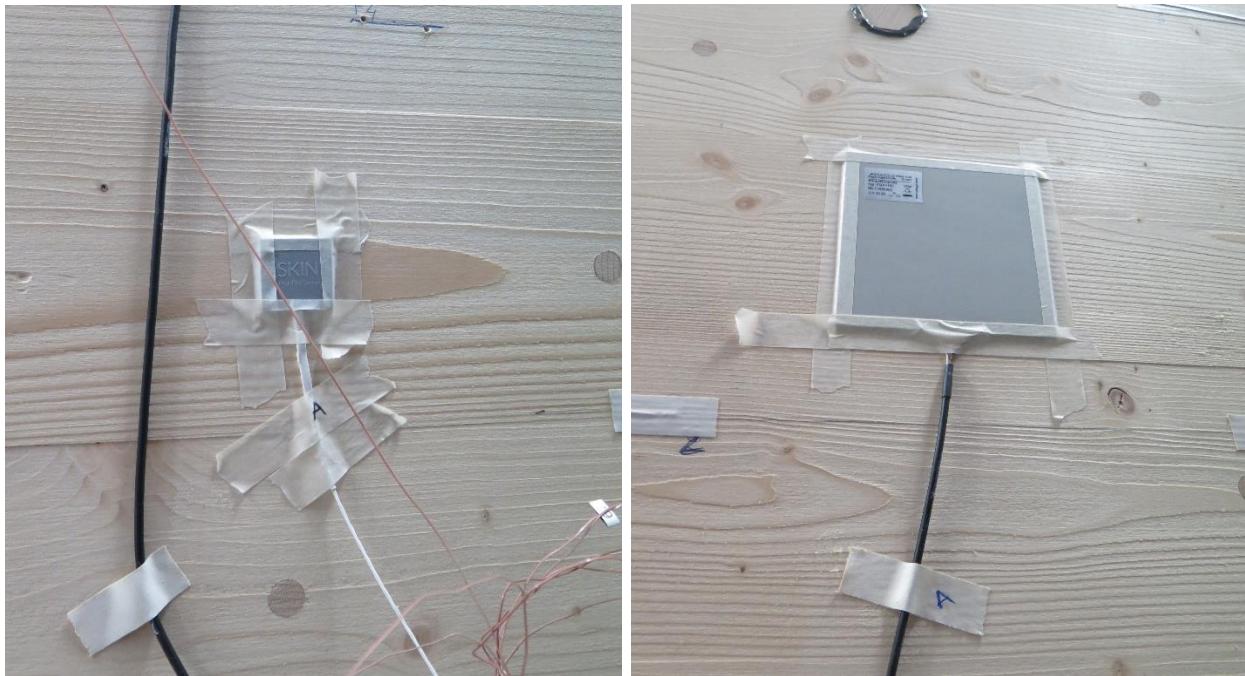


Abbildung 46 : Befestigung der gSKIN- (links) sowie Almemo-Wärmeflussplatte (rechts) mittels Klebeband auf der Massivholzwand.



Abbildung 47 : Befestigung der gSKIN- (links) sowie Almemo-Wärmeflussplatten (rechts) mittels Klebeband auf der Holzständerwand.



Abbildung 48 : Befestigung eines Almemo-Oberflächentemperatursensors auf der Warmseite (links) sowie Kaltseite (rechts) der Holzrahmenwand.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die genauen Positionen der Thermoelemente der Hotbox sowie In-Situ-Messgeräte.

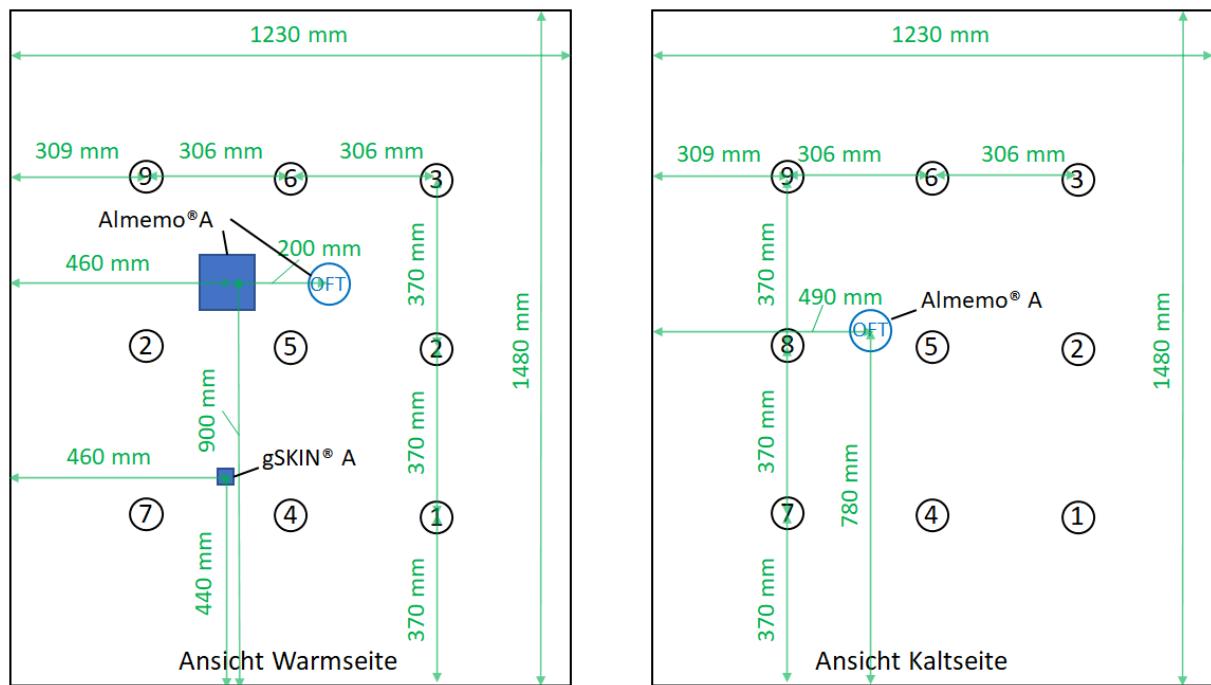


Abbildung 49 : Links: Positionen der Thermoelemente der Hotbox (Nr. 1 – 9) sowie Lage der Sensoren der In-situ-Messgeräte (Wärmeleitflächenplatten «Almemo A» und «gSKIN A», Oberflächentemperatursensor OFT «Almemo A») an der Massivholzwand auf der Warmseite. Rechts: Positionen der Thermoelemente der Hotbox (Nr. 1 – 9) sowie Lage der Sensoren der In-Situ-Messgeräte (ein OFT «Almemo A») an der Massivholzwand auf der Kaltseite.

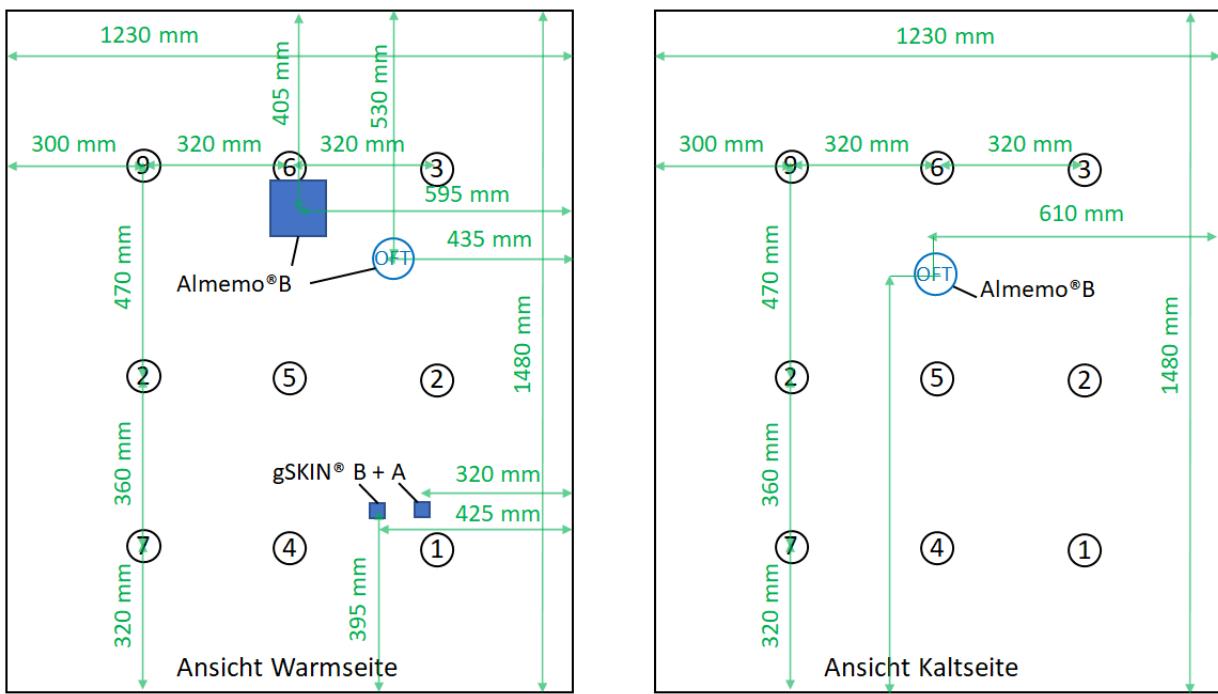


Abbildung 50 : Links: Positionen der Thermoelemente der Hotbox (Nr. 1 – 9) sowie Lage der Sensoren der In-situ-Messgeräte (Wärmeflussplatten «Almemo B», «gSKIN B» und «gSKIN A», Oberflächentemperatursensor OFT «Almemo B») an der Holzrahmenwand auf der Warmseite. Rechts: Positionen der Thermoelemente der Hotbox (Nr. 1 – 9) sowie Lage der Sensoren der In-Situ-Messgeräte (ein OFT «Almemo B») an der Holzrahmenwand auf der Kaltseite.

Die Lufttemperatursensoren der In-Situ-Messgeräte werden an den Strömungsabschirmungen der Lufttemperatursensoren der Hotbox befestigt (vgl. Abbildung 51).



Abbildung 51 : Befestigung der Lufttemperatursensoren der In-Situ-Messgeräte (linkes Bild Almemo, rechtes Bild gSKIN) an den Strömungsabschirmungen der Lufttemperatursensoren der Hotbox.