

Schlussbericht Oktober 2021

# Die zerstörungsfreie Messung des U-Wertes von Aussenbauteilen - Eine Anwendungshilfe



Quelle: Okan Sevim, Ferrara Architekten AG

**Autoren**

Caroline Hoffmann, INEB, Fachhochschule Nordwestschweiz  
Achim Geissler, INEB, Fachhochschule Nordwestschweiz

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.  
Für den Inhalt sind allein die Autoren verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Management Summary, Deutsch</b> .....	<b>7</b>
<b>Management Summary, Italienisch</b> .....	<b>8</b>
<b>Management Summary, Französisch</b> .....	<b>9</b>
<b>1. Ausführliche Zusammenfassung</b> .....	<b>10</b>
1.1 Methodik.....	11
1.1.1 Ausstattung der Geräte.....	11
1.1.2 Auswertungsmethodik und Bewertung Gültigkeit Messung .....	11
1.1.3 Messunsicherheit .....	12
1.1.4 Unsicherheit der Berechnungsansätze (inkl. Messunsicherheit).....	12
1.2 Messungen in-situ .....	13
1.3 Messungen im Labor .....	14
1.4 Simulationen .....	16
1.5 Klebe- und Kontaktmittel.....	16
<b>2. Einführung</b> .....	<b>17</b>
2.1 Hintergrund .....	17
2.1.1 Messprojekte U-Wert .....	17
2.1.2 Vorhandene Messanleitungen .....	18
2.1.3 Norm ISO 9869-1 .....	19
2.1.3.1 Geräte 19	
2.1.3.2 Messungen .....	20
2.1.3.3 Datenerfassung.....	20
2.1.3.4 Messgenauigkeit .....	20
2.1.3.5 Vergleich von Messwerten und Berechnungswerten .....	21
2.2 Projekt.....	21
<b>3. Vorgehen</b> .....	<b>21</b>
3.1 Klebe- und Kontaktmittel.....	21
3.1.1 Testaufbau .....	21
3.1.2 Getestete Materialien.....	22

3.1.2.1	Wandoberflächenprüflinge .....	22
3.1.2.2	Klebe- und Kontaktmittel.....	22
3.2	In-situ Messungen.....	23
3.2.1	Messgebäude .....	23
3.2.2	Wände für die in-situ Messung und Prüfkörper .....	24
3.2.3	Messaufbau U-Wert in-situ .....	26
3.2.4	Messung Materialfeuchtigkeit .....	29
3.3	Auswertungen Daten in-situ Messungen .....	30
3.3.1	Berechnung U-Wert Messung.....	30
3.3.2	Berechnung U-Wert Wandaufbau (statisch).....	31
3.3.3	Messunsicherheit in-situ Geräte .....	31
3.3.4	Unsicherheit der Berechnungsansätze.....	32
3.3.5	Bewertung Gültigkeit Messung .....	33
3.3.6	Ausgabe U-Wert Messgeräte.....	33
3.4	Messungen im Labor .....	34
3.4.1	Messung U-Wert Hotbox.....	34
3.4.2	Messunsicherheit Hotbox.....	34
3.4.3	Messunsicherheit in-situ Messgeräte in Hotbox .....	34
3.4.4	Messung U-Wert in-situ Messgeräte in der Hotbox .....	34
3.4.5	Messung Feuchte .....	35
3.5	Simulationen .....	35
3.5.1	Aufbau Modell .....	35
3.5.2	Modellvalidierung .....	36
3.5.3	Untersuchung Klebe- und Kontaktmittel .....	37
3.5.4	Untersuchung Operativer Fehler der Wärmeflussplatte .....	37
<b>4.</b>	<b>Resultate Klebe- und Kontaktmittel .....</b>	<b>38</b>
4.1	Test Rückstandsfreiheit und Haftung (Test 1) .....	38
4.2	Test Haftung Sensor auf Oberfläche (Test 2).....	39
<b>5.</b>	<b>Resultate Messungen in-situ .....</b>	<b>39</b>
5.1	U-Wert in-situ .....	39
5.1.1	Auswertung verschiedene Befestigungsmethoden Sensoren .....	39
5.1.2	Auswertung bezogen auf Methode .....	41
5.1.3	Sonderfragen .....	42
5.1.4	Zusammenfassung und Fazit .....	43
5.2	Praktische Erfahrung Messungen.....	45
5.2.1	Allgemein .....	45
5.2.2	Gerätespezifisch .....	45

5.3	Feuchte .....	46
<b>6.</b>	<b>Resultate Messungen Labor .....</b>	<b>46</b>
6.1	U-Wert Labor .....	46
6.1.1	Wand Mauerwerk M3 Messwerte Hotbox.....	46
6.1.1.1	U-Wert Messung Basis .....	46
6.1.1.2	Variation Luftgeschwindigkeit auf der Kaltseite .....	47
6.1.1.3	Variation Lufttemperatur Kaltseite .....	47
6.1.2	Wand Mauerwerk M3 Messwerte in-situ Messgeräte.....	47
6.1.3	Wand Beton B2 Messwerte Hotbox.....	49
6.1.3.1	U-Wert Messung Basis .....	49
6.1.3.2	Variation Lufttemperatur Kaltseite .....	49
6.1.4	Betonwand B2 Messwerte in-situ Messgeräte.....	50
6.1.5	Zusammenfassung .....	50
6.2	Feuchte .....	50
6.2.1	Mauerwerk M3 .....	50
6.2.2	Beton, B2 .....	51
<b>7.</b>	<b>Resultate Simulationen .....</b>	<b>51</b>
7.1	Modellvalidierung .....	51
7.2	Untersuchung operativer Fehler der Wärmeflussplatte .....	51
7.3	Untersuchung Klebe- und Kontaktmittel .....	52
7.4	Vergleich Simulation und in-situ Messungen.....	52
<b>8.</b>	<b>Vergleich Messung in-situ und Labor.....</b>	<b>53</b>
8.1	Vergleich Mauerwerkswand Messung in-situ (M1/M2) und Labor (M3) .....	53
8.2	Vergleich Betonwand Messung in-situ (B1) und Labor (B2).....	55
<b>9.</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>57</b>
9.1	Variablen .....	57
9.2	Indizes.....	57
<b>10.</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>57</b>
<b>11.</b>	<b>Dank .....</b>	<b>59</b>
<b>12.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>60</b>
12.1	Herleitung Unsicherheit der Berechnungsansätze .....	60
12.2	Testergebnisse Haftmittel .....	63

12.2.1	Beurteilung .....	63
12.3	Messergebnisse U-Wert in-situ .....	66
12.4	Messergebnisse Feuchte Labor .....	66
12.5	Forschungsberichte Labormessungen BFH .....	67

## Management Summary, Deutsch

U-Wert Messungen vor Ort eignen sich für Gebäude, bei denen die Konstruktion unbekannt ist und eine zerstörungsfreie, sichere Aussage zu den thermischen Eigenschaften getroffen werden soll. Die entsprechenden Messgeräte sind am Markt erhältlich und zielen auf eine breite Anwendung. Ziel des Projektes ist es, eine praxisorientierte Anwendungshilfe für die U-Wert Messung vor Ort zu erstellen. Als Basis dienen in-situ U-Wert Messungen und vergleichende Messungen im Labor, die mit drei unterschiedlichen Messgeräten durchgeführt werden. Ergänzend dazu werden Simulationen erstellt und Kontakt- und Haftmittel zur Befestigung der Sensoren an den zu messenden Bauteilen getestet. Untersucht werden schwere, homogene Bauteile, damit beziehen sich die Hinweise hauptsächlich auf diesen Bauteiltyp. Der Forschungsbericht bezieht sich auf diese Arbeiten. Die wesentlichen Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst:

- Messungen in-situ: Bei den durchgeführten Messungen wird hauptsächlich die Befestigung der Fühler und Wärmeflussplatten an den Bauteilen variiert. Die Auswertung zeigt, dass zwischen den einzelnen Messungen im Ergebnis Unterschiede auftreten. Die auftretenden Abweichungen können aber nicht konsistent der Befestigungsart der Wärmeflussplatte und der Temperaturfühler zugeordnet werden. Es kann also kein konsistenter Einfluss der Klebe- und Kontaktmittel auf den gemessenen U-Wert festgestellt werden. Einen grossen Einfluss auf das Ergebnis hat die Auswertung der Messwerte (z. B. Auswertung gemäss ISO 9869-1 oder Verwendung Geräteausgabe als Ergebnis). Einen eher geringen Einfluss auf das Ergebnis haben unterschiedlich lange Zeitspannen für die U-Wert Berechnung, unterschiedliche Zeitspannen innerhalb eines Messzeitraumes und die unterschiedliche Erfassung der Aussentemperatur.
- Messungen im Labor: Der U-Wert kann je nach Gerät und Ausstattung aus unterschiedlichen Eingangsgrossen berechnet werden. Der Vergleich der Messgeräte zeigt, dass die Geräteausstattung es erlauben sollte, den U-Wert mit der Formel  $q/(\theta_i - \theta_e)$  zu bestimmen. Dabei sind:  $q$  = Wärmestromdichte in ( $W/m^2$ ),  $\theta_i$  = Raumlufttemperatur in ( $^{\circ}C$ ) und  $\theta_e$  = Aussentemperatur in ( $^{\circ}C$ ). Eine Ausstattung, die die Wärmeübergangskoeffizienten bestimmen lässt, steigert die Qualität der U-Wert Messung nicht. Messgeräte mit temperaturbasiertem Ansatz, die keine Wärmeflussplatte enthalten, weisen eher hohe Abweichungen auf.
- Simulationen: Auf Grundlage der Simulationen liegt das Unsicherheitspotential infolge eines schlecht wärmeleitenden Klebe- oder Kontaktmittels im Vergleich zu einem gut leitenden Kontaktmittel bei einer Unterschätzung des U-Wertes um maximal 2 %. Für das Vorgehen bei den Messungen ergibt sich daraus die folgende Empfehlung: um Fehler durch eingeschlossene Luftblasen zwischen Messfühler und Wandoberfläche zu vermeiden sollte Wärmeleitpaste verwendet werden. Ist eine Verschmutzung der Wandoberfläche nicht zulässig, so kann bei glatten Wandoberflächen auf Wärmeleitpaste ohne weitere Massnahmen verzichtet werden, bei rauen Wandoberflächen ist die Messunsicherheit anzupassen.
- Eine fleckenfreie, sichere und wärmeleitende Befestigung der Sensoren auf dem Bauteil ist der Idealfall. Wärmeleitpaste hat wärmeleitende Eigenschaften, hinterlässt aber in der Regel Flecken. Die meisten gängigen Klebemittel haben eher geringe wärmeleitenden Eigenschaften, im Fokus der Untersuchung stehen daher die Hafteigenschaften und die Fleckenfreiheit. Insgesamt werden 13 unterschiedliche Klebematerialien auf sieben unterschiedlichen Oberflächen getestet. Es können jeweils zwei Klebematerialien für glatte und zwei für raue Untergründe empfohlen werden.

Die Anwendungshilfe steht auf der Website von EnergieSchweiz als Download zur Verfügung. Sie enthält praktische Hinweise zur Durchführung und Auswertung der U-Wert Messung, sowie gerätespezifische Hinweise. Eine Checkliste für Behörden zur Prüfung von Messungen wird bereitgestellt.

## Management Summary, Italienisch

Le misurazioni del valore U in loco sono adatte per gli edifici di cui non sia nota la costruzione e per le cui proprietà termiche occorra una dichiarazione non distruttiva e affidabile. I corrispondenti strumenti di misura sono disponibili sul mercato e sono concepiti per un'applicazione estesa. Lo scopo del progetto è redigere una guida pratica per la misurazione del valore U in loco. Da base fungono le misurazioni dei valori U in loco e le misurazioni comparative in laboratorio, effettuate con tre strumenti di misura diversi. A complemento vengono realizzate delle simulazioni sottoponendo a test i materiali di contatto e adesivi da usare per fissare i sensori agli elementi edili da misurare. Poiché vengono esaminati elementi edili pesanti e omogenei, le informazioni si riferiscono principalmente a questa tipologia costruttiva. Il rapporto di ricerca fa riferimento a questi lavori. I risultati principali sono riassunti di seguito:

- Misurazioni in loco: nelle misurazioni effettuate, si varia principalmente il fissaggio delle sonde e delle piastre di flusso termico agli elementi edili. La valutazione mostra differenze nei risultati tra le singole misurazioni. Le deviazioni riscontrate non possono tuttavia essere assegnate in modo coerente al tipo di montaggio della piastra di flusso termico e delle sonde termiche. Non è quindi possibile stabilire un influsso costante di adesivi e agenti di contatto sul valore U misurato. La valutazione dei valori misurati influisce sensibilmente sul risultato (ad es. valutazione secondo la norma ISO 9869-1 o utilizzo del rilevamento dello strumento di misura come risultato). Un influsso piuttosto modesto sul risultato viene esercitato da diversi periodi di tempo per il calcolo del valore U, da diversi periodi di tempo all'interno di un periodo di misurazione e da una diversa registrazione della temperatura esterna.
- Misurazioni in laboratorio: il valore U può essere ricavato da diverse variabili di input a seconda dello strumento e della configurazione. Il confronto fra strumenti di misura mostra che la configurazione degli strumenti dovrebbe consentire di stabilire il valore U usando la formula  $q/(\theta_i - \theta_e)$ . Dove:  $q$  = densità di flusso di calore in ( $W/m^2$ ),  $\theta_i$  = temperatura dell'aria ambientale in ( $^{\circ}C$ ) e  $\theta_e$  = temperatura esterna in ( $^{\circ}C$ ). Una configurazione che consenta di stabilire i coefficienti di trasmissione del calore non aumenta la qualità della misurazione del valore U. Gli strumenti di misura con un approccio basato sulla temperatura che non includano una piastra di flusso termico tendono ad avere deviazioni elevate.
- Simulazioni: in base alle simulazioni, il potenziale di incertezza dovuto a un adesivo o a un agente di contatto scarsamente conduttivo rispetto a materiale ben conduttivo comporta una sottostima del valore U al max del 2%. Per la procedura di misurazione, si fornisce pertanto la seguente raccomandazione: per evitare errori causati da bolle d'aria intrappolate tra il sensore e la superficie della parete, usare il più possibile la pasta termoconduttiva. Se non sono ammesse tracce di sporco sulla superficie della parete, si può rinunciare alla pasta termoconduttiva per le superfici lisce della parete senza ulteriori misure; per le superfici ruvide occorre regolare l'incertezza della misura.
- Il caso ideale è costituito da un fissaggio senza macchie, sicuro e termicamente conduttivo delle sonde. La pasta termoconduttiva ha proprietà di conduzione del calore, ma di solito lascia delle macchie. La maggior parte degli adesivi comuni ha proprietà di conduzione del calore piuttosto basse, pertanto lo studio si focalizza sulle proprietà di adesione e sull'assenza di macchie. Complessivamente vengono testati 13 materiali adesivi su sette superfici. Due materiali adesivi ciascuno possono essere raccomandati per superfici lisce e due per superfici ruvide.

La guida pratica può essere scaricata dal sito web di SvizzeraEnergia. Contiene istruzioni pratiche per eseguire e valutare la misurazione del valore U, nonché note specifiche sugli strumenti di misura. È disponibile una lista di controllo per le autorità per verificare le misurazioni.

## Management Summary, Französisch

Les mesures de valeur U sur place sont compatibles avec les bâtiments dont la construction est inconnue et pour lesquels il faut faire une déclaration non destructive sûre quant à leurs caractéristiques thermiques. Les instruments de mesure correspondants sont disponibles dans le commerce et visent une large gamme d'applications. L'objectif de ce projet est d'établir un guide d'information pratique pour la mesure de la valeur U sur place. Des mesures de valeur U in situ et des mesures comparatives en laboratoire, effectuées avec trois instruments de mesure différents, servent de base. En complément, des simulations sont créées et des produits de contact et adhésifs testés pour la fixation des capteurs sur les éléments à mesurer. Les éléments examinés sont des éléments de construction lourds et homogènes, raison pour laquelle les remarques se rapportent principalement à ce type d'élément. Le rapport de recherche se rapporte à ce travail. Les principaux résultats obtenus sont résumés plus bas :

- Mesures in situ : pour les mesures réalisées, on modifie principalement la fixation des sondes et plaques de flux thermique sur les éléments de construction. L'évaluation montre qu'il y a des différences entre les résultats obtenus par les différentes mesures. Les écarts constatés ne peuvent toutefois pas être attribués de manière cohérente au type de fixation de la plaque de flux thermique et des sondes de température. Il n'y a donc pas d'influence cohérente des adhésifs et produits de contact sur la valeur U mesurée. L'évaluation des valeurs mesurées (par ex. évaluation selon ISO 9869-1 ou utilisation des valeurs données par l'instrument comme résultat) a une large influence sur le résultat. Des périodes différentes de calcul de la valeur U, des périodes différentes sur la période de mesure totale et l'enregistrement différent de la température extérieure ont une influence relativement faible sur le résultat.
- Mesures en laboratoire : la valeur U peut être calculée à partir de grandeurs d'entrée différentes en fonction de l'instrument et de son équipement. La comparaison des instruments de mesure montre que l'équipement des instruments doit pouvoir autoriser une détermination de la valeur U avec la formule  $q/(\theta_i - \theta_e)$ . Dans cette formule:  $q$  = densité de flux thermique en ( $W/m^2$ ),  $\theta_i$  = température ambiante en ( $^{\circ}C$ ) et  $\theta_e$  = température extérieure en ( $^{\circ}C$ ). Un équipement qui permet de déterminer le coefficient de transmission thermique n'augmente pas la qualité de la valeur U. Les instruments de mesure avec une approche basée sur la température et ne contenant pas de plaque de flux thermique présentent des écarts relativement importants.
- Simulations : selon les simulations, le potentiel d'incertitude lié à un adhésif ou un produit de contact conduisant mal la chaleur est 2 % maximum par rapport à un produit de contact thermoconducteur en sous-évaluant la valeur U. Concernant la marche à suivre pour les mesures, on peut donc en déduire la recommandation suivante : pour éviter les erreurs dues à des bulles d'air emprisonnées entre la sonde de mesure et la surface du mur, il faut utiliser de la pâte thermique si possible. Si les taches ne sont pas admissibles sur la surface du mur, il est possible de renoncer à la pâte thermique sans autre mesure sur les surfaces lisses et dans le cas de surfaces rugueuses, il faut adapter l'incertitude de mesure en conséquence.
- Une fixation sans tache, sûre et thermoconductrice des capteurs sur l'élément de construction constitue la situation idéale. La pâte thermique possède des propriétés de conductivité thermique, mais elle laisse généralement des taches. La plupart des adhésifs courants ont des caractéristiques de conductivité thermique relativement faibles. L'examen se concentre donc sur leur capacité d'adhérence et l'absence de taches. Au total, 13 adhésifs différents sont testés sur sept surfaces différentes. Deux produits sont recommandés pour chacune des surfaces, lisses et rugueuses.

Le guide d'information est disponible au téléchargement sur le site Internet de SuisseEnergie. Il contient des consignes pratiques sur la réalisation et l'évaluation de la mesure de la valeur U, ainsi que des consignes spécifiques à l'instrument. Une liste de contrôle pour les autorités aux fins de contrôle des mesures est également fournie.

# 1. Ausführliche Zusammenfassung

In-situ U-Wert Messungen eignen sich im Vorfeld energetischer Erneuerungsmassnahmen für Gebäude, bei denen die Konstruktion unbekannt ist und eine zerstörungsfreie, sichere Aussage zu den thermischen Eigenschaften getroffen werden soll. Dies sind überwiegend Gebäude, die vor 1960 erstellt wurden und eventuell sogar unter Bestandsschutz stehen. Für die U-Wert Messung vor Ort sind seit einigen Jahren handliche Messgeräte erhältlich, die auf eine breite Anwendergruppe zielen. Vor diesem Hintergrund erscheint eine praxisorientierte Anwendungshilfe sinnvoll. Ziel des vorliegenden Projektes ist es, eine solche Anwendungshilfe zu erstellen.

Als Grundlage für die Erstellung der Anwendungshilfe werden mit drei unterschiedlichen, marktgängigen Messsystemen Messungen in-situ und im Labor durchgeführt und es werden auf Basis der in-situ Messergebnisse zu einzelnen Aspekten der Messungen zusätzlich Simulationen durchgeführt. Die Messungen im Labor werden von der Berner Fachhochschule Biel (BFH) durchgeführt. Die Gebäude, in denen im Rahmen des Projektes die in-situ Messungen durchgeführt werden können, sind Teil einer Siedlung in Basel, deren Gebäude für Ersatzneubauten abgerissen werden. Dies ermöglicht es, sowohl in-situ- als auch Labormessungen an Konstruktionen durchzuführen, die identisch (Beton) bzw. hinsichtlich der verwendeten Materialien weitgehend übereinstimmend sind (Mauerwerkswand). Das Mauerwerkswandstück für die Labormessung muss im 1. OG entnommen werden, die in-situ Messungen können aber nur im 3. OG durchgeführt werden. Hierdurch liegen unterschiedliche Wandstärken und auch unterschiedliche Schichtaufbauten vor. In Abhängigkeit von plausiblen Wärmeleitfähigkeiten ergeben sich die Spannweiten für die berechneten U-Werte gemäss Tabelle 1.

Tabelle 1: Berechnete (erwartbare) U-Werte für die Bauteile Mauerwerk und Beton.

Messung	Wandtyp	Stärke (cm)	Bezeichnung	U-Wert min./max. W/(m <sup>2</sup> K)
in-situ	Mauerwerk	33.0	M1 / M2	1.1 / 1.3
in-situ	Beton	44.4	B1	1.1 / 1.2
Labor	Mauerwerk	42.0	M3	1.0 / 1.1
Labor	Beton, entspricht Aufbau B1	44.4	B2	1.1 / 1.2

Die in-situ Messungen werden im Zeitraum zwischen dem 12.12.2019 und dem 02.03.2020 durchgeführt. Eine Kontrollmessung der Bauteilfeuchte zu Beginn und nach Abschluss der gesamten Messperiode zeigt, dass der Feuchtegehalt aller Wände (fast) gleichgeblieben ist. Es wird daher davon ausgegangen, dass das Messergebnis für die U-Werte nicht durch Feuchte beeinflusst ist.

Mit den Messungen und Simulationen werden verschiedene Einflussgrössen untersucht:

- Ausstattung der Geräte
- Auswertungsmethodik
- Befestigung der Sensoren an der Wand
- Platzierung der Sensoren (ausser)
- Schutz der Sensoren vor kurz- und langwelliger Strahlung
- Gemessene Grössen
- Auswertung

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse des Projekts zusammengefasst.

## 1.1 Methodik

### 1.1.1 Ausstattung der Geräte

Es werden drei Messgerätetypen mit unterschiedlichen Ausstattungen und Erweiterungsmöglichkeiten mit Fühlern und Wärmeflussplatten eingesetzt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Mögliche Ausstattung der Messgeräte für die in-situ U-Wert Messung Geräte für die in-situ U-Wert Messungen.

	Fünf Messgrössen	Drei Messgrössen a	Drei Messgrössen (temperaturbasiert)
Beispielgerät	Almemo [1]	gSKIN U-Value KIT [2]	Testo 635-2 U-Wert- Set [3]
Hersteller	Ahlborn	greenTEG	Testo
Wärmeflussplatte	1	1	-
Fühler $\theta_{si}$	1		3
Fühler $\theta_{se}$	1	-	-
Fühler wandnahe $\theta_i$	1	1	
Fühler $\theta_i$ am Fühlerstecker des Messgerätes	-	-	1
Fühler $\theta_e$	1	1	1

### 1.1.2 Auswertungsmethodik und Bewertung Gültigkeit Messung

Der U-Wert kann je nach Gerät und Ausstattung aus unterschiedlichen Eingangsgrössen berechnet werden. In Tabelle 3 sind die entsprechenden Ansätze für die im Rahmen des Projektes eingesetzten Geräte und Ausstattungen zusammengefasst.

Für die Datenanalyse der in-situ Messungen wird die «Average Method» aus ISO 9869-1 [4] verwendet. Dabei wird der aufsummierte Wärmefluss durch die aufsummierte Temperaturdifferenz geteilt. Die Messung wird anhand von drei Kriterien auf ihre Gültigkeit überprüft:

1. Minimaldauer 72 h,
2. der Messwert (U-Wert) am Ende der Messung weicht nicht mehr als  $\pm 5$  % vom Wert 24 h zuvor ab,
3. der Messwert, der während der ersten 2/3 der Analyseperiode erhalten wird, weicht nicht mehr als  $\pm 5$  % vom Wert der letzten 2/3 der Analyseperiode ab.

Tabelle 3: Möglichkeiten der U-Wert Berechnung in Abhängigkeit von dem Messgerät bzw. den erfassten Messgrössen. Die Grösse  $1/\Lambda$  in  $m^2$  K/W entspricht jeweils dem Wärmedurchlasswiderstand des Bauteiles.

Formel	Benennung im Text	Almemo (Ahlborn)	gSKIN U-Value KIT (greenTEG)	Testo 635-2 U-Wert-Set (Testo)
$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_{se}}} \quad (F1.1)$ <p>dabei sind:</p> $h_{si} = \left( \frac{q}{\theta_i - \theta_{si}} \right)$ $h_{se} = \left( \frac{q}{\theta_{se} - \theta_e} \right)$ $\Lambda = \left( \frac{q}{\theta_{si} - \theta_{se}} \right)$	UWert_F1.1	✓	✗	✗
$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_{se}}} \quad (F1.2)$ <p>dabei sind:</p> $h_{si} = h_c + h_r$ $h_c = 1.98 * (\theta_i - \theta_{si})^{0.32}$ $h_r = 4\epsilon\sigma T_{si}^3$ $h_{se} = \left( \frac{q}{\theta_{se} - \theta_e} \right)$ $\Lambda = \left( \frac{q}{\theta_{si} - \theta_{se}} \right)$	UWert_F1.2	✓	✗	✗
$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_e} \quad (F2)$	UWert_F2	✓	✓	✗
$U = h_{si} \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (F3)$ <p>dabei ist <math>h_{si} = 7.69</math> W/(m<sup>2</sup> K)</p>	UWert_F3	✓	✗	✓

### 1.1.3 Messunsicherheit

Für die Ermittlung der Messunsicherheit wird die Vorgehensweise aus ISO 9869-1 [4] gewählt. Es fließen hier Unsicherheiten ein, die dem verwendeten Gerät, der Installation und den Randbedingungen zugeordnet werden können. Unter der Annahme, dass die genannten Unsicherheiten unabhängig voneinander und zufälliger Natur sind, wird von den Gesamtunsicherheiten in Tabelle 4 ausgegangen. Da in der Hotbox konstante Randbedingungen für die Messung bestehen, sind hier die Unsicherheiten kleiner.

Tabelle 4: Angenommene Gesamtunsicherheiten Messung gemäss Norm

	In-situ	Hotbox
Ahlborn	13 %	9.5 %
greenTEG	13 %	4.6 %
Testo	12 %	2.3 %

### 1.1.4 Unsicherheit der Berechnungsansätze (inkl. Messunsicherheit)

Bei den in Tabelle 4 genannten Gesamtunsicherheiten können die Unsicherheiten der Messgeräte durch die Berücksichtigung der Messgeräte in den Berechnungsansätzen ersetzt werden. Dabei nimmt mit Zunahme der Anzahl Messgrössen (und damit auch der Unsicherheiten), die in die Berechnungsformel eingehen, auch die Unsicherheit für das Resultat zu. Die Gesamtunsicherheit Messung unter Berücksichtigung des Berechnungsansatzes bei Verwendung der genannten Messgeräte ist wie folgt:

- Ahlborn, F1.1: = 19 %
- Ahlborn, F1.2: = 19 %
- Ahlborn, F2: = 13 %
- Ahlborn, F3: = 13 %

greenTEG, F2: = 13 %  
 Testo, F3: = 17 %

## 1.2 Messungen in-situ

Bei den durchgeführten Messungen wird hauptsächlich die Befestigung der Fühler und Wärmeflussplatten an den Bauteilen variiert. Trotz der unterschiedlichen Befestigung sind die Messungen für die Bauteile untereinander vergleichbar. In Abb. 1 sind die gemittelten Ergebnisse der in-situ Messungen und der Vergleich mit den berechneten U-Werten zusammengefasst. Die schwarzen Rahmen zeigen die Spannweite der berechneten U-Werte aus Tabelle 1 auf. Es fällt zunächst auf, dass die UWerte\_F1.1 deutlich zu hoch sind.

M1	UWert_F1.1	1.5			
B1	UWert_F1.1	1.8			
M1	UWert_F1.2	1.2			
B1	UWert_F1.2	1.3			
M1	UWert_F2	1.0		1.1	
B1	UWert_F2	1.1		1.2	
M1	UWert_F3	1.4			1.0

Abb. 1: Übersicht mittlere U-Werte Messung und Berechnung. Dabei werden die folgenden Messungen berücksichtigt: M1: UWert\_F1<sub>m</sub>: Messung 1 - 4, 6; M1: UWert\_F2<sub>m</sub>: Messung 1 - 6; M1: UWert\_F3<sub>m</sub>: Messung 1 - 6; B1: UWert\_F1<sub>m</sub>: Messung 8 - 10; B1: UWert\_F2<sub>m</sub>: Messung 8 - 10 (Die Nummern beziehen sich auf die Messdurchgänge mit unterschiedlichen Befestigungsmitteln, siehe Tabelle 12). Die schwarzen Rahmen zeigen die Spannweite des berechneten U-Wertes gemäss ISO 6946 an.

Messgerät	Formel	Minimale Abweichung	Maximale Abweichung
Ahlborn / Ahlborn	UWert_F1.2 / UWert_F1.1	24%	18%
Ahlborn / Ahlborn	UWert_F1.2 / UWert_F2	-18%	-24%
Ahlborn / Ahlborn	UWert_F1.2 / UWert_F3	17%	0%
Ahlborn / GreenTEG	UWert_F2 / UWert_F2	25%	-16%
Ahlborn / Testo	UWert_F3 / UWert_F3	-22%	-106%

Abb. 2: Übersicht Abweichungen der Einzelmessungen voneinander. Beim Vergleich Ahlborn / Ahlborn werden die Berechnungsmethoden verglichen. Beim Vergleich der Messgeräte die Geräte.

Da das Messgerät Ahlborn die meisten Grössen erfasst, kann für dieses Messgerät der U-Wert auf alle vier in Tabelle 3

Tabelle 3 genannte Arten bestimmt und somit die Ansätze der Messgeräte miteinander verglichen werden. Der Vergleich in Abb. 2 bezieht sich jeweils auf die Abweichungen der Einzelmessungen. Nimmt man den UWert\_F1.2 als Referenz, so liegt der UWert\_F2 zwischen - 18 und 24 % darunter. Wird der Wärmeübergangskoeffizient  $h_{si}$  mit dem Ansatz  $q/(\theta_i - \theta_{si})$  ermittelt (F1.1) statt separat aus  $h_c$  und  $h_r$  wie bei UWert\_F1.2, so ergibt sich ein tieferer Wärmeübergangskoeffizient und damit ein höherer U-Wert (zwischen 18 % und 24 %).

Verglichen mit den erwartbaren U-Werten gemäss Tabelle 1 sind die U-Werte aus Formel F1.2 realistischer (Abb. 1). Vergleicht man die Messgeräte untereinander mit Ahlborn als Basis, so ergeben sich beim UWert\_F2 (greenTEG) Abweichungen zwischen +25 % und -16 %. Beim UWert\_F3 (Testo) treten mit -22 % bis -106 % die höchsten Abweichungen auf.

Die Auswertung der in-situ Messdaten zeigt, dass zwischen den einzelnen Messungen im Ergebnis Unterschiede auftreten. Die auftretenden Abweichungen können aber nicht konsistent der Befestigungsart der Wärmeflussplatte und der Temperaturfühler zugeordnet werden. Es kann also kein konsistenter Einfluss der Klebe- und Kontaktmittel auf den gemessenen U-Wert festgestellt werden. Im Umkehrschluss heisst dies aber nicht, dass es grundsätzlich keinen Einfluss gibt.

Einen grossen Einfluss auf das Ergebnis (-5 % und +28 %) hat die Auswertung der Messwerte. Es macht einen erheblichen Unterschied, ob die Messwerte des Gerätes gemäss ISO 9869-1 ausgewertet werden, oder ob die Geräteausgabe als Ergebnis verwendet wird (-5 % und +15 %). Auch die Verwendung des letzten Tagesmittelwertes anstelle des normativ gemittelten U-Wertes ergibt erhebliche Abweichungen (-4 % und +28 %). Beim Messgerät von greenTEG wird der U-Wert bereits softwareseitig normkonform ermittelt.

Einen eher geringen Einfluss auf das Ergebnis (bis +3 %) haben unterschiedlich lange Zeitspannen für die U-Wert Berechnung, unterschiedliche Zeitspannen innerhalb eines Messzeitraumes und die unterschiedliche Erfassung der Aussentemperatur (mit Strahlungsschirm, ohne Strahlungsschirm exponiert und hinter Fensterladen). Da sich diese Untersuchungen mit speziellem Bezug auf die Aussentemperatur aber nur auf wenige Messdaten beziehen, wird – um Fehlerquellen zu vermeiden – grundsätzlich zur Verwendung eines Strahlungsschirms geraten.

### 1.3 Messungen im Labor

In der Hotbox sind auch die in-situ Messgeräte am Bauteil befestigt, sodass Messungen mit den in-situ Geräten auch im Labor gemacht werden können.

Abb. 3 zeigt die Messergebnisse der Hotbox selber und der in-situ Messgeräte in der Hotbox im Vergleich zu den Messergebnissen im Feld.

Um eine Aussage zu den Messgeräten machen zu können, werden zwei Vergleiche gezogen:

- Messgerät / Messgerät: Hier werden die Messwerte im freien Feld mit den Messwerten der Geräte in der Hotbox verglichen. Für die Messungen des Mauerwerks im Feld sind etwas höhere U-Werte zu erwarten, da die Wand bei der in-situ Messung eine geringere Wandstärke aufweist als das für das Labor entnommene Wandstück. Beim Beton sind keine Abweichungen zwischen Labor und in-situ zu erwarten.
- Messgerät / Hotbox: Hier werden die Messwerte in der Hotbox mit der Hotbox verglichen. Auch hier sind beim Mauerwerk Überschreitungen zu erwarten, beim Beton nicht.

Bezogen auf die Messgeräte lassen sich die folgenden Rückschlüsse ziehen:

– Ahlborn

UWert\_F1.1: Der in-situ U-Wert überschreitet den mit der Hotbox gemessenen Wert um 73 % (Mauerwerk) bis 82 % (Beton). Diese Überschreitung liegt signifikant ausserhalb der erwarteten Spannweite.

UWert\_F1.2: Der in-situ U-Wert überschreitet den mit der Hotbox gemessenen Wert um 35 % (Mauerwerk) bis 37 % (Beton). Diese Überschreitung liegt signifikant ausserhalb der erwarteten Spannweite.

UWert\_F2: Beim Mauerwerk liegt der im freien Feld gemessene U-Wert zwischen +12 % und +17 % über dem mit den Messgeräten in der Hotbox gemessenen Wert. Das erfüllt die Erwartung an eine Überschreitung. Dies trifft auch auf den Vergleich der Messgeräte in der Hotbox mit dem Hotboxwert zu. Beim Bauteil Beton treten unerwartete Überschreitungen zwischen +10 % (Messgerät / Hotbox) und +15 % (Messgerät / Messgerät) auf.

- greenTEG: Beim Bauteil Mauerwerk sind trotz der unterschiedlichen Konstruktionen die Hotboxwerte und die Messwerte in-situ fast gleich. Beim Beton treten Überschreitungen zwischen +11 % (Messgerät / Messgerät) und +27 % (Messgerät / Hotbox) auf.
- Testo: Beim Mauerwerk wird der Messwert des Gerätes in der Hotbox im freien Feld unterschritten, ist also tiefer. Das widerspricht der Erwartung, da das Bauteil im freien Feld einen höheren U-Wert hat. Beim Vergleich des Messgerätes in der Hotbox mit dem Hotboxwert liegt das Messgerät über dem Hotboxwert. Beim Bauteil Beton kann mit dem Messgerät im freien Feld keine gültige Messung erreicht werden.

Auch bei den Messungen in der Hotbox werden die Sensoren der Messgeräte einmal mit Wärmeleitpaste mit dem Mauerwerksprüfling verbunden und einmal mit einer schlechter leitenden Kontaktmasse. Bei keinem der Messgeräte kann eine eindeutige Tendenz in die erwartete Richtung, dass aus einer schlecht wärmeleitenden Verbindung ein tieferer U-Wert resultiert, festgestellt werden.

Als Fazit und resultierende Empfehlung aus dem Vergleich von Messgeräten unterschiedlicher Ausstattung und Qualität bleibt festzuhalten, dass die Geräteausstattung es erlauben sollte, den U-Wert mit der Formel F2 zu bestimmen. Eine Geräteausstattung mit Sensoren, die eine Berechnung des U-Wert nach Formel F1.1 oder F1.2 ermöglicht, steigert die Qualität der U-Wert Messung nicht.

Bezieht man sich auf Formel F2, dann weist das Messgerät von Ahlborn geringere Abweichungen als die anderen Messgeräte auf. Das Messgerät von greenTEG zeigt etwas höhere Abweichungen. Allerdings sind bei diesem Gerät durch die automatische Berechnung und Prüfung des U-Wertes gem. ISO 9869-1 einige mögliche Fehlerquellen durch falsche Mittelwertbildung etc. ausgeschlossen und die Datennachbearbeitung ist damit sehr nutzerfreundlich.

Das Messgerät mit dem temperaturbasierten Ansatz weist die höchsten Abweichungen auf. Hinzu kommt, dass das Messgerät bei einer geringen Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen keine plausiblen Messergebnisse liefert.

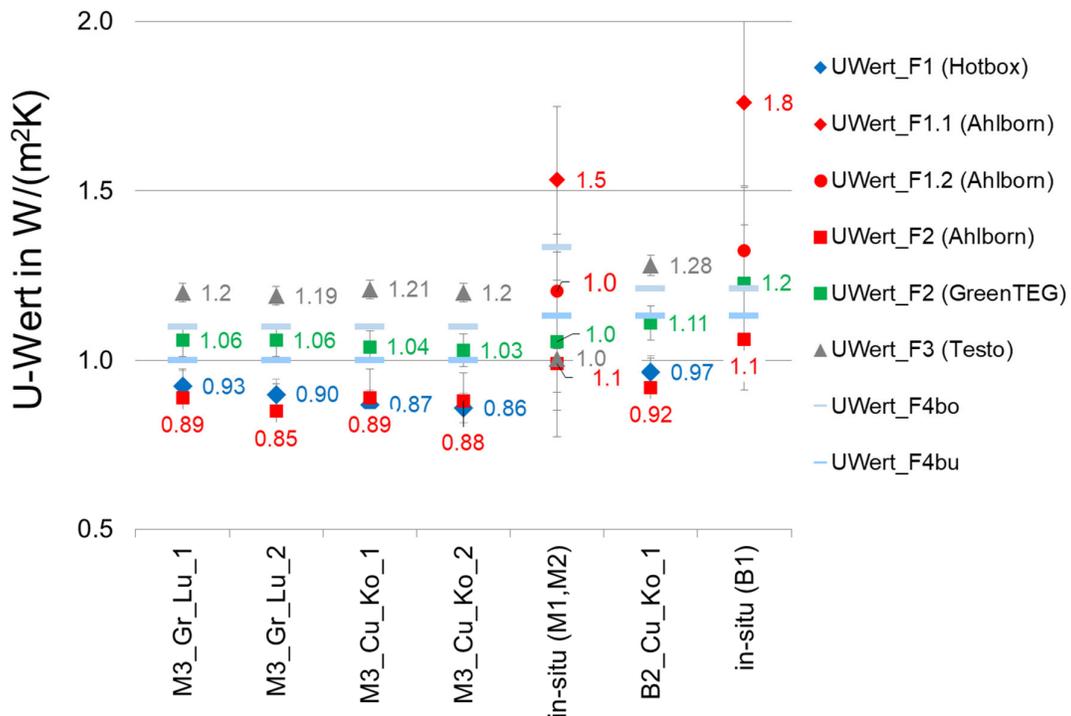


Abb. 3: Messergebnisse der in-situ Geräte im freien Feld (Mauerwerkswand M1/M2, Betonwand B1) und in der Hotbox (Mauerwerkswand M3, Betonwand B2). Verwendete Abkürzungen: M3: Mauerwerksprüfling Labor, B2: Betonprüfling Labor, Gr = Befestigung der Temperatursensoren am Prüfling mit Kontaktmasse «Putty» der Firma greenTEG, Cu = Befestigung der Temperatursensoren am Prüfling mit Kupferband, Lu = «trockene» Verbindung des Wärmeflussensors mit der Wand, Ko = Befestigung des Wärmeflussensors mit thermischer Leitpaste. Die Mauerwerkswand der Hotbox-Messung ist im Aufbau nicht identisch mit der Mauerwerkswand der in-situ Messung.

## 1.4 Simulationen

Das mittels der Messdaten validierte Simulationsmodell wird dafür verwendet, die folgenden Fragen zu klären:

- Tritt ein operativer Fehler des Wärmesensors auf?
- Welchen Einfluss haben die Befestigungsmittel bei glatten Oberflächen auf den ermittelten U-Wert?

Die Simulationen zeigen, dass der operative Fehler des Wärmeflussensors zwischen 0 % und 2 % liegen kann. Dies liegt etwas tiefer als die in [4] angegebene Unsicherheit.

Um den Einfluss der Klebe- und Kontaktmittel zu untersuchen, werden Befestigungsmittel mit den Wärmeleitfähigkeiten 0.8, 0.4, 0.2 und 0.1 W/(m K) und einer Dicke von 0.1 und 0.5 mm im Simulationsmodell berücksichtigt. In der Simulation sinkt mit der Einführung der Befestigungsmittel der ermittelte U-Wert minimal.

Auf der Grundlage der Simulationen liegt das Unsicherheitspotential infolge eines schlecht wärmeleitenden Klebe- oder Kontaktmittels im Vergleich zu einem gut leitenden Kontaktmittel bei einer Unterschätzung des U-Wertes um maximal 2 %.

Für das Vorgehen bei den Messungen ergibt sich daraus die folgende Empfehlung: um Fehler durch eingeschlossene Luftblasen zwischen Messfühler und Wandoberfläche zu vermeiden (dieser Fehler wurde nicht simuliert) sollte Wärmeleitpaste verwendet werden. Ist eine Verschmutzung der Wandoberfläche nicht zulässig, so kann bei glatten Wandoberflächen auf Wärmeleitpaste verzichtet werden.

## 1.5 Klebe- und Kontaktmittel

Eine fleckenfreie, sichere und wärmeleitende Befestigung der Sensoren auf dem Bauteil ist der Idealfall. Wärmeleitpaste hat wärmeleitende Eigenschaften, hinterlässt aber in der Regel Flecken. Die meisten gängigen Klebemittel haben eher geringe wärmeleitenden Eigenschaften, im Fokus der Untersuchung stehen daher die Hafteigenschaften und die Fleckenfreiheit. Insgesamt werden 13 unterschiedliche Klebematerialien auf sieben unterschiedlichen Oberflächen (matte / glänzende Farbe auf Tapete und Gipskarton, Weissputz und Rauputz (Abrieb 1 mm und 3 mm)) getestet. Für glatte Oberflächen sind bezüglich der Kombination aus Rückstandsfreiheit und Haftung zwei Klebematerialien besonders zu empfehlen:

- Scotch 244 High Precision (einseitiges Klebeband)
- Tesa Profi-Malerband «Innen» (einseitiges Klebeband)

Beide Klebemittel haften jedoch auf Rauputz nicht gut. Bezüglich Fleckenfreiheit ist auch folgendes Produkt empfehlenswert. Es haftet allerdings nicht auf allen Untergründen zuverlässig.

- Strips 3M Command (zweiseitig haftende Pads)

Auf rauen Untergründen haften die beiden nachfolgenden Materialien gut, sie hinterlassen allerdings auf glatten Oberflächen ölige Flecken. Auf den getesteten rauen Oberflächen sind diese Rückstände nicht zu sehen, sondern allenfalls bröselige Krümel, die mit einer Kugel aus demselben Material abgetupft werden können.

- Blue-Tack
- UHU Patafix

## 2. Einführung

### 2.1 Hintergrund

Um die Klimaschutzziele der Schweiz [5] zu erreichen, muss der gesamte Gebäudebestand inklusive der historischen Gebäude energetisch verbessert werden. U-Wert Messungen eignen sich für Gebäude, bei denen die Konstruktion unbekannt ist und eine zerstörungsfreie, sichere Aussage zu den thermischen Eigenschaften getroffen werden soll. Dies sind Gebäude, die vor 1960 erstellt wurden und eventuell sogar unter Bestandsschutz stehen. Für eine U-Wert Messung kommen rund 10 % des schweizerischen Gebäudebestands in Frage [6]. Für die U-Wert Messung vor Ort sind seit einigen Jahren handliche Geräte erhältlich. Das Versprechen, verlässliche Messungen mit geringem Aufwand und Expertenwissen zu ermöglichen, zielt auf eine breite Anwendergruppe. In der praktischen Anwendung zeigt es sich allerdings, dass viele Randbedingungen als Einflussparameter (z. B. Strahlung, Wind, Temperatur, Kontaktpaste) zu berücksichtigen sind und gerade bei ungedämmten, schweren Konstruktionen die Messergebnisse häufig stark von den berechneten U-Werten abweichen. Vor diesem Hintergrund erscheint eine praxisorientierte Anwendungshilfe sinnvoll.

#### 2.1.1 Messprojekte U-Wert

U-Wert Messungen werden in der Praxis meist im Rahmen von Gebäudeanalysen im Bereich Energie und Bauphysik erstellt, wenn der vorhandene U-Wert nicht berechnet werden kann (z. B. keine vorhandenen Materialkennwerte). In der Wissenschaft dienen die Messungen auch zur Gebäudeanalyse, die meisten Veröffentlichungen thematisieren aber (auch) den Unterschied zwischen Messungen und Berechnungen des U-Wertes. Nachstehend werden die wesentlichen Veröffentlichungen der Recherche aufgeführt. Aufgrund der Messunsicherheit bei in-situ Messungen werden hier nur Abweichungen  $\geq 20\%$  als signifikant bewertet [4].

- In [7] wird festgestellt, dass die in der luxemburgischen Gebäudetypologie angegebenen U-Werte deutlich über jenen liegen, die gemessen werden. Grundlage bilden die Messungen von sechs Konstruktionen. Die gemessenen Werte (MW) lagen zwischen 0.9 und 1.2 W/(m<sup>2</sup> K), die entsprechenden Werte aus der Typologie (TW) lagen zwischen 1.4 und 2.1 W/(m<sup>2</sup> K). Bezogen auf die einzelnen Wertpaare (MW und TW) ergeben sich Abweichungen zwischen +24 % und +91 % ((TW - MW)/MW). Die Gebäudetypologie bildet die gesetzliche Arbeitsgrundlage für die Bestandsaufnahme von Gebäuden durch Energieexperten in Luxemburg. Die Autoren machen diese eher konservativen Werte für Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch von Gebäuden verantwortlich. Die Messungen wurden mit einer Wärmeflussplatte der Firma Ahlborn durchgeführt. Eine Messunsicherheit wird nicht ausgewiesen.
- In [8] wurden im Rahmen von Gebäudeanalysen 36 U-Wert Messungen vorgenommen. Von der Tendenz her ist der berechnete U-Wert zwischen +22 % und +188 % höher als der Messwert. Bei den Messungen wurden Wärmeflussplatten der Firma Hukseflux eingesetzt. Als Messunsicherheit werden 14 % angegeben.
- In [9] traten für zehn Messungen bei sechs Konstruktionen Abweichungen zum Rechenwert zwischen -39 % und +116 % auf. Signifikant sind zwei Über- und zwei Unterschreitungen. Zur Messunsicherheit werden nur bei einigen Messungen Angaben gemacht (zwischen 14 % und 15 %), die verwendeten Messgeräte werden nicht spezifiziert.
- In [10] wurde der U-Wert von sechs unterschiedlichen Konstruktionen (schwer bis leicht) gemessen. Dabei wurden drei unterschiedliche Wärmeflussplatten getestet und zugleich die Oberflächentemperatur innen und aussen erfasst. Die Wärmeflussplatten sind quadratisch (10\*10 cm<sup>2</sup> und 25\*25 cm<sup>2</sup>) oder rund (Ø 8 cm). Ein weiteres Messgerät bestimmt den U-Wert indirekt (d. h. ohne Erfassung des Wärmestroms), indem es nur die Innentemperatur und die Oberflächentemperatur auf der Innenseite misst. Die Messwerte wurden mit berechneten Werten verglichen. War die Konstruktion der berechneten Werte bekannt und wurde die Messung sorgfältig durchgeführt, so wurde eine gute Übereinstimmung erzielt (die Abweichungen lagen meist im Bereich der Messunsicherheiten). Einzig die indirekte U-Wert Messung ergibt unplausible Ergebnisse. Je nach Messkonditionen ist nach Meinung der Autoren mit einer Messunsicherheit zwischen 8 und 50 % auszugehen. Die Unsicherheit für die eigenen

Messungen, sowie für die durchgeführten Berechnungen wird sehr ausführlich hergeleitet. Die verwendeten Geräte werden nicht weiter spezifiziert.

- In [11] werden insgesamt 103 Messungen an 32 Objekten und 9 verschiedenen Wandtypen vorgestellt. Es wird mit sechs baugleichen Geräten der Firma greenTEG gemessen. Es wurden Abweichungen zwischen den gemessenen Mittelwerten (MW) und Berechnungen (BW) zwischen +93 % und -45 % festgestellt ( $(BW-MW)/MW$ ). Pro Wandtyp werden drei signifikante Abweichungen nach oben und fünf Abweichungen nach unten festgestellt. Ohne (nachvollziehbare) Herleitung wird eine «Messgenauigkeit» von ca. 20 % bis 30 % angesetzt.
- In [12] werden die U-Werte von neun Bestands-Konstruktionen gemessen und diese gleichzeitig jeweils von zehn Energieberatern berechnet. Die Standardabweichung aus zehn Einzelwerten liegt für die Berechnungen zwischen  $0.04 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  und  $0.34 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . Bei sieben von neun Konstruktionen treten Abweichungen auf, wobei die berechneten U-Werte über den gemessenen liegen. Die Abweichungen der Messwerte von den Mittelwerten aus den Berechnungen (B) liegen zwischen 12 und 111 % ( $(B - MW)/MW$ ). Auf 95 %-Basis ist die Abweichung zwischen dem Messwert und dem Mittelwert der Berechnung allerdings nur bei zwei U-Werten signifikant. Es wird ein Messgerät der Firma greenTEG verwendet. Als Messunsicherheit werden seitens der Firma 14 % angegeben.
- In [13], einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1981, wurden insgesamt 22 Konstruktionen gemessen und mit den Berechnungswerten verglichen. Es werden drei unterschiedliche Messgeräte getestet. 16 Messungen hatten Abweichungen, die geringer als 10 % sind. Von der allgemeinen Tendenz her, waren die Messwerte tiefer als die Berechnungswerte. Der Messfehler (im Sinne eines Gerätefehlers) wird zwar erwähnt und berücksichtigt, die genaue Höhe aber nicht angegeben.

In drei von sieben Veröffentlichungen ist die Mehrzahl der berechneten U-Werte höher als die gemessenen U-Werte ([7]: +24 - +91 %, [8]: +22 - +188 %, [12]: +12 - +111 %). In zwei Veröffentlichungen werden Abweichungen nach oben und nach unten festgestellt ([9]: -39 - +116 %, [11]: -45 - +93 %). In zwei Veröffentlichungen [10], [13] werden keine signifikanten Abweichungen festgestellt. Es ist davon auszugehen, dass die Messungen bei den obengenannten Veröffentlichungen sorgfältig durchgeführt wurden, da es sich insgesamt um Forschungsprojekte handelte. Es kann vermutet werden, dass die vorhandenen Abweichungen zum Teil an den Sicherheitszuschlägen bei der statischen U-Wert-Berechnung (z. B. bei den Annahmen zu den Oberflächenübergangswiderständen) liegen, zum anderen aber auch an der Messmethodik.

### 2.1.2 Vorhandene Messanleitungen

Das verwendete Messprinzip ist nicht neu. Aus dem Jahr 1981 steht eine Messanleitung des SIA [13] zur Verfügung. Nach 40 Jahren ist diese Messanleitung, die handwerklich gut gemacht ist, inhaltlich aufgrund des Technikwandels nicht mehr vollumfänglich aktuell. Weiter gibt es Herstellerhinweise, die in Tabelle 5 zusammengefasst sind.

Tabelle 5: Vorgaben aus vorhandenen Messanleitungen.

Thema	Almemo (Ahlborn)	gSKIN U-Value KIT (greenTEG)	Testo 635-2 U-Wert-Set (Testo)
Temperaturunterschied $\theta_i - \theta_e$	Bei normaler Dämmung $\Delta\theta > 10$ K, bei starker Dämmung $\Delta\theta > 20$ K, möglichst keine Temperaturschwankungen [14]	Mindestens 5 K [15]	„deutliche Temperaturdifferenz“ (ideal: $> 15$ °C) [16]
Dauer der Messung	ca. zwei bis mehrere Tage [14]	Mindestens 72 h [15], bzw. bis Gültigkeit gemäss ISO 9869 erreicht ist [17]	Eine Nacht [16]
Messtakt	Keine Angabe	Keine Angabe	15 Minuten [16]
Messposition allgemein	Keine direkte Sonnenstrahlung (Schutz z. B. durch «vorgelagertes Ableitblech»), Messung bei trockener Witterung und an trockenen Flächen. Heizkörpernähe und Fensternischen meiden. [14]	Keine direkte Sonnenstrahlung vorhanden / wettergeschützt / Abstand zu möglichen Wärmebrücken / Abstand zu Wärmequellen (Heizung) [15]	Temperaturfühler innen vor Wärmestrahlung und lokalen tiefen Temperaturen schützen (nicht auf Fensterbank oder Heizung legen) [16]
Position Temperatursensoren	Lufttemperatur: Abstand ca. 10 cm von Wärme-flussplatte. Innen und aussen ca. 10 cm Entfernung von Wand. [14]	Lufttemperatur: Innen und aussen auf gleicher Höhe [15] Temperatursensoren in mindestens 5 cm Abstand zur Wand (innen und aussen) [17]	Sensor im Fühlerstecker: auf gleicher Höhe wie Sensoren Oberflächen-temperatur [16] Oberflächentemperaturfühler Abstand voneinander jeweils 10 cm [16] Wandabstand Temperaturfühler 30 cm [16]
Befestigung Oberflächentemperatur-sensoren	Mit Klebegand auf Wandoberfläche [14]	n. a.	Mit mitgeliefertem Haftknet (BlueTack)
Befestigung Wärmeflussplatte	Vorzugsweise an Innenwand. Unterseite homogen, Platte mit Klebeband an Plattenrand an Wand befestigen [14]	z. B: Mit Klebeband [15] Hinweis, dass eine Befestigung mit Paste Rückstände enthalten kann [18]	Mit Knetmasse / Montagestreifen (Montagestreifen werden mitgeliefert, Knetmasse kann bei Anbieter bestellt werden) [19] Achtung: Hinweise eigentlich für anderes, Mess-System (gO)
Während Messung	Ausgeglichene Gebäudeinnentemperatur (Richtwert ca. 20 °C) [14]	Temperatur im Inneren möglichst konstant halten, nicht lüften [15]	Keine Angaben
Dokumentation	Keine Angaben	Fotos machen [18]	Keine Angaben
Anleitung Software	vorhanden	vorhanden	vorhanden

### 2.1.3 Norm ISO 9869-1

Die Norm ISO 9869-1 [4] befasst sich mit in-situ Messungen des U-Wertes. Sie beinhaltet Vorgaben für die Messung von U-Werten vor Ort mit dem Messverfahren der Wärmefluss-Methode. Bei dieser Methode muss das Messgerät mindestens aus einem Wärmeflussensor und zwei Temperatursensoren bestehen. Die nachfolgende Zusammenfassung konzentriert sich auf die Abschnitte der Norm, die die Messung des U-Wertes betreffen.

#### 2.1.3.1 Geräte

- Wärmeflussensor: dieser soll möglichst flach sein und einen möglichst geringen thermischen Widerstand aufweisen.
- Sensoren zur Erfassung der Oberflächentemperatur: dies sollen flache Thermoelemente oder Widerstandsthermometer sein.

– Sensoren zur Erfassung der Lufttemperatur: die Sensoren sollen für den entsprechenden Messbereich ausgewiesen sein und gegen solare und thermische Strahlung abgeschirmt sowie belüftet sein. Der Abschnitt «Kalibration» in der Norm wird hier nicht betrachtet, da wir davon ausgehen, dass die Messgeräte seitens des Herstellers kalibriert werden und seitens der Nutzer regelmässig nachkalibriert werden (i.d.R. durch den Hersteller).

#### 2.1.3.2 Messungen

Der Messort soll repräsentativ und homogen sein (nicht auf Rissen, Wärmebrücken etc.). Dies kann mit einer Thermographie-Aufnahme überprüft werden. Der Installationsort soll regen- und schnee geschützt sein und keine direkte Solarstrahlung erhalten.

- Installation Wärmeflussensor: Der Wärmeflussensor soll auf derjenigen Oberfläche angebracht werden, die konstantere Temperaturen aufweist (i.d.R. innen). Es können mehrere Wärmeflussensoren installiert werden, um einen aussagekräftigen Mittelwert bestimmen zu können. Der Wärmeflussensor soll ganzflächigen, direkten Kontakt zum Bauteil haben. Falls erforderlich, kann Kontaktpaste verwendet werden.
- Installation Temperatursensoren: Wenn der Wärmedurchlasswiderstand (R) oder die Wärmeleitfähigkeit ( $\Lambda$ ) gemessen werden, dann müssen Oberflächentemperatursensoren verwendet werden. Diese müssen auf der Innenseite unter dem oder nahe beim Wärmeflussensor befestigt werden. Auf der Aussenseite ist der Sensor direkt «gegenüber» zu befestigen.

#### 2.1.3.3 Datenerfassung

Die Messdauer beträgt mindestens drei Tage (72 h), wenn die Temperatur im Bereich des Wärmeflussensors konstant ist. Die Messdauer kann aber auch mehr als sieben Tage betragen. Die notwendige Dauer wird über geeignete Abbruchkriterien basierend auf den Messdaten bestimmt (siehe dazu Abschnitt 3.3.5 in diesem Bericht). Das Aufzeichnungsintervall liegt zwischen 0.5 und 1.0 h und soll weniger als die Hälfte der kleinsten Zeitkonstante der verwendeten Sensoren betragen.

Die Randbedingungen für die Messung sollen möglichst stabil sein, d. h. störende Einflüsse von innen (Heizungen, Ventilatoren, Wärmebrücken) und aussen (Solarstrahlung) sind bestmöglich auszuschliessen.

#### 2.1.3.4 Messgenauigkeit

Die Messunsicherheit setzt sich aus den folgenden Faktoren zusammen:

- (1) Kalibrationsgenauigkeit von Wärmeflussensor und den
- (2) Temperatursensoren: zusammen 5 % des Messwertes für gut kalibrierte Sensoren
- (3) Variationen aufgrund von Unterschieden im thermischen Kontakt zwischen Wand und Wärmeflussensor: 5 % des Mittelwertes bei sorgfältig installierten Wärmeflussensoren. Kann durch den Einsatz von mehreren Wärmeflussensoren verringert werden.
- (4) Operativer Fehler des Wärmeflussensors unter der Voraussetzung, dass dieser in der Auswertung über einen Korrekturfaktor berücksichtigt ist. Der Korrekturfaktor kann entfallen, wenn der Wärmeflussensor sehr dünn ist und einen geringen thermischen Widerstand aufweist. Verbleibende Unsicherheit: 2 - 3 %
- (5) Fehler durch fluktuierende Temperaturen und Wärmeströme über die Messdauer. Wenn geeignete Abbruchkriterien gewählt werden (siehe dazu Abschnitt 3.3.5 in diesem Bericht) beträgt er ca.  $\pm 10$  % des Messwertes. Zu einer Reduktion tragen weiter eine längere Messperiode und möglichst stabile Innenraumtemperaturen bei.
- (6) Temperaturunterschiede im Raum und Unterschiede zwischen Luft- und Strahlungstemperatur: 5 %

Wenn die obigen Bedingungen erfüllt sind liegt die Messunsicherheit bei guten Messgeräten und sorgfältigem Messen zwischen

$$\sqrt{5^2 + 5^2 + 3^2 + 10^2 + 5^2} \% = 14 \% \text{ und } (5+5+3+10+5) \% = 28 \%$$

Die Unsicherheit kann aber auch höher sein. Folgende Ursachen können dazu führen:

- Grosse Schwankungen der Innentemperatur im Verhältnis zu der Temperaturdifferenz über das Bauteil
- Das Element ist sehr schwer und die Messdauer zu kurz

- Das Element ist solarer Strahlung oder anderen, grossen thermischen Einflüssen ausgesetzt
- Falsche oder keine Einschätzung des operativen Fehlers des Wärmeflussensors
- Die Messgenauigkeit beim U-Wert hängt von der Definition der Umgebungstemperatur und ihrer Messung ab.

#### 2.1.3.5 Vergleich von Messwerten und Berechnungswerten

Die Norm geht auch auf einen möglichen Vergleich zwischen Messwerten und Berechnungswerten gemäss ISO 6946 ein. Es werden Abweichungen zwischen Mess- und Berechnungswert von >20 % als signifikant bewertet.

## 2.2 Projekt

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, die Anwendung von U-Wert Messungen zu unterstützen, indem das Vorgehen bei der in-situ Messung erläutert und Hinweise für die Handhabung der Messgeräte gegeben werden (Anwendungshilfe). Eine ergänzende Checkliste erleichtert den Behörden eine qualitative Überprüfung von Messergebnissen.

Basis für die Erstellung der Anwendungshilfe ist es, die wesentlichen Einflussparameter auf die Qualität einer Messung einzugrenzen. Dazu wird der U-Wert mit drei mobilen Messgerätetypen unterschiedlicher Hersteller bestimmt. Damit können Aussagen zur Messgenauigkeit der mobilen Geräte getroffen werden. Zusätzlich dazu werden ein Beton- und ein Mauerwerkswandausschnitt unter definierten Einflüssen im Labor in einer Doppelklimakammer (Hotbox) gemessen. Mit thermisch dynamischen Simulationen werden ergänzend einzelne Einflussgrössen analysiert und Randbedingungen variiert. Die Messungen im freien Feld von zwei mit den Labor-Prüfkörpern ähnlichen Konstruktionen im Labor unterstützen die Identifikation kritischer Parameter und die Ableitung von Hinweisen für die Wegleitung.

Eine grösstmögliche Ähnlichkeit der Konstruktionen für die Messungen vor Ort und im Labor wird dadurch gewährleistet, dass die Laborprüfkörper einer Siedlung entnommen werden, die etappenweise abgerissen wird und in deren baugleichen Gebäuden auch die in-situ Messungen stattfinden.

Grundsätzlich ist eine Befestigung der Sensoren, insbesondere der Wärmeflussplatte mit einer Wärmeleitpaste sinnvoll. Da diese Pasten aber Flecken auf der Wand hinterlassen können, kann dies auf der Innenseite von Wänden unerwünscht sein. Im Rahmen des Projektes werden daher diverse Befestigungsmöglichkeiten hinsichtlich ihrer Fleckenfreiheit und Haftung auf unterschiedlichen Oberflächen untersucht.

Dieser Schlussbericht fasst die Erkenntnisse aus dem Projekt zusammen.

## 3. Vorgehen

### 3.1 Klebe- und Kontaktmittel

#### 3.1.1 Testaufbau

Bei der U-Wert Messung mit mobilen Geräten wird die Wärmeflussplatte direkt auf die Innenseite des Bauteils gesetzt und am Rand mit Klebeband fixiert. Bei sehr unregelmässigen Oberflächen (z. B. Rauputz) kann zwischen Oberfläche und Sensor auch eine ausgleichende Paste aufgebracht werden. Diese hat idealerweise sehr gut wärmeleitende Eigenschaften. Sowohl die Klebebänder als auch die Kontaktmasse sollten auf dem Bauteil keine Flecken hinterlassen. Da mitunter lange Messzeiträume erforderlich sind, besteht beim Materialtest der Anspruch, dass die Fleckenfreiheit auf der Oberfläche für eine Messung von mindestens zwei Wochen gewährleistet ist.

Es werden unterschiedliche Befestigungsmaterialien auf unterschiedlichen Oberflächen (vgl. Abschnitt 3.1.2) getestet. Für den Test stehen von jedem Oberflächentyp jeweils 3 identische Wandoberflächenprüflinge zur Verfügung (also drei Prüfsets).

Die Tests werden in einem Innenraum durchgeführt. Da der Raum klimatisiert ist und ohne direkte Sonneneinstrahlung, ist das Klima recht konstant. Zu Beginn von Test 1 (04.09.18) betrug die relative Feuchte im Raum 60 %, die Raumlufttemperatur lag bei 21.7 °C.

Es werden die folgenden Tests durchgeführt.

- Rückstandsfreiheit und Haftung auf Oberfläche: Beim ersten Test werden Klebmaterialien auf allen Oberflächen nach unterschiedlich langen Haftzeiträumen auf Rückstandsfreiheit getestet (Tabelle 6). Grund für die Anzahl unterschiedlicher Auswerte-Dauern ist, dass von manchen Klebmaterialien nur begrenzte Mengen verfügbar waren (Kosten, kleine Muster von Hersteller erhalten). Pro Materialtyp werden in diesem Test zwei Wandoberflächenprüflingssets (ein Prüfling ist exemplarisch in Abb. 22 gezeigt) mit Klebemustern versehen. Der Grund für die Doppelprüfung ist, dass die Prüflinge eventuell etwas unterschiedliche Oberflächeneigenschaften haben und daher eine grössere Bandbreite an Ergebnissen bereitgestellt werden soll. Damit stehen pro Klebmaterial für jeden Testzeitpunkt zwei Proben zur Verfügung. Der Test dauerte vom 04.09.2018 bis zum 15.10.2018.
- Haftung Sensor auf Oberfläche: Die Klebmaterialien, die keine Spuren hinterlassen, werden in einem zweiten Durchgang auf der Oberfläche des dritten Wandoberflächenprüflingssets für die Dauer von zwei Wochen daraufhin getestet, ob sie mit dem Gewicht des Sensors auf der Oberfläche haften. Der Sensor ist mit einem steifen Kabel versehen, um eventuellen Schälkräften während der Messung durch Nutzer (Kabel wird bewegt und speziell nach oben gezogen, also von der Wand «abgeschält»), Rechnung zu tragen. Während des Tests wird aus diesem Grund nach drei, sieben und 14 Tagen das «Kabel» leicht bewegt (rechts, links, oben). Der Test wird zwischen dem 09.10.2018 und dem 23.10.2018 durchgeführt.

Tabelle 6: Getestete Haftdauern der unterschiedlichen Klebe- und Kontaktmittel.

	Klebmaterial ID 1, 2, 5, 6, 13	Klebmaterial ID 3, 4, 7, 8, 10, 12
Tag 1	x	
Tag 2	x	
Tag 4	x	
Tag 8	x	
Tag 16	x	x
Tag 32	x	x

### 3.1.2 Getestete Materialien

#### 3.1.2.1 Wandoberflächenprüflinge

Es werden sieben unterschiedliche Oberflächen getestet. Für den Test stehen jeweils drei identische Trägerplatten zur Verfügung (a, b, c; Tabelle 7). Als Trägerplatte werden Gipskartonplatten eingesetzt.

Tabelle 7: Betrachtete Oberflächenmaterialien. Der Schlüssel bildet sich aus der Nummer für das Oberflächenmaterial und dem Buchstaben für die Trägerplatte (z. B. 1a, 1b und 1c).

Material	Schlüssel			
Matte Farbe auf Tapete	1	a	b	c
Matte Farbe auf Gipskarton	2	a	b	c
Glänzende Farbe auf Tapete	3	a	b	c
Glänzende Farbe auf Gipskarton	4	a	b	c
Weissputz	5	a	b	c
Rauputz / Abrieb (1 mm)	6	a	b	c
Rauputz / Abrieb (3 mm)	7	a	b	c

#### 3.1.2.2 Klebe- und Kontaktmittel

Tabelle 8 zeigt die untersuchten Klebe- und Kontaktmittel. Grundsätzlich ist bei der Auswahl der Klebe- und Kontaktmittel nicht ausschlaggebend, für welche Klebeaufgabe die Hersteller das Produkt vorsehen, sondern ob es für die Befestigung der Sensoren geeignet erscheint. Daher ist es möglich, dass ein Klebe- und Kontaktmittel in den durchgeführten Tests weniger gut abschneidet, den Zweck, für den es entwickelt

wurde, aber hervorragend erfüllt. Die hier erfolgten Bewertungen beziehen sich ausschliesslich auf das Testsetting im Projekt und sind daher keine allgemeine Bewertung der genannten Produkte. Zu den einzelnen Produkten sind seitens Hersteller keine Angaben zur Wärmeleitfähigkeit verfügbar.

Tabelle 8: Untersuchte Klebe- und Kontaktmittel.

Produkt	ID	Produkt	ID
Scotch 244 High Precision (einseitiges Klebeband)	1	4 M Thermally Conductive Tapes 8805 (doppelseitiges Klebeband)	8
Scotch 2070 (einseitiges Klebeband)	2	5 M Thermally Conductive Tapes 5590H (doppelseitiges Klebeband)	9
Blu-Tack (Haft-/Kontaktmasse)	3	Dreyer Thermal Tape DS-TAP_B_a2_1.2-0.125 (doppelseitiges Klebeband)	10
UHU Patafix (Haft-/Kontaktmasse)	4	PDMS (Haft-/Kontaktmasse)	11
tesa Profi-Malerband "Innen" (einseitiges Klebeband)	5	Strips 3M Command (doppelseitiges Klebeband)	12
tesa Profi-Malerband "Tapete" (einseitiges Klebeband)	6	Scotch Removable (einseitiges Klebeband)	13
3 M Thermally Conductive Tapes 8815 (doppelseitiges Klebeband)	7	tesa Powerstrips Poster (doppelseitiges Klebeband)	14

### 3.2 In-situ Messungen

#### 3.2.1 Messgebäude

Die Messgebäude, an denen die in-situ Messungen vorgenommen werden, sind Mehrfamilienhäuser mit Standort Basel. Die Gebäude verfügen über Mauerwerkswände in den oberen Geschossen, das Sockelgeschoss ist aus Beton. Es ist davon auszugehen, dass die Gebäude baugleich sind. Da die Siedlung etappenweise erneuert wird, bestand die Möglichkeit, im Sommer 2019 aus Gebäude 3 (Abb. 4) ein gemauertes und ein betoniertes Wandstück zu entnehmen und für die Labormessung zu verwenden. Die Messungen vor Ort werden im Winter 2019/2020 in zwei noch beheizten Gebäuden durchgeführt. Im Gebäude 1 (Abb. 4) erfolgen die Messungen am Mauerwerk, im Gebäude 2 die Messungen an der Betonwand.

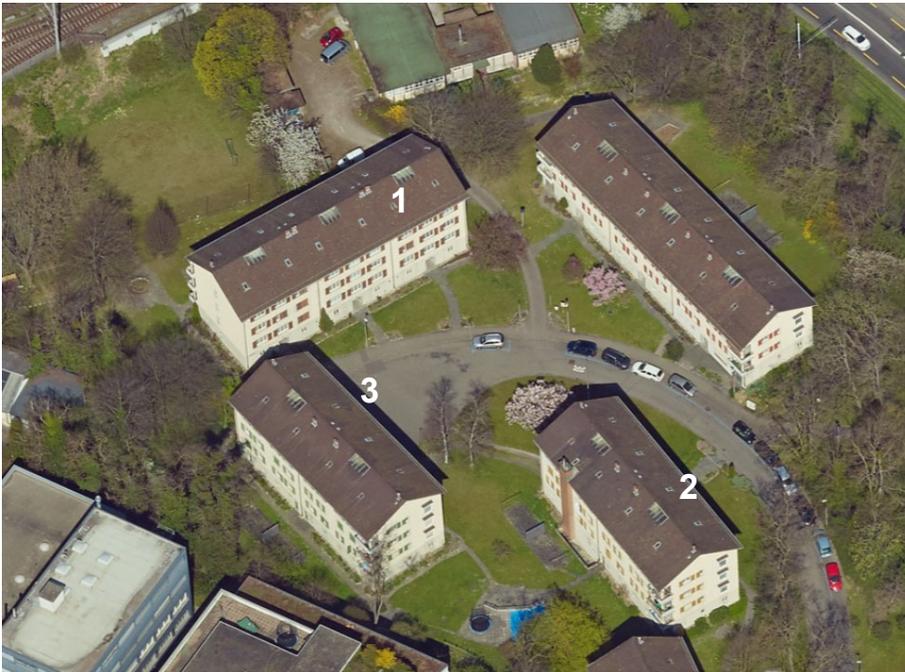


Abb. 4: Luftaufnahme der Siedlung am Eidgenossenweg, Basel. Aus Gebäude 3 können im Rahmen des Abrisses je ein Wandstück in Mauerwerk und Beton entnommen werden. In den Gebäuden 1 und 2 werden die in-situ Messungen durchgeführt.

### 3.2.2 Wände für die in-situ Messung und Prüfkörper

Der Prüfkörper Mauerwerk ist ungedämmt (Abb. 5), der Prüfkörper Beton (Abb. 7) hat innenseitig eine Dämmung aus ca. 1.5 cm starkem Kork. Die Mauerwerkswände werden in den oberen Stockwerken dünner. Die in-situ Messung wird im 3. OG durchgeführt. Die Entnahme des Mauerwerksprüfkörpers für die Labormessung erfolgt im 1. OG. Es resultieren daher leider unterschiedliche Bauteilstärken für die in-situ Messung und die Labormessung.

Die Materialdaten für die Baustoffe zeigt Tabelle 9. Die Wandaufbauten sind Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 9: Materialdaten. Die Rohdichte wird nur angegeben, wenn das Material gewogen werden kann.

	Rohdichte (gewogen)	Wärmeleitfähigkeit min.	Wärmeleitfähigkeit max.	Quelle min. / max.
	kg/m <sup>3</sup>	W/(m K)	W/(m K)	
Aussenputz	-	0.87	0.87	[20] / [21]
Innenputz		0.70	0.87	[20] / [21]
Gipsmörtel		0.70	0.87	[20] / [21]
Hochofenschlacke		0.30	0.40	[22] / [22]
Kork		0.041	0.55	[21] / [23]
Mauerwerk inkl. Fu- gen	1440	0.48	0.58	[20] / [21]
Beton	2040	1.2	1.35	[20] / [21]

Tabelle 10: Wandaufbauten von aussen nach innen. Ober- und Untergrenze U-Wert gemäss [24]. Als Index für den berechneten U-Wert wird im weiteren Text wird der Buchstabe b verwendet.

Messung	Wandtyp	Bezeichnung	Material	Dicke cm	U-Wert min./max. $W/(m^2 K)$	Quelle
in-situ	Mauerwerk (33 cm)	M1 / M2	Aussenputz	2.0	1.1 / 1.3	Min: [20], [22] Max: [21], [22]
			Mauerwerk	24.0		
			Kalkmörtel	1.0		
			Hochofenschlacke	5.0		
			Innenputz	1.0		
in-situ	Beton (44.4 cm)	B1	Aussenputz	1.5	1.1 / 1.2	Min: [20], [23], Max: [21]
			Beton	40.0		
			Kork	1.6		
			Innenputz	1.3		
Labor	Mauerwerk (42.0 cm)	M3	Aussenputz	2.0	1.0 / 1.1	Min: [20], Max: [21]
			Mauerwerk	39.0		
			Innenputz	1.0		
Labor	Beton (44.4 cm)	B2	Entspricht Aufbau B1		1.1 / 1.2	siehe B1



Abb. 5: Prüfkörper Mauerwerk, die Schnittkanten sind sauber, leider sind in den Eckbereichen oben jeweils Putzstücke abgebrochen.



Abb.6: Kernbohrung Mauerwerkswand 3. OG. Zusätzlich zu den Ziegelsteinen ist (schwarz) ca. 5 cm Hochofenschlacke im Aufbau vorhanden. Quelle Bild: Okan Sevim, Ferrara Architekten AG



Abb. 7: Prüfkörper Beton, die Innenseite ist oben. Gut zu erkennen ist die ca. 1.6 cm starke Dämmschicht, welche aus Kork besteht (Quelle Bilder: BFH).

### 3.2.3 Messaufbau U-Wert in-situ

Die in-situ Messungen werden im Zeitraum zwischen dem 12.12.2019 und dem 02.03.2020 durchgeführt. Die drei Räume, in denen gemessen wird, sind unbewohnt, aber durchgängig beheizt. Die Messungen 1 - 6 werden an der Wand Mauerwerk 1 (M1), Messung 7 wird an der Wand Mauerwerk 2 (M2) durchgeführt. Messung 7 dient als Kontrollmessung, um zu sehen, ob die Mauerwerkswände im Gebäude vergleichbar sind. Messungen 8 – 11 erfolgen an der Wand Beton 1 (B1).

Es werden drei in-situ U-Wert Messgeräte unterschiedlicher Hersteller mit den Messfühlern gemäss Tabelle 11 eingesetzt. Die Geräte geben selber einen U-Wert aus, wie dieser sich jeweils berechnet, wird in Kapitel 3.3.6, Tabelle 14 beschrieben.

Tabelle 11: Verwendete Geräte für die in-situ U-Wert Messungen (alle Angaben gemäss Herstellerdatenblatt).

	Almemo [1]	gSKIN U-Value KIT [2]	Testo 635-2 U-Wert-Set [3]
Firma	Ahlborn	greenTEG	Testo
Wärmeflussplatte	1	1	-
Abmessungen Wärmeflusspl. (mm)	120*120*1.5	30*30*2	-
Fühler $T_{si}$	1		3
Fühler $T_{se}$	1	-	-
Fühler wandnahe $T_i$	1	1	
Fühler $T_i$ am Fühlerstecker des Messgerätes (Abb. 8)	-	-	1
Fühler $T_e$	1	1	1
Datum Kalibration	05.11.2018	06.08.2018	10.2018
Genauigkeitsangabe Temperaturfühler	Max $\pm 1.5$ K oder $\pm 0.004 *  t $ K <sup>1)</sup>	$\pm 0.5$ (-10...+65 °C) $\pm 2.0$ (-55...+125 °C)	Max $\pm 0.3$ °C (-60 bis +60 °C), $\pm(0.2$ °C + 0.3 % v. Mw.)
Genauigkeitsangabe Wärmeflussplatte	5 % d. Kalibrierw. bei 23 °C	: $\pm 3$ %	n. a.

1) |t| ist der Zahlenwert der Temperatur in °C ohne Berücksichtigung des Vorzeichens



Abb. 8: Messgerät Testo und Unterseite mit Position Lufttemperaturfühler (Pfeil), Quelle (ohne Pfeil): Testo.

Die Messfühler werden auf unterschiedliche Art und Weise auf der Wandoberfläche befestigt:

- Punktuelle Befestigung der Oberflächen-Temperaturfühler
  - Kontaktmassen: «Putty» (Firma greenTEG), UHU «Patafix» und Bostik (Arkema) «Blu tack»
  - Sonstiges: Fühler mit Kupferklebeband an der Wand befestigt
- Flächige Befestigung Wärmeflussplatte
  - Kontaktmassen: «Putty» (Firma greenTEG), «Wacker» = (Silikon) Wärmeleitpaste der Firma Wacker ( $\lambda$  0.6 – 0.8 W/(m K)).
  - Sonstiges: Haftpads «Mount» (Firma greenTEG), «trockene» Verbindung («Luft» = Wärmeflussplatte nur mit Klebeband an der Wand befestigt)

Der Grund für die unterschiedlichen Befestigungsarten ist, die Erwartungshaltung, dass sich unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der Befestigung auf das Messergebnis auswirken. Speziell bei der Befestigung der Wärmeflussplatte ist die Annahme, dass bei keiner oder einer wenig leitenden Verbindung zwischen Wandoberfläche und Wärmeflussplatte ein eher zu tiefer U-Wert gemessen wird.

Aus den genannten Befestigungsvarianten resultieren die in Tabelle 12 zusammengestellten Messungen. Bei der Benennung der Messungen (Spalte 1, Tabelle 12) kommt die Systematik gemäss Abb. 9 zum Einsatz.

Tabelle 12: In-situ Messungen an der Mauerwerks- und der Betonwand.

Verwendete Abkürzungen: M1 = Mauerwerkswand 1, M2: Mauerwerkswand 2, B1 = Betonwand, Gr = greenTEG, Ah = Ahlborn, Te = Testo, Lu = Luft («trockene» Verbindung), Cu = Kupferband, Gr («Putty») = Kontaktmasse (Firma greenTEG), UH («Patafix») = Kontaktmasse UHU Patafix, Te («Blu tack») = Kontaktmasse Blu tack, GrP («Mount») = Haftpads (Firma greenTEG), Ko («Pewa») = Thermische Leitpaste der Firma Pewa, n.a. = not available (= nicht zutreffend).

Benennung	Gerät	Wandoberfläche innen / aus- sen: Verbindung Temperatur- fühler	Wandoberfläche in- nen: Verbindung Wärmeflussplatte	Kommentar / Besonderheit
M1_Gr_Lu_Ah_1	Ah	Gr («Putty») / Gr («Putty»)	Lu («Luft»)	
M1_NA_Lu_Gr_4	Gr	n. a. / n. a.	Lu («Luft»)	Mauerwerk 1
B1_Gr_NA_Te_8	Te	Gr («Putty») / n. a.	n. a.	
B1_Gr_Lu_Ah_8	Ah	Gr («Putty») / Gr («Putty»)	Lu («Luft»)	
B1_NA_Lu_Gr_8	Gr	n. a. / n. a.	Lu («Luft»)	Beton 1
M1_Cu_NA_Te_2	Te	Cu / n. a.	n. a.	
M1_Cu_Gr_Ah_2	Ah	Cu / Cu	Gr («Putty»)	
M1_NA_Gr_Gr_2	Gr	n. a. / n. a.	Gr («Putty»)	Mauerwerk 1
B1_Cu_NA_Te_10	Te	Cu / n. a.	n. a.	
B1_Cu_Gr_Ah_10	Ah	Cu / Cu	Gr («Putty»)	
B1_NA_Gr_Gr_10	Gr	n. a. / n. a.	Gr («Putty»)	Beton 1
M1_Te_NA_Te_3	Te	Te («Blu tack») / n. a.	n. a.	Mauerwerk 1
M1_UH_Ko_Ah_3	Ah	UH («Patafix») / UH («Patafix»)	Ko («Pewa»)	Die Wärmeflussplatten und die Oberflächenfühler sind so befestigt, wie von den Herstellern empfohlen / oder durch Beigabe im Mess-Set angeboten.
M1_NA_GrP_Gr_3	Gr	n. a. / n. a.	GrP («Mount»)	
B1_Te_NA_Te_11	Te	Te («Blu tack») / n. a.	n. a.	
B1_UH_Ko_Ah_11	Ah	UH («Patafix») / UH («Patafix»)	Ko («Pewa»)	
B1_NA_GrP_Gr_11	Gr	n. a. / n. a.	GrP («Mount»)	Wie vorgehend nur mit Beton 1
M1_UH_NA_Te_4	Te	UH («Patafix») / n. a.	n. a.	
M1_UH_Ko_Ah_4	Ah	UH («Patafix») / UH («Patafix»)	Ko («Pewa»)	Mauerwerk 1
B1_UH_NA_Te_12	Te	UH («Patafix») / n. a.	n. a.	Beton 1
M1_Cu_NA_Te_5	Te	Cu / n. a.	n. a.	
M1_Cu_Ko_Ah_5	Ah	Cu / Cu	Ko («Pewa»)	
M1_NA_Ko_Gr_5	Gr	n. a. / n. a.	Ko («Pewa»)	Mauerwerk 1
M2_Cu_NA_Te_7	Te	Cu / n. a.	n. a.	
M2_Cu_Ko_Ah_7	Ah	Cu / Cu	Ko («Pewa»)	
M2_NA_Ko_Gr_7	Gr	n. a. / n. a.	Ko («Pewa»)	Mauerwerk 2
B1_Cu_NA_Te_9	Te	Cu / n. a.	n. a.	Beton 1
B1_Cu_Ko_Ah_9	Ah	Cu / Cu	Ko («Pewa»)	
B1_NA_Ko_Gr_9	Gr	n. a. / n. a.	Ko («Pewa»)	
M1_Cu_NA_Te_6	Te	Cu / n. a.	n. a.	
M1_Cu_Lu_Ah_6	Ah	Cu / Cu	Lu («Luft»)	Temperaturfühler für haben keinen Strahlungsschirm Mauerwerk 1
M1_NA_Lu_Gr_6	Gr	n. a. / n. a.	Lu («Luft»)	

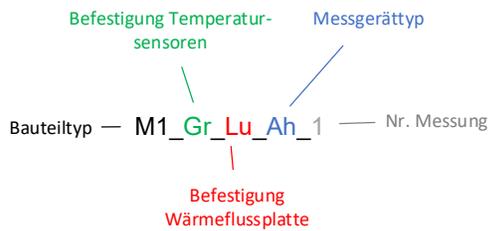


Abb. 9: Systematik für die Benennung der Messungen. Abkürzungen siehe Tabelle 12.

Die Aussenluft-Temperaturfühler sind ausser bei Messung 6 mit einem Strahlungsschirm versehen (siehe Abb. 10) und mit einem Abstand von mindestens ca. 20 cm zur Hauswand angebracht. Aufgrund der Abschirmung wird aussen die Lufttemperatur, innen eine Mischtemperatur erfasst. Wissenschaftlich korrekt wäre es, den Raumlufttemperatursensor innen ebenfalls abzuschirmen. Dies wird in der Praxis selten so gehandhabt. Da die Temperaturdifferenz zwischen Wandinnenoberflächen und der Luft in beheizten Gebäuden eher gering ist, wird hier auf eine Abschirmung verzichtet. Die Messdaten werden im Abstand von 10 Minuten aufgezeichnet.



Abb. 10: Strahlungsschirm für die Aussentemperaturfühler.



Abb. 11: Abdeckung für die Messung der Wandoberflächentemperatur aussen

### 3.2.4 Messung Materialfeuchtigkeit

Die Wärmeverluste eines feuchten Bauteils sind infolge der höheren Wärmeleitfähigkeit und höherer Verdunstungskühlung (Oberflächentemperaturabsenkung) höher als die eines trockenen Bauteils. Daher ist für die gesamte Messperiode eine gleichbleibende Bauteilfeuchte von Interesse. Um herauszufinden, ob sich die Bauteilfeuchte im Verlauf der Messperiode ändert, werden Feuchtemessungen kurz nach Beginn (08.01.2020) und nach Abschluss (09.03.2020) der U-Wert Messungen durchgeführt. Verwendet wird das Gerät «Hydromette M4050» mit einer Aktiv-Elektrode B 60 der Firma GANN. Die Messungen werden nach dem Widerstands-Messprinzip (Scanbereich) durchgeführt.

Als ungefährender Richtwert für die Feuchtebeurteilung werden in der Bedienungsanleitung [25], S. 80 in Abhängigkeit von der Material-Rohdichte die folgenden Werte angegeben:

- 1200 – 1800 kg/m<sup>3</sup>: 40 - 60 Digits: normal trocken, 60 – 80 Digits: halbtrocken
- > 1800 kg/m<sup>3</sup>: 50 - 70 Digits: normal trocken, 70 – 90 Digits: halbtrocken

Die Feuchtemessungen erfolgen an den Wänden, an denen auch die in-situ U-Wert Messungen durchgeführt werden.

### 3.3 Auswertungen Daten in-situ Messungen

#### 3.3.1 Berechnung U-Wert Messung

Zur Berechnung des U-Wertes werden je nach Ausstattung der Messgeräte die in Tabelle 13 angegebenen Formeln verwendet.

Tabelle 13: Möglichkeiten der U-Wert Berechnung in Abhängigkeit von dem Messgerät bzw. den erfassten Messgrössen. Bezieht sich ein berichteter U-Wert auf Messungen wird der Index «m» verwendet.  
Anmerkungen:  $\epsilon = 0.9$

Formel	Benennung im Text	Almemo (Ahlborn)	gSKIN U-Value KIT (greenTEG)	Testo 635-2 U-Wert-Set (Testo)
$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_{se}}} \quad (F1.1)$ <p>dabei sind:</p> $h_{si} = \left( \frac{q}{\theta_{si} - \theta_i} \right)$ $h_{se} = \left( \frac{q}{\theta_{se} - \theta_e} \right)$ $\Lambda = \left( \frac{q}{\theta_{si} - \theta_{se}} \right)$	UWert_F1.1m	✓	✗	✗
$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_{se}}} \quad (F1.2)$ <p>dabei sind:</p> $h_{si} = h_c + h_r$ $h_c = 1.98 * (\theta_{si} - \theta_i)^{0.32}$ $h_r = 4\epsilon\sigma\theta_{si}^3$ $h_{se} = \left( \frac{q}{\theta_{se} - \theta_e} \right)$ $\Lambda = \left( \frac{q}{\theta_{si} - \theta_{se}} \right)$	UWert_F1.2m	✓	✗	✗
$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_e} \quad (F2)$	UWert_F2m	✓	✓	✗
$U = h_{si} \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (F3)$ <p>dabei ist: <math>h_{si} = 7.69 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})</math></p>	UWert_F3m	✓	✗	✓

Seitens Hersteller werden für das Gerät Ahlborn je nach Ausstattung die Verwendung der Formel von U-Wert\_F1.1m und UWert\_F2m empfohlen. Es gibt eine kostenpflichtige Software zur U-Wert Berechnung (im Projekt nicht verwendet), oder der Logger kann seitens Vertrieb entsprechend programmiert werden (im Projekt für UWert\_F2m erfolgt). Bei den anderen Messgeräten gibt es entsprechend der erfassten Grössen jeweils nur eine Möglichkeit für die U-Wert Berechnung.

Die Formeln für  $h_c$  und  $h_r$ , aus denen  $h_{si}$  beim UWert\_F1.2m, berechnet wird, stammen aus der Literatur. Der konvektive Anteil,  $h_c$ , des Wärmeübergangskoeffizienten beruht auf einer experimentellen Näherung von Khalifa und Marshall für eine unbeheizte Wand in einem mittels Heizkörper beheizten Raum [26]. Zur Ermittlung des langwelligen Anteils,  $h_r$ , wird der normative Ansatz gemäss [27] verfolgt. Wie in [28] experimentell nachgewiesen wurde, kann anstelle der Oberflächentemperatur aller umgebenden Flächen auch nur  $\theta_{si}$  der betroffenen Wand verwendet werden. Für den Wärmeübergangskoeffizienten aussen,  $h_{se}$ , werden  $h_c$  und  $h_r$  nicht separat errechnet. Für eine sinnvolle Näherung müsste die oberflächennahe Strömungsgeschwindigkeit an der zu untersuchenden Aussenwand erfasst werden. Der eben beschriebene Ansatz für die Ermittlung von  $h_{si}$  und  $h_{se}$  wird prinzipiell auch in [29] verfolgt.

### 3.3.2 Berechnung U-Wert Wandaufbau (statisch)

Die U-Werte für die Wände Mauerwerk (M1 und M2) und Beton (B1) können wie folgt berechnet werden.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_k \left( \frac{l}{\lambda} \right)_k + R_{se}} \quad (\text{F4}), \text{ Benennung in weiteren Text: UWert\_F4}_b$$

Die Berechnung erfolgt gemäss [24] mit Materialwerten (Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Schichtdicke  $l$ ) nach Tabelle 10. Für  $R_{si}$  und  $R_{se}$  werden entsprechend die Werte  $0.13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  ( $h_{si} = 7.69 \text{ W(m}^2 \text{ K)}$ ) und  $0.04 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  ( $h_{se} = 25 \text{ W(m}^2 \text{ K)}$ ) verwendet. Da die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit der verbauten Materialien nicht bekannt ist, ergeben sich Spannweiten für den normativen, rechnerischen U-Wert  $U_b$  gemäss Tabelle 10.

### 3.3.3 Messunsicherheit in-situ Geräte

Für die Ermittlung der Messunsicherheit wird die Vorgehensweise aus ISO 9869-1 [4] gewählt. Bei der in Abschnitt 2.1.3 dargestellten Berechnungssystematik wird mit der Wurzel der Quadratsumme die Messunsicherheit unter der Annahme erfasst, dass die einzelnen Unsicherheiten voneinander unabhängig und zufälliger Natur sind und mit der arithmetischen Summe die maximale Messunsicherheit [30]. Die in der Norm gemachten Angaben interpretieren wir so, dass sie – wenn vorhanden – durch reale Werte ersetzt werden können.

- (1) Kalibrationsgenauigkeit des Wärmeflussensors:
  - a. Ahlborn: 5 % des Messwertes,
  - b. greenTEG: 3 % des Messwertes,
  - c. Testo: nicht vorhanden.
- (2) Kalibrationsgenauigkeit der Temperatursensoren (bei 20 °C):
  - a. Ahlborn: 0.4 % des Messwertes,
  - b. greenTEG: 2.5 % des Messwertes,
  - c. Testo: 1.5 % des Messwertes.
- (3) Variationen aufgrund von Unterschieden im thermischen Kontakt zwischen Wand Temperaturfühlern und Wärmeflussensor: 5 %, wird übernommen, da immer nur mit einer Wärmeflussplatte gemessen wird.
- (4) Operativer Fehler des Wärmeflussensors: dieser wird durch eine Störung des Wärmeflusses der Wandoberfläche durch den Wärmeflussensor selber verursacht. Wenn der Wärmeflussensor sehr dünn ist (nicht näher definiert) und der thermische Widerstand des Sensors sehr klein, kann der Fehler vernachlässigt werden. In allen anderen Fällen muss der operative Fehler abgeschätzt und die Daten korrigiert werden. Mit einer Datenkorrektur bleibt eine Unsicherheit von: 2 - 3 %. Auf Basis der Simulationsergebnisse (Kapitel 7.2) kann angenommen werden, dass der operative Fehler des Wärmeflussensors sehr gering ist. Ohne Korrektur der Messdaten wird eine Unsicherheit von 2 % angenommen. Bei Testo entfällt dieser Wert, da kein Wärmeflussensor vorhanden ist.
- (5) Fehler durch fluktuierende Temperaturen und Wärmeströme über die Messdauer:  $\pm 10$  % des Messwertes, wird übernommen.
- (6) Temperaturunterschiede im Raum und Unterschiede zwischen Luft- und Strahlungstemperatur: 5 %, wird übernommen, da kein Strahlungsschirm verwendet wird.

Die Unsicherheiten (1) und (2) können klar dem verwendeten Gerät zugeordnet werden, (3) obliegt zumindest teilweise der Installation. Die Unsicherheit (4) muss entweder abgeschätzt werden, oder ist seitens Hersteller der Wärmeflussplatte klar zugeordnet. Die Unsicherheitsquellen (5) und (6) schliesslich sind weitgehend Randbedingungen bei der Messung zuzuordnen. Dabei kann (5) praktisch nicht beeinflusst werden und (6) nur teilweise durch die Verwendung eines Strahlungsschirms.

Unter der Annahme, dass alle genannten Einzelfehler (Unsicherheiten) unabhängig voneinander und zufälliger Natur sind und keine systematischen Fehler bestehen, resultieren mit dem Ansatz gemäss [4] die folgenden Messunsicherheiten der verwendeten Geräte, der installierten Geräte und schliesslich der Messung selbst.

Für die Geräte werden (1) und (2) betrachtet und es ergeben sich folgende Geräteunsicherheiten.

$$\begin{aligned} \text{Ahlborn: } & \sqrt{5^2 + 0.4^2} & = & 5.0 = 5 \% \\ \text{greenTEG: } & \sqrt{3^2 + 2.5^2} & = & 3.9 = 4 \% \\ \text{Testo: } & \sqrt{1.5^2} & = & 1.5 = 2 \% \end{aligned}$$

Einschliesslich der Unsicherheit infolge der Installation ergibt sich durch Berücksichtigung von (3) folgende Gesamtunsicherheit für die installierten Geräte.

$$\begin{aligned} \text{Ahlborn: } & \sqrt{5^2 + 0.4^2 + 5^2} & = & 7.1 = 7 \% \\ \text{greenTEG: } & \sqrt{3^2 + 2.5^2 + 5^2} & = & 6.3 = 6 \% \\ \text{Testo: } & \sqrt{1.5^2 + 5^2} & = & 5.2 = 5 \% \end{aligned}$$

Die gewonnenen Messergebnisse schliesslich zeigen folgende Gesamtunsicherheiten bei Berücksichtigung von (4), (5) und (6).

$$\begin{aligned} \text{Ahlborn: } & \sqrt{5^2 + 0.4^2 + 5^2 + 2^2 + 10^2 + 5^2} & = & 13.4 = 13 \% \\ \text{greenTEG: } & \sqrt{3^2 + 2.5^2 + 5^2 + 2^2 + 10^2 + 5^2} & = & 13.0 = 13 \% \\ \text{Testo: } & \sqrt{1.5^2 + 5^2 + 10^2 + 5^2} & = & 12.3 = 12 \% \end{aligned}$$

Diese Gesamtunsicherheit wird in der Auswertung der Messdaten berücksichtigt.

### 3.3.4 Unsicherheit der Berechnungsansätze

Wie im vorhergehenden Abschnitt ausgeführt wurde ist ein Teil der Messunsicherheit dem Gerät zuzuordnen (dort Punkt (1) und (2)). Dieser Teil kann noch durch die Unsicherheit der Berechnungsansätze ergänzt werden.

Die rechnerischen Ansätze gemäss Tabelle 13 erlauben eine formale Berechnung der Unsicherheit des U-Wertes aus den gemessenen Grössen  $q$ ,  $\theta_i$ ,  $\theta_{si}$ ,  $\theta_e$  und  $\theta_{se}$  mit deren unabhängigen und zufälligen Unsicherheiten  $\delta q$ ,  $\delta\theta_i$ , ... gemäss

$$\delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial q} \delta q\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial \theta_i} \delta \theta_i\right)^2 + \dots} \quad (\text{F5})$$

Folgende absolute und relative Unsicherheiten ergeben sich je nach Auswertungsmethode für einen angenommenen U-Wert von

$$U_{\text{Bsp.}} = 1.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

mit den Temperaturrandbedingungen  $\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta_e = -0.2 \text{ }^\circ\text{C}$  und unter Annahme von Wärmeübergangskoeffizienten gemäss [24].

$$\begin{aligned} \delta F_{1.1\text{m, Ahlborn}} & = 0.17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) & = & 15 \% \\ \delta F_{1.2\text{m, Ahlborn}} & = 0.17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) & = & 15 \% \\ \delta F_{2\text{m, Ahlborn}} & = 0.06 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) & = & 5 \%, \\ \delta F_{2\text{m, greenTEG}} & = 0.04 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) & = & 4 \%, \\ \delta F_{3\text{m, Ahlborn}} & = 0.04 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) & = & 3 \% \text{ und} \\ \delta F_{3\text{m, Testo}} & = 0.14 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) & = & 12 \%. \end{aligned}$$

Der Ansatz zeigt, dass mit Zunahme der Anzahl Messgrössen (und damit auch der Unsicherheiten), die in die Berechnungsformel eingehen, auch die Unsicherheit für das Resultat zunimmt. Die Herleitung findet sich im Anhang in Kapitel 12.1).

In Ergänzung mit den Unsicherheiten aus Abschnitt 3.3.3 ergeben sich die folgenden Unsicherheiten:

$$\text{Ahlborn, F1.1: } \sqrt{15^2 + 5^2 + 2^2 + 10^2 + 5^2} = 19 \%$$

Ahlborn, F1.2:	$\sqrt{15^2 + 5^2 + 2^2 + 10^2 + 5^2}$	= 19 %
Ahlborn, F2:	$\sqrt{5^2 + 5^2 + 2 + 10^2 + 5^2}$	= 13 %
Ahlborn, F3:	$\sqrt{3^2 + 5^2 + 10^2 + 5^2}$	= 13 %
greenTEG, F2:	$\sqrt{4^2 + 5^2 + 2^2 + 10^2 + 5^2}$	= 13 %
Testo, F3:	$\sqrt{12^2 + 5^2 + 10^2 + 5^2}$	= 17 %

Der Ansatz wird bei der Diskussion der Messresultate berücksichtigt.

### 3.3.5 Bewertung Gültigkeit Messung

Für die Datenanalyse wird die «Average Method» aus ISO 9869-1 [4] verwendet. Dabei wird der aufsummierte Wärmefluss durch die aufsummierte Temperaturdifferenz geteilt. Gleichung F6 beschreibt formal das Vorgehen für den UWert\_F2m. Im vorliegenden Projekt wird diese Art der Mittelung analog auch für UWert\_F1.1m, UWert\_F1.2m und für UWert\_F3m verwendet.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (F6)$$

Dabei sind für eine Messung im Intervall  $[\tau_1 \dots \tau_n]$  mit n Zeitschritten

- n Anzahl Messungen / Zeitschritte im betrachteten Zeitraum
- j Index der Messung zum Zeitpunkt  $\tau_j$
- $T_{ij}, T_{ej}$  Innentemperatur bzw. Aussen(luft)temperatur in K zum Zeitpunkt  $\tau_j$
- $q_j$  Wärmestromdichte in  $W/m^2$  zum Zeitpunkt  $\tau_j$

Diese Näherung gilt gemäss [4] nur unter der Voraussetzung möglichst konstanter Randbedingungen:

- Nahezu gleichbleibender Wärmegehalt des Bauteils während der Datenerfassungsperiode (gleiche Temperaturen und Feuchtegehalt).
- Die Wärmeflussplatte und der Temperaturfühler aussen sind keiner direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt.
- Die Wärmeleitfähigkeit des Prüfkörpers ist konstant.

Die der Analyse zugrunde zu legende Mittelungsdauer beträgt für mittlere und schwere Elemente mit einer flächenbezogenen spezifischen Wärmekapazität von  $c' > 20 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$  immer ein Vielfaches von 24 h. Die Messung kann dann gestoppt werden, wenn die drei Abbruchkriterien gemäss [4] erfüllt sind:

4. Minimaldauer 72 h,
5. der Messwert (U-Wert) am Ende der Messung weicht nicht mehr als  $\pm 5 \%$  vom Wert 24 h zuvor ab,
6. der Messwert, der während der ersten 2/3 der Analyseperiode erhalten wird, weicht nicht mehr als  $\pm 5 \%$  vom Wert der letzten 2/3 der Analyseperiode ab.

### 3.3.6 Ausgabe U-Wert Messgeräte

Die Geräte geben seitens Hersteller einen U-Wert aus, wie dieser sich berechnet zeigt Tabelle 14. Diese ausgegebenen U-Werte werden im Projekt nicht verwendet, da die Mittelwertbildung unterschiedlich, oder gar nicht erfolgt und da nicht die Gültigkeit der Messung nicht von allen Geräten ausgegeben wird.

Hinweis: die Auswirkung der Verwendung dieser U-Werte wird in Abschnitt 5.2.2 beschrieben.

Tabelle 14. Ausgabe des U-Wertes durch die Messgeräte.

Gerät	Ausgabe U-Wert	Bewertung Gültigkeit Messung
Ahlborn	$\bar{x}$ aus UWert_F2 <sub>m</sub> aller vorhergehenden Messungen $\bar{x}$ aus UWert_F1 <sub>m</sub> aller vorhergehenden Messungen	nein nein
gSKIN U-Value KIT	$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})}$	Gem. ISO 9869-1
Testo 635-2 U-Wert-Set	UWert_F3 <sub>m</sub>	nein

### 3.4 Messungen im Labor

#### 3.4.1 Messung U-Wert Hotbox

Die Messungen werden an der Berner Fachhochschule Biel (BFH) durchgeführt. Zum Einsatz kommt eine Klimakammer mit einer Hotbox auf der Warmseite. Details zum verwendeten Messverfahren und zur Bewertung der Gültigkeit der Messung finden sich in den Messberichten der BFH [31], [32].

In der Hotbox wird der Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile Wand Mauerwerk (M3) und Wand Beton (B2) gemessen. Eine weitere Messung wird durchgeführt, bei der die drei in-situ U-Wert Messgeräte auf den Bauteilen angebracht sind. So kann gleichzeitig das Messergebnis der in-situ Geräte ermittelt und mit der Hotbox-Messung verglichen werden. Die zwei Messdurchgänge ermöglichen es auch, einen möglichen Einfluss der Messgeräte auf das Messergebnis der Hotbox zu ermitteln.

Der U-Wert wird gemäss Formel (F1) ermittelt. Im weiteren Text wird die Benennung wie folgt gehandhabt:

- UWert\_F1<sub>in</sub>: Hier werden für die Wärmeübergangswiderstände die Normwerte 0.13 m<sup>2</sup> K/W (h<sub>si</sub> = 7,69 W/(m<sup>2</sup> K)) und 0.04 m<sup>2</sup> K/W (h<sub>se</sub> = 25 W/(m<sup>2</sup> K)) gemäss [24] verwendet.
- UWert\_F1<sub>i</sub>: Hier werden die aus den Messungen berechneten Wärmeübergangswiderstände verwendet.

#### 3.4.2 Messunsicherheit Hotbox

Die Messunsicherheit wird in vorliegendem Bericht immer wie in den Messberichten [31], [32] ausgewiesen angegeben. In den genannten Berichten sind auch Informationen zur Herleitung zu finden.

#### 3.4.3 Messunsicherheit in-situ Messgeräte in Hotbox

In [33] ist die angenommene Messunsicherheit der Geräte für das 95 %-Vertrauensintervall der Einzelmessung wie folgt angegeben:

Ahlborn: relativer Messfehler	9.5 %
greenTEG: relativer Messfehler	4.6 %
Testo: relativer Messfehler	2.3 %

#### 3.4.4 Messung U-Wert in-situ Messgeräte in der Hotbox

Die Befestigung der Sensoren an den Prüflingen erfolgt mit folgenden Variationen (Benennung gemäss Systematik Abb. 9):

- M3\_Gr\_Lu:
  - Punktuelle Befestigung der Oberflächen-Temperaturfühler: Kontaktmasse «Putty» (Firma greenTEG)
  - Flächige Befestigung Wärmeflussplatte: «trockene» Verbindung («Luft» = Wärmeflussplatte nur mit Kleband an der Wand befestigt)
- M3\_Cu\_Ko:

- Punktuelle Befestigung der Oberflächen-Temperaturfühler: Fühler mit Kupferklebeband an der Wand befestigt
- Flächige Befestigung Wärmeflussplatte: Kontaktmasse: «Dow Corning 340» = Wärmeleitpaste ( $\lambda$  0.67 W/(m K)).

Ausgegebene U-Werte:

Im Bericht der BFH [33] werden die folgenden U-Wert-Bestimmungsmethoden für die in-situ Messgeräte verwendet (siehe auch Tabelle 14):

- Almemo (Ahlborn): Der Logger berechnet für jeden Zeitschritt  $\bar{x}$  aus den vorhergegangenen Messungen. Aus diesen Werten wurde das Tagesmittel UWert\_F2<sub>m</sub> gebildet
- gSKIN U-Wert: Tagesmittel aus UWert\_F2<sub>m</sub>, (Mittelung gem. ISO 9869-1, siehe Abschnitt 3.3.5)
- Testo 635-2 U-Wert-Set: Tagesmittel aus Einzelwerten UWert\_F3<sub>m</sub>.

Bewertung Gültigkeit Messung:

Es gelten die in Kriterien für die Hotbox Messung im Abschnitt (3.4.1).

### 3.4.5 Messung Feuchte

Bei jeder Messung wird die relative Feuchte und der Wassergehalt 3 cm unter der Oberfläche auf der Warm- und Kaltseite des Probenkörpers bestimmt.

## 3.5 Simulationen

### 3.5.1 Aufbau Modell

Da nur für das Bauteil Beton identische Aufbauten für die Messung in-situ und im Labor vorliegen, konzentrieren sich die Simulationen auf das Bauteil Beton. Die Simulationen werden mit Voltra, Version 8.0w [34] durchgeführt. Es werden die folgenden Zeiträume berücksichtigt:

Beton: 28.01.2021 11:16 Uhr bis 13.02.2020 11:16 Uhr

Abb. 12 zeigt den zugrunde gelegten Plan-Ausschnitt. Weitere Informationen zur Konstruktion bestehen aus den Begehungen sowie der Bauteilentnahme (siehe Abb. 7). Die Wärmeleitfähigkeit des Betons wird mit 1.2 W/(m K) angesetzt (siehe Tabelle 9). Abb. 13 zeigt das Simulationsmodell für die Betonwand B1.



Die Wärmeflussplatte ist in der untersuchten Messperiode mit Wärmeleitpaste ( $\lambda = 0.8 \text{ W/(m K)}$ ) an der Wand befestigt.

### 3.5.3 Untersuchung Klebe- und Kontaktmittel

Um die Auswirkung der unterschiedlichen Haft- und Kontaktmassen zu untersuchen, wird der in Tabelle 16 beschriebene Aufbau für Wärmeflussplatte und Temperaturfühler verwendet. Wenn die Befestigungsart für die Temperaturfühler und die Wärmeflussplatte variiert wird, so wird für die Temperaturfühler und die Wärmeflussplatte jeweils das gleiche Befestigungsmittel mit den Eigenschaften aus Tabelle 17 verwendet.

Für die Wärmeflussplatte wird vereinfachend PVC mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0.18 \text{ W/(m K)}$  angenommen.

Tabelle 16: Wärmeflussplatte und Temperaturfühler im Simulationsmodell.

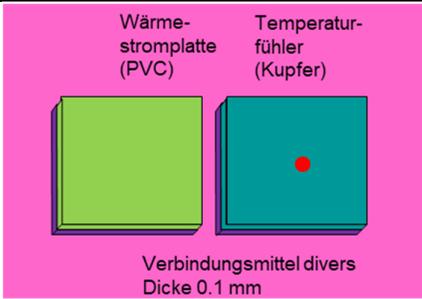
Modellansicht	Wärmeflussplatte	Temperaturfühler
	<p>Die Wärmeflussplatte (PVC) ist mit der Wand mit Verbindungsmitteln unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten verbunden.</p> <p>Abmessungen Wärmeflussplatte:            Breite: 120 mm            Höhe: 120 mm            Dicke: 1.5 mm            Schichtdicke Verbindungsmittel: 0.1 mm und 0.5 mm</p>	<p>Die Temperaturfühler sind aus Kupfer und sind mit der Wand mit Verbindungsmitteln unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten verbunden.</p> <p>Schichtdicke Verbindungsmittel: 0.1 mm und 0.5 mm</p>

Tabelle 17: Befestigungsmaterialien für die Temperaturfühler und die Wärmeflussplatte.

Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte	Spez. Wärmekapazität	Ähnlichkeit mit
W/(m K)	kg/m <sup>3</sup>	J/(kg K)	
0.8	1800	1100	Wärmeleitpaste
0.4	980	1800	Polyethylen
0.2	1150	1000	EPDM
0.1	1.2	1000	Luft

### 3.5.4 Untersuchung Operativer Fehler der Wärmeflussplatte

Je nach Beschaffenheit und Grösse der Wärmeflussplatte kann der Wärmefluss der Wand durch die Wärmeflussplatte selber gestört werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sowohl die Fläche als auch der thermische Widerstand der Platte gross sind. In den Simulationen werden zwei Materialkombinationen für die Wärmeflussplatte untersucht (Tabelle 18). Die Abmessung der Platte beträgt dabei 120 mm\*120 mm\*1.5 mm. Dies entspricht der Platte von Ahlborn und damit hinsichtlich der Grösse dem schlechteren Fall, da die Platte der Firma greenTEG kleiner ist (30 mm\*30 mm\*2 mm). Anzumerken ist, dass aus Sicht der eigentlichen Messtechnik eine grössere Platte i.d.R. von Vorteil ist, da die Messfläche grösser ist und damit Randeinflüsse geringer sind.

Die Simulationen werden für das Bauteil Beton durchgeführt und für die Dauer von 7 Tagen (28.01.2021 11:16 Uhr bis 04.02.11:16 Uhr).

Tabelle 18: Materialien für die Wärmeflussplatte. Annahmen für Schichtmodell:

Epoxidharz:  $\lambda$ : 1.2 W/(m K),  $\rho$ : 1400 = kg/m<sup>3</sup>, c: 800 J/(kg K); Kupfer =  $\lambda$ : 380 W/(m K),  $\rho$ : 8900 = kg/m<sup>3</sup>, c: 380 J/(kg K)

Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte	Spez. Wärmekapazität	Ähnlichkeit mit
W/(m K)	kg/m <sup>3</sup>	J/(kg K)	
0.18	1390	900	PVC
8.8	7750	445	0.1 mm Epoxidharz, 1.3 mm Kupfer 0.1 mm Epoxidharz (Wärmeleitfähigkeit mit «Schichtmodell» berechnet)

## 4. Resultate Klebe- und Kontaktmittel

### 4.1 Test Rückstandsfreiheit und Haftung (Test 1)

Einige der Klebematerialien erweisen sich schon beim Aufbringen als nicht haftend. Aus diesem Grund wird bei diesen Materialien auf einen ausführlicheren Test verzichtet. Dies betrifft die folgenden Materialien:

- Scotch 2070, ID 2
- Thermally Conductive Tapes 5590H, ID 9
- PDMS, ID 11
- Tesa Powerstrips Poster, ID 14

Die Ergebnisse für alle getesteten Materialien finden sich im Anhang (Abschnitt 12.1). Danach sind für glatte Oberflächen bezüglich der Kombination aus Rückstandsfreiheit und Haftung zwei Klebematerialien besonders zu empfehlen:

- Scotch 244 High Precision (einseitiges Klebeband), ID 1
- Tesa Profi-Malerband «Innen» (einseitiges Klebeband), ID 5

Beide Klebemittel haften jedoch auf Rauputz nicht gut. Bezüglich Fleckenfreiheit ist auch das Produkt

- Strips 3M Command (zweiseitiges Klebeband), ID 12

empfehlenswert, allerdings haftet das Produkt nicht auf allen Untergründen zuverlässig. Grundsätzlich kann meist gleich zu Beginn festgestellt werden, ob ein Produkt haftet oder nicht. Haftet es zu Beginn fest an der Wand, dann ist dies in der Regel auch während der gesamten Klebedauer der Fall.

Die nachstehenden Materialien können auf Weissputz ölige Flecken hinterlassen.

- Blue-Tack, ID 3
- UHU Patafix, ID 4

Bei rauen Untergründen sind dies aber zwei der wenigen Materialien die zuverlässig haften. Hier werden auch keine öligen Spuren festgestellt, sondern allenfalls kleine bröselige Rückstände zwischen den Putzkörnern. Diese können mit einer Kugel aus demselben Klebematerial abgetupft werden. Ist die Wandfarbe also ähnlich wie die Farbe des Klebematerials (Blue-Tack = hellblau, Patafix = weiss), so kann das Klebematerial empfohlen werden.

Bemerkung: kurz nach den durchgeführten Tests kam noch eine Kontaktmasse auf den Markt namens «Putty», die von der Firma greenTEG vertrieben wird. Diese wird im Rahmen des Projektes nicht getestet, da sie aber in der Anwendung etwas weicher als die Materialien mit ID 3 und ID 4 ist, kommt sie bei den in-situ Messungen zur Befestigung der Wärmeflussplatte zum Einsatz. Die Eigenschaften der Kontaktmasse ähneln denjenigen der Materialien mit der ID 3 und ID 4. Die Masse hält gut auf rauen Oberflächen, hinterlässt aber ölige Flecken.

## 4.2 Test Haftung Sensor auf Oberfläche (Test 2)

Die ausführlichen Ergebnisse für die getesteten Materialien finden sich im Anhang (Abschnitt 12.1). Für die eher glatten Oberflächen werden Klebematerial ID 1 und ID 5 verwendet, für die rauen Oberflächen Klebematerial ID 3, ID 4 und ID 12.

Der Sensor haftet bei allen Testaufbauten für zwei Wochen gut auf der Wand. Es können keine Rückstände festgestellt werden. Kleinere Rückstände bei Klebematerial ID 3 und ID 4 können mit einer Kugel aus demselben Klebematerial von der Wand abgetupft werden.

## 5. Resultate Messungen in-situ

### 5.1 U-Wert in-situ

#### 5.1.1 Auswertung verschiedene Befestigungsmethoden Sensoren

Bei den durchgeführten Messungen wird hauptsächlich die Befestigung der Temperaturfühler und Wärmeflussplatten an den Wänden variiert. Bei dem Bauteil Wand Mauerwerk (M1) sind für jedes Messgerät die Messungen 1 – 6, bei dem Bauteil Wand Beton (B1) die Messungen 8 - 10 grundsätzlich vergleichbar, da es sich um dasselbe Bauteil handelt, die Messgeräte lediglich unterschiedlich mit der Wand verbunden sind, oder die Aussentemperatur ohne Strahlungsschirm erfasst wird (Messung 6). Ziel des folgenden Abschnittes ist die Betrachtung der Streuung aufgrund verschiedener Befestigungsmethoden.

Für die Messgeräte ergeben sich die in Tabelle 19 aufgeführten U-Werte.

Tabelle 19: Messergebnisse für die Bauteile M1, M2 und B1 (Mittelwert der Messungen mit unterschiedlichen Befestigungen der Messfühler, Abweichung der Messungen von diesem Mittelwert). Alle U-Werte Ahlborn und greenTEG  $\pm 13$  %, Testo  $\pm 12$  %.

	Ahlborn			greenTEG	Testo	
Formel für U-Wert	UWert_F1.1 <sub>m</sub>	UWert_F1.2 <sub>m</sub>	UWert_F2 <sub>m</sub>	UWert_F3 <sub>m</sub>	UWert_F3 <sub>m</sub>	
Mittlerer U-Wert M1 (Messung 1-6)	1.5 W/(m <sup>2</sup> K)	1.2 W/(m <sup>2</sup> K)	1.0 W/(m <sup>2</sup> K)	1.4 W/(m <sup>2</sup> K)	1.1 W/(m <sup>2</sup> K)	1.0 W/(m <sup>2</sup> K)
Abweichung Messung M1 (Messung 1-6)	+14 bis -20 %	+12 bis -17 %	+10 bis -15 %	+12 bis -11%	+21 bis -13 %	+13 bis -8 %
Mittlerer U-Wert M2	1.4 W/(m <sup>2</sup> K)	1.2 W/(m <sup>2</sup> K)	1.0 W/(m <sup>2</sup> K)	1.2 W/(m <sup>2</sup> K)	1.3 W/(m <sup>2</sup> K)	0.6 W/(m <sup>2</sup> K)
Mittlerer U-Wert B1 (Messung 8-10)	1.8 W/(m <sup>2</sup> K)	1.3 W/(m <sup>2</sup> K)	1.1 W/(m <sup>2</sup> K)	1.5 W/(m <sup>2</sup> K)	1.2 W/(m <sup>2</sup> K)	ungültig
Abweichung Messung B1 (Messung 8-10)	+10 % bis -15 %	+8 % bis -12 %	+7 % bis -11 %	+5 % bis -6%	+10 % bis -10 %	ungültig

Es zeigt sich, dass die Auswertung gemäss UWert\_F1.1<sub>m</sub> (nur Ahlborn) die höchsten U-Werte ausweist. Die Werte für UWert\_F1.2<sub>m</sub> (nur Ahlborn) liegen darunter. Die Auswertungen gemäss UWert\_F2<sub>m</sub> (Ahlborn, greenTEG) liegen insgesamt näher beieinander. Bei UWert\_F3<sub>m</sub> (Ahlborn, Testo) ergeben sich wieder Differenzen. Die Abweichungen der Einzelmessungen vom Mittelwert Messung 1 – 6, bzw. Messung 8 - 10 sind bei Ahlborn und greenTEG ähnlich hoch, bei Testo etwas tiefer. Insgesamt streuen also bei allen Geräten die gemessenen U-Werte.

Die Vergleichsmessung M2 ergibt ähnliche U-Werte, die grösste Abweichung ergibt sich beim Messgerät Testo (- 43 %), gefolgt von greenTEG (25 %).

In Abb. 14 sind die aus den Messergebnissen resultierenden U-Werte für das Bauteil Wand Mauerwerk M1 und M2 wiedergegeben. Abb. 15 zeigt die Ergebnisse für das Bauteil Wand Beton B1. Für alle Ergebnisse, die in der Grafik nicht gefüllte Markierungen aufweisen, kann kein gültiger U-Wert berechnet werden, d.h., die Abbruchkriterien gemäss Abschnitt 3.3.5 [4] können nicht erfüllt werden. Die Messergebnisse sind entsprechend den Befestigungsarten für die Wärmeflussplatte angeordnet. Für das Messgerät Testo (keine Wärmeflussplatte) sind die Messungen dargestellt, bei denen die Befestigung der Temperaturfühler identisch ist.

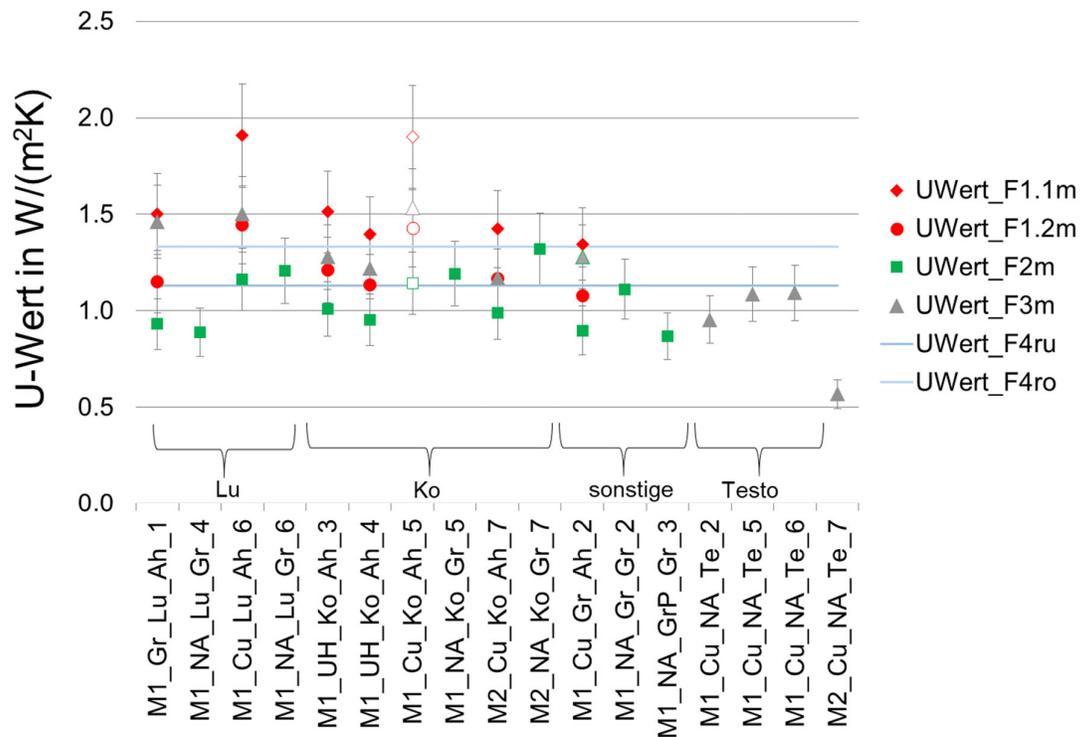


Abb. 14: U-Wert Messungen Wand Mauerwerk 1 und 2 (U-Werte Ahlborn und greenTEG  $\pm 13\%$ , Testo  $\pm 12\%$ ). Zum besseren Vergleich sind die Messungen mit gleicher Befestigungsart der Wärmeflussplatte nebeneinander aufgeführt. Verwendete Abkürzungen: Ah = Ahlborn, Gr = greenTEG, Te = Testo, Lu = Luft (kein Haftmittel), Wp = Thermische Leitpaste der (Firma Wacker), UWert\_F5bo = berechneter U-Wert obere Grenze Spannweite, UWert\_F5bu = berechneter U-Wert untere Grenze Spannweite. Ungefüllte Symbole stehen für ungültige Messungen.

#### Messergebnisse mit Messgerät Ahlborn

Die Differenzen zwischen den einzelnen Messungen am Bauteiltyp Mauerwerk (Abb. 14) entsprechen nicht den Erwartungen an einen Einfluss der Befestigung auf das Messergebnis (3.2.3), da sich z.B. zwischen den Messungen mit trockener Verbindung (Lu) und den Messungen mit Wärmeleitpaste kein systematischer Unterschied ausmachen lässt. Beim Beton (Abb. 15) lässt sich die erwartete Tendenz für UWert\_F1.1m und UWert\_F1.2m zwar feststellen, hier weisen die Messungen 8 (Lu) und 10 (sonstige, Kontaktpaste «Putty») einen tieferen als die Messung 9 (Wp, Wärmeleitpaste) auf. Allerdings sind alle beschriebenen Abweichungen innerhalb der Messunsicherheit und nicht konsistent zwischen Mauerwerk und Beton zu beobachten, daher ist das Ergebnis möglicherweise auch zufällig.

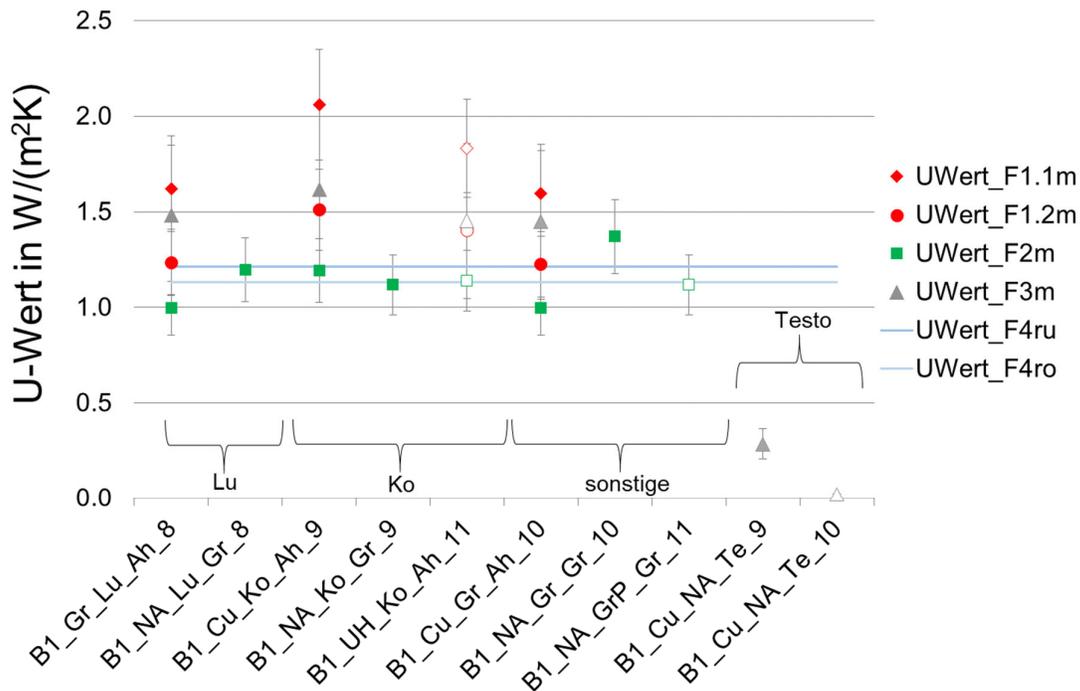


Abb. 15: U-Wert Messungen Beton 1 (U-Werte Ahlborn und greenTEG  $\pm 13\%$ , Testo  $\pm 12\%$ ). Zum besseren Vergleich sind die Messungen mit gleicher Befestigungsart der Wärmeflussplatte nebeneinander aufgeführt. Verwendete Abkürzungen: siehe Tabelle 12. Die Messergebnisse von Testo sind sehr niedrig.

#### Messergebnisse mit Messgerät greenTEG

Mit diesem Messgerät kann das erwartete Messverhalten beim Mauerwerk 1 und Beton etwas besser beobachtet werden: bei M1 wird der höchste UWert\_F2<sub>m</sub> bei Messung 5 (Wärmeleitpaste) gemessen, gefolgt von Messung 2 mit Kontaktmasse «Putty». Die tiefsten U-Werte\_F2<sub>m</sub> werden mit «trockener» Verbindung («Luft», Messung 4) und Haftpads («Mount», Messung 3) erfasst. Bezieht man allerdings die Messungen 6 (kein Strahlungsschirm) und 7 (Kontrollmessung andere Mauerwerkswand M2) mit ein, werden die Erwartungen nicht mehr ganz so gut erfüllt, da beispielsweise bei «trockener» Verbindung ein hoher U-Wert gemessen wird. Bei der Betonwand wird der höchste U-Wert mit der Kontaktmasse «Putty» gemessen. Tieferere Werte werden für «trockene» Verbindung («Luft») und die Wärmeleitpaste erreicht.

#### Messergebnisse mit Messgerät Testo

Hier liegen für M1 drei gültige Messungen mit gleichen Befestigungsmitteln für die Temperaturfühler vor (das Gerät hat keine Wärmeflussplatte). Daher ist zu erwarten, dass die Werte für UWert\_F3<sub>m</sub> nahe beieinanderliegen. Diese Erwartung wird mit Werten zwischen 1.0 W/(m<sup>2</sup> K) und 1.1 W/(m<sup>2</sup> K) ( $\pm 13\%$ ) erfüllt. Der UWert\_F3<sub>m</sub> für M2 (gleiche Befestigungsmittel) ist mit 0.6 W/(m<sup>2</sup> K) ( $\pm 13\%$ ) deutlich tiefer (die Ursache dafür ist nicht klar). Bei der angenommenen Messunsicherheit von 13% ist diese Abweichung signifikant.

#### 5.1.2 Auswertung bezogen auf Methode

Wie Abb. 14 und Abb. 15 zeigen, resultiert bei allen Messungen mit dem Messgerät Ahlborn UWert\_F1.1<sub>m</sub> stets der höchste (schlechteste) U-Wert. Mit einer separaten Ausrechnung der Wärmeübergangskoeffizienten  $h_c$  und  $h_r$  für  $h_{si}$  bei UWert\_F1.2<sub>m</sub> ergeben sich tiefere U-Werte. Anhand der Herleitung der Unsicherheit aus den Berechnungsansätzen (Abschnitt 3.3.4) ergibt sich für den UWert\_F1<sub>m</sub> eine Unsicherheit

von 19 %. Werden aus den Messergebnissen dieses Messgerätes der  $U_{\text{Wert\_F2}_m}$  und der  $U_{\text{Wert\_F3}_m}$  berechnet (Formeln Tabelle 13), so ist die Rangfolge immer gleich:

- $U_{\text{Wert\_F1.1}_m}$ : höchster Wert
- Abweichung  $U_{\text{Wert\_F3}_m}$  von  $U_{\text{Wert\_F1.1}_m}$ : zwischen -5 % und -27 %
- Abweichung  $U_{\text{Wert\_F1.2}_m}$  von  $U_{\text{Wert\_F1.1}_m}$ : zwischen -22 % und -32 %
- Abweichung  $U_{\text{Wert\_F2}_m}$  von  $U_{\text{Wert\_F1.1}_m}$ : zwischen -44 % und -64 %.

Vergleicht man den  $U_{\text{Wert\_F2}_m}$  der Messgeräte Ahlborn und greenTEG, so ergeben sich Abweichungen zwischen +25 % und -16 %. Die höchsten Abweichungen ergeben sich beim  $U_{\text{Wert\_F3}_m}$  der Messgeräte Ahlborn und Testo mit -22 % bis -106 %. Bei diesem Vergleich werden nur Messungen, welche die Abbruchkriterien gemäss [4] innerhalb von identischen Auswertungsperioden erfüllen, berücksichtigt.

### 5.1.3 Sonderfragen

Für die Auswertung der Messungen werden Sonderfragen untersucht, deren Antwort nachfolgend kurz vorgestellt wird.

#### *Auswirkung unterschiedlich langer Zeiträume auf das Ergebnis der Messung*

Bei der Auswertung einer Messung für drei und für sechs Tage ergibt sich für den  $U_{\text{Wert\_F2}_m}$  und den  $U_{\text{Wert\_F3}_m}$  eine Abweichung von +2 % und für den  $U_{\text{Wert\_F1.1}_m}$  eine Abweichung von +3 %.

#### *Auswirkung unterschiedlicher Zeitspannen innerhalb eines Messzeitraumes*

Es ergeben sich Abweichungen zwischen +2 % ( $U_{\text{Wert\_F2}_m}$  und  $U_{\text{Wert\_F3}_m}$ ) und +3% ( $U_{\text{Wert\_F1.1}_m}$ ).

#### *Auswirkung unterschiedlicher Messintervalle auf das Ergebnis der Messung*

Der Vergleich der Auswertung einer Messung, die in minütlichen Abständen erfasst wird, mit einem Messintervall von 10 Minuten zeigt bei der vorliegenden Auswertungssystematik (F6) keine Abweichung bei den  $U_{\text{Wert\_F1.1}_m}$  Berechnungen. Aufgrund der Summenbildung ist dies zu erwarten.

#### *Auswirkung unterschiedliche Erfassung der Aussentemperatur*

Die Aussentemperatur ist über einen Aussentemperaturfühler mit Strahlungsschirm zu messen. Zum Vergleich wird eine Messung durchgeführt, bei der die Aussentemperatur einmal mit und einmal ohne Strahlungsschirm sowie einmal ohne Strahlungsschirm hinter einem Fensterladen für 24 h an der Nordwestwand erfasst wird. Gemessen wird vom 21.01.2020 8:50 Uhr bis zum 22.01.2020 8:20 Uhr. Der Himmel ist klar (Beitrag oberste Wolkenschicht 1 octa).

Für die Temperaturerfassung hinter dem Fensterladen ergeben sich die höchsten Temperaturen (Mittelwert 0.8 °C), gefolgt von der ungeschützten Erfassung (Mittelwert 0.3 °C). Die tiefsten Temperaturen werden mit dem Strahlungsschirm gemessen (Mittelwert 0.1 °C); dies deutet darauf hin, dass der ungeschützte Sensor Strahlungswärme von der Hauswand bekommt, welche die Abstrahlung an den klaren Himmel überwiegt. Wird überschlägig für die Messung  $M1\_UH\_Ko\_Ah\_3$  die jeweilige Temperaturdifferenz zu den Messdaten für die Aussentemperatur hinzuaddiert, so verändert sich der U-Wert wie folgt:

- Hinter Fensterladen ohne Strahlungsschirm Abweichung zur Referenz:  $U_{\text{Wert\_F1.1}_m}$  +5 %,  $U_{\text{Wert\_F2}_m}$  +3 %,  $U_{\text{Wert\_F3}_m}$  +3 %
- Ohne Strahlungsschirm Abweichung zur Referenz:  $U_{\text{Wert\_F1.1}_m}$  +1 %,  $U_{\text{Wert\_F2}_m}$  +1 %,  $U_{\text{Wert\_F3}_m}$  +1 %

#### *Verwendung Ausgabe Logger (siehe Kapitel 3.3.6)*

- Ahlborn: Im Logger wird der U-Wert gemäss  $U_{\text{Wert\_F2}}$  für jeden Zeitschritt berechnet, dann wird dieser U-Wert gemittelt (keine Prüfung der Gültigkeit gem. ISO 9869-1, siehe 3.3.5). Wird pro Messperiode der letzte Wert der (gemittelten) Zeitreihe genommen (siehe Kapitel 3.3.6), können sich gegenüber der gültigen Messung gemäss ISO 9869-1 Abweichungen zwischen -5 und +10 % ergeben (Basis des Vergleichs: 6 Messungen).
- greenTEG: keine Abweichung, da Messresultat gültig gem. ISO 9869-1.
- Testo: Die Software gibt den U-Wert gemäss  $U_{\text{Wert\_F3}}$  für jeden Zeitschritt aus. Wird als Ergebniswert dieser ausgegeben U-Wert über die Messperiode gemittelt, so können sich gegenüber der gültigen Messung gemäss ISO 9869-1 Abweichungen zwischen 0 und +15 % ergeben (Basis des Vergleichs: 6 Messungen).

### Verwendung letztes Tagesmittel

- Ahlborn: Es können sich Abweichungen zwischen -4 % und +9 % ergeben (Basis des Vergleichs: 6 Messungen, Vergleichswert: Ergebnis gültige Messung gem. ISO 9869-1).
- greenTEG: Es können sich Abweichungen zwischen -3 % und +20 % ergeben (Basis des Vergleichs: 6 Messungen, Vergleichswert: Ergebnis gültige Messung gem. ISO 9869-1).
- Testo: Es können sich Abweichungen zwischen -6 % und +28 % ergeben (Basis des Vergleichs: 6 Messungen, Vergleichswert: Ergebnis gültige Messung gem. ISO 9869-1).

### Auswirkung Temperaturdifferenz $\theta_i$ und $\theta_e$

Abb. 16 zeigt die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen, sowie die Standardabweichung (Streuung) für die einzelnen Datenerfassungsperioden. Es zeigt sich, dass ab dem 07.02.2020 die Temperaturdifferenz merklich kleiner wird ( $< 14$  K). Dies betrifft die Messungen 8 (ausser Ahlborn), 9, 10 und 11. Gleichzeitig steigt die Streuung. Beides ist ein Resultat der steigenden Aussentemperaturen tagsüber. Es wird damit schwieriger eine gültige Messung zu erreichen (speziell mit temperaturbasierten Messgeräten, hier ist die tiefste Temperaturdifferenz, mit der eine gültige Messung erreicht wird 15.2 K).

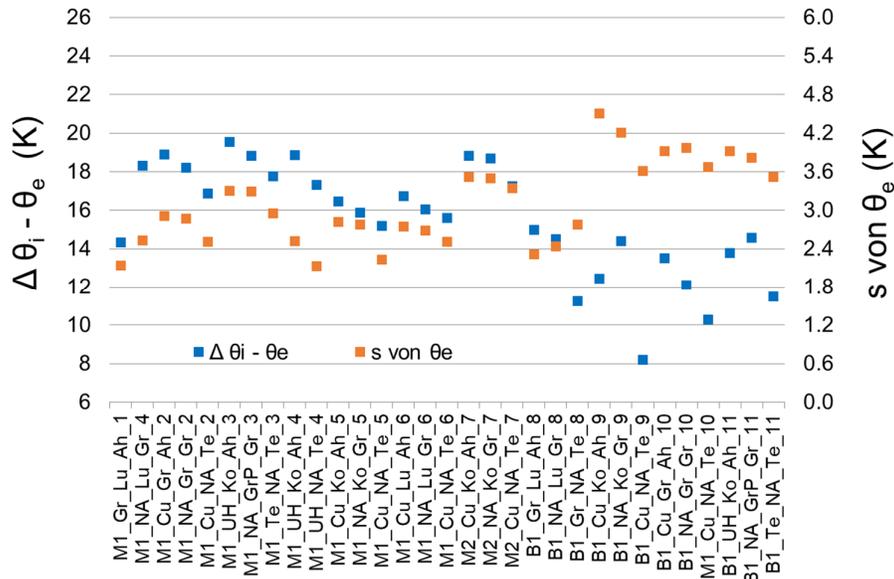


Abb. 16: Temperaturdifferenz und Standardabweichung während der einzelnen Messungen (gezeigt ist jeweils die gesamte Datenerfassungsperiode, die ausgewertete Messperiode (in der Regel 72 h) ist etwas oder deutlich kürzer. Messunsicherheit Temperatursensoren: Ahlborn: 0.4 %, greenTEG: 2.5 % und Testo: 1.5 % des Messwertes)

### 5.1.4 Zusammenfassung und Fazit

Bei den durchgeführten Messungen wird hauptsächlich die Befestigung der Temperaturfühler und Wärme-flussplatten an den Wänden variiert. Trotz der unterschiedlichen Befestigungen sind die Messungen untereinander vergleichbar, da das Messobjekt dasselbe ist und es kann pro Messgerät und Bauteil ein Mittelwert gebildet und mit der Spannweite des U-Wertes gemäss ISO 6946 verglichen werden (Abb. 17).

Es zeigt sich so, dass Ahlborn mit  $U_{Wert\_F1.1m}$  mit der angenommenen Messunsicherheit von 13 % knapp nicht-signifikant über dem rechnerischen  $U_{Wert\_F4b}$  von M1 liegt. Mit  $U_{Wert\_F1.2m}$  liegt Ahlborn innerhalb der berechneten Spannweite. Mit dem  $U_{Wert\_F2m}$  liegt das Messgerät (knapp nicht signifikant) unter der berechneten Spannweite. Beim Beton (B1) liegt für  $U_{Wert\_F1m}$  eine signifikante Überschreitung vor. Mit  $U_{Wert\_F1.2m}$  liegt eine nicht signifikante, deutlich kleinere Überschreitung vor. Für  $U_{Wert\_F2m}$  besteht eine geringfügige, nicht signifikante Unterschreitung.

Der Messwert mit dem Gerät von greenTEG liegt mit dem  $U_{Wert\_F2m}$  beim Mauerwerk etwas unter dem  $U_{Wert\_F4b}$ , jedoch nicht signifikant. Beim Beton zeigt sich eine leichte, ebenfalls nicht signifikante Überschreitung.

Der Messwert mit dem Gerät von Testo liegt mit  $U_{\text{Wert\_F3m}}$  nicht-signifikant unter dem  $U_{\text{Wert\_F4b}}$  beim Mauerwerk, beim Beton gibt es keine gültigen Messungen.

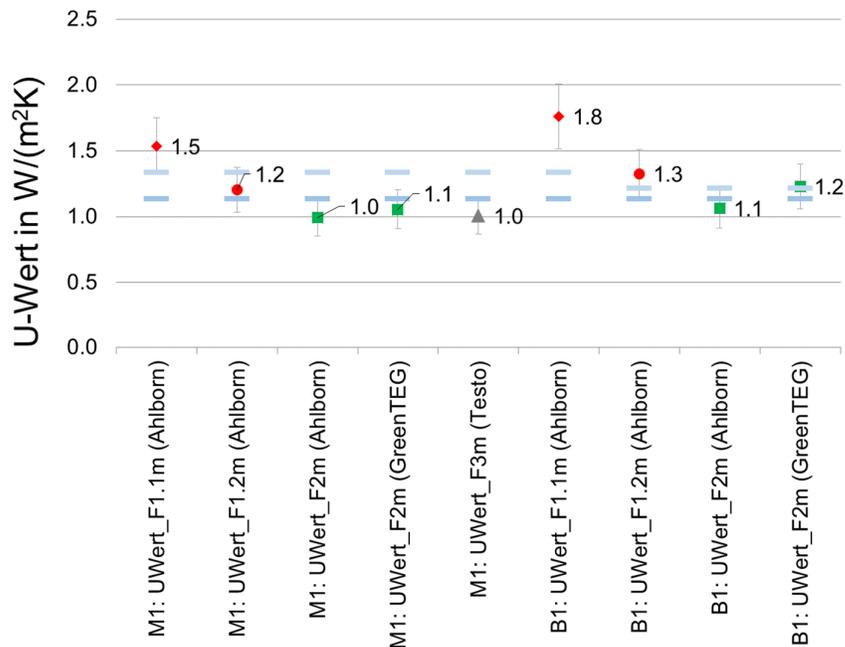


Abb. 17: Übersicht mittlere U-Werte Messung und Berechnung ( $U_{\text{Wert\_F4b}}$ ). Dabei werden die folgenden Messungen berücksichtigt: MW 1:  $U_{\text{Wert\_F1m}}$ : Messung 1-4,6; M1:  $U_{\text{Wert\_F2m}}$ : Messung 1-6; M1:  $U_{\text{Wert\_F3m}}$ : Messung 1-6; B1:  $U_{\text{Wert\_F1m}}$ : Messung 8-10; B1:  $U_{\text{Wert\_F2m}}$ : Messung 8-10. Die blauen Balken zeigen die obere (hellblau) und untere (mittelblau) Grenze der Spannweite des U-Wertes gemäss ISO 6946.

Beim Vergleich der Messungen von M1 und M2 liegen die Differenzen ( $M2 U_{\text{Wert\_F1.1m}}$ :  $1.4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,  $U_{\text{Wert\_F1.1m}}$ :  $1.2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ) im Bereich der Messunsicherheit und es handelt sich um baugleiche Bauteile. Für die Befestigung der Wärmeflussplatte an der Wand bieten sich für die Messgeräte Ahlborn und greenTEG (das Gerät Testo enthält keine Wärmeflussplatte) unterschiedliche Möglichkeiten an: «trockene» Verbindung («Luft»), Kontaktmasse («Putty») und Wärmeleitpaste. Die Auswertung der entsprechenden Messungen zeigen, dass die Befestigung keinen konsistenten Einfluss auf den gemessenen U-Wert hat. Bei den (wenigen) gemachten Messungen können die auftretenden Abweichungen nicht der Befestigungsart der Wärmeflussplatte und der Temperaturfühler zugeordnet werden.

Da das Messgerät Ahlborn die meisten Grössen erfasst, können für dieses Messgerät der  $U_{\text{Wert\_F1.1m}}$ ,  $U_{\text{Wert\_F1.2m}}$ , der  $U_{\text{Wert\_F2m}}$ , sowie der  $U_{\text{Wert\_F3m}}$  berechnet und somit die Ansätze der Messgeräte miteinander verglichen werden (siehe Tabelle 13). Der  $U_{\text{Wert\_F1.1m}}$  ist immer am höchsten, gefolgt vom  $U_{\text{Wert\_F3m}}$  (Abweichung zwischen -5 % und -27 %, Bezug:  $U_{\text{Wert\_F1.1m}}$ ), dem  $U_{\text{Wert\_F1.2m}}$  (Abweichung zwischen -22 % und -32 %) und schliesslich dem  $U_{\text{Wert\_F2m}}$  (Abweichung zwischen -44 % und -64 %). Wird der Wärmeübergangskoeffizient  $h_{\text{si}}$  bei  $U_{\text{Wert\_F1.2}}$  separat aus  $h_{\text{c}}$  und  $h_{\text{r}}$  ermittelt statt der Näherung aus  $q/(T_{\text{se}} - T_{\text{i}})$  wie bei  $U_{\text{Wert\_F1.1m}}$ , so ergeben sich höhere Wärmeübergangskoeffizienten. Dies führt insgesamt zu weniger hohen U-Werten als bei Formel F1.1 (zwischen -22 % und -32 %). Verglichen mit den erwartbaren U-Werten aus der Berechnung aus dem Wandaufbau ( $U_{\text{Wert\_F4b}}$ ) sind die U-Werte aus Formel F1.2 realistischer. Vergleicht man die Messgeräte untereinander, so ergeben sich beim  $U_{\text{Wert\_F2m}}$  (Ahlborn als Basis und greenTEG) Abweichungen zwischen +25 % und -16 %. Beim  $U_{\text{Wert\_F3m}}$  (Ahlborn als Basis und Testo) treten mit -22 % bis -106 % die höchsten Abweichungen auf. Nur einen sehr geringen Einfluss auf das U-Wert Ergebnis haben die folgenden Faktoren:

- Unterschiedlich lange Zeitspannen (3 versus 6 Tage) für die U-Wert Berechnung: +2 % und +3 %
- Unterschiedliche Zeitspannen innerhalb eines Messzeitraumes: +2 % und +3 %
- Unterschiedliche Messintervalle (1 Minute versus 10 Minuten) bei vorliegender Auswertungssystematik (F6): 0 %

- Unterschiedliche Erfassung der Aussentemperatur (Basis für den Vergleich: Strahlungsschirm): hinter Fensterladen ohne Strahlungsschirm: +3 bis + 5 %, ohne Strahlungsschirm: +1 %

Ob die (gültigen) Messergebnisse des Gerätes gemäss ISO 9869-1 gemittelt werden, oder entsprechend der Geräteausgabe angegeben werden kann das Ergebnis zwischen – 5 % bis +10 % (Ahlborn) und zwischen 0 % und +15 % (Testo) beeinflussen. Wird bei der in-situ Messung das letzte Tagesmittel statt dem normativ gemittelten U-Wert genommen, so ergeben sich bei allen Messgeräten Abweichungen (Ahlborn: -4 % und +9 %, greenTEG: -3 % und +20 %, Testo: -6 % und +28 %). Es bleibt festzuhalten, dass beim Messgerät greenTEG der U-Wert bereits softwareseitig korrekt ermittelt wird, was die Anwendung erleichtert.

Auf Grundlage der Daten in diesem Projekt kann der Einfluss des Strahlungsschirms nicht detaillierter quantifiziert werden. Da die untersuchte Messperiode sonnig war (mit täglichen Maximalwerten für die Globalstrahlung auf die nordwestorientierte Fassade zwischen 290 W/m<sup>2</sup> und 340 W/m<sup>2</sup>), widerspricht das Ergebnis den Erwartungen. Um potenzielle Fehlerquellen auszuschliessen, sollte bei der Messung aber ein Strahlungsschirm eingesetzt werden.

## 5.2 Praktische Erfahrung Messungen

### 5.2.1 Allgemein

Aus den Messungen ergeben sich die folgenden Rückschlüsse für die Messanleitung:

- Die Messgeräte lassen sich jeweils an einen PC anschliessen und eine Bedienungssoftware wird mitgeliefert. Werden PCs mit älteren Windows Versionen als Messrechner verwendet, empfiehlt sich eine Abklärung bezüglich der Kompatibilität.
- Wenn neue Geräte in Betrieb genommen werden, empfiehlt sich eine Probemessung vor dem Einsatz beim Kunden.
- Eine grosse Temperaturdifferenz für die Messung ist vorteilhaft. Die aktuellen Messungen zeigen, dass pro Gerätetyp die Empfindlichkeit auf die Temperaturdifferenz unterschiedlich ist.
- Die Messungen nach 24 h kontrollieren, ob die Datenerfassung funktioniert.
- Aussentemperaturfühler stets verschattet mit einem Strahlungsschirm anbringen. Die Position hinter Fensterläden empfiehlt sich nicht, da hier ein möglicherweise vorhandenes Warmluftpolster die Aussentemperatur verfälscht.
- Die Messung möglichst an mehreren Orten am Bauteil wiederholen, um Zufallseffekte zu vermeiden. Idealerweise bei identischen Randbedingungen, d.h., mit mehreren (baugleichen) Messgeräten.
- Eine Messwerterfassung alle 10 Minuten ist ausreichend.
- Für Messgeräte, bei denen die Gültigkeit gemäss Norm nicht während der Messung ausgewiesen wird (Testo und Ahlborn), ist entweder die Messung gleich auszuwerten oder die Messperiode ist ausreichend lange zu wählen (10 Tage).
- Wo eine Verbindung der Wärmeflussplatten mit der Wand mit Wärmeleitpaste möglich ist, sollte dies erfolgen. Der Vorteil ist, dass mit dieser Verbindung Fehlerquellen durch Lufteinschlüsse minimiert werden können. Die Paste hinterlässt auf der Wand allerdings Spuren. Unter der Bedingung, dass die Wandoberfläche glatt ist und eine fleckenfreie Befestigung zwingend erforderlich ist, kann auf die Wärmeleitpaste verzichtet werden.

### 5.2.2 Gerätespezifisch

#### greenTEG

- Sicherstellen, dass die Kalibration der Wärmeflussplatte in der Software vermerkt ist.

#### Testo

- Das U-Wert Messgerät ist standardmässig nicht für Langzeitmessungen von mehreren Tagen ausgelegt. Für diese empfiehlt es sich, einen Netzstecker zu verwenden.
- Der Funkfühler hat eine Auto-Off Funktion. Um diese auszuschalten, muss der linke Schieber in der Batteriebox unten sein. Es gibt auch im Messgerät selber eine Auto-Off Funktion. Es empfiehlt sich

diese und gleichzeitig auch die Auto-Off Funktion in der Gerätsoftware (wenn es über den PC bedient wird) auszuschalten.

- Ausgebener U-Wert: Berechnung U-Wert für jeden Zeitschritt. Kein Test gem. ISO 9869

Ahlborn

- Ausgebener U-Wert: Berechnung experimenteller U-Wert (UWert\_F2) für jeden Zeitschritt, dann Mittelung dieses U-Wertes. Kein Test gem. ISO 9869-1.

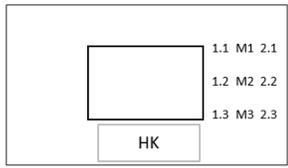
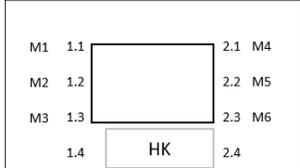
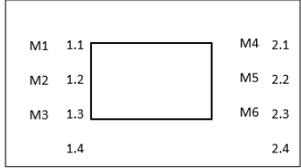
### 5.3 Feuchte

Tabelle 20 zeigt, dass sich die Feuchte der Wand während des Messverlaufs nicht oder nur geringfügig geändert hat. Am ehesten ist dies noch im Keller der Fall, wo sich im Messbereich die Feuchte von 59 auf 63 Digits erhöht hat. Aussen sind die Bauteile nach Südost im März etwas feuchter als im Januar (zum Vergleich: der Wind kam im Januar 10 Tage vor der Messung im Mittel aus Südost und im März im Mittel aus Süd).

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der Feuchtegehalt der Wände das Messergebnis für die U-Wert Messung nicht beeinflusst hat.

Das Mauerwerk kann gemäss 3.2.4 und [25] insgesamt an der Grenze zwischen «normal trocken» und «halbtrocken» eingeordnet werden (Annahme Rohwichte: 1200 – 1800 kg/m<sup>3</sup>). Der Beton gilt als «normal trocken».

Tabelle 20: Messpunkte für die Feuchtemessungen. Verwendete Abkürzungen: HK = Heizkörper. MW = Mittelwert. Messpunkt M1 bis M3 geben jeweils den Bereich für die U-Wert Messung an. Die Zahlen kennzeichnen weitere Messpunkte.

	Mauerwerk 1, Nordwest		Mauerwerk 2, Südost		Beton 1, Südost	
Messpunkte						
	08.01.20	09.03.20	08.01.20	09.03.20	08.01.20	09.03.20
MW alle Messpunkte [digits]	54	55	55	55	59	58
MW M1 – M3 [digits]	54	54	60	59	59	63
MW aussen	48	47	49	55	63	77

## 6. Resultate Messungen Labor

### 6.1 U-Wert Labor

#### 6.1.1 Wand Mauerwerk M3 Messwerte Hotbox

##### 6.1.1.1 U-Wert Messung Basis

Um einen Einfluss der in-situ Messgeräte auf das Messergebnis auszuschliessen werden die Messungen am 30.08.2020 und am 31.08.2020 ohne die Messgeräte durchgeführt (Tabelle 21). «Es zeigt sich, dass die Normwerte mit und ohne In-situ-Messgeräte keine signifikanten Unterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % aufweisen. Dies bedeutet, dass die in-situ Messgeräte das Messergebnis der Hotbox nicht beeinflussen.» [31].

Vergleicht man den UWert\_F1<sub>in</sub> mit dem berechneten UWert\_F4<sub>b</sub> für das Mauerwerk M3 (1.0 – 1.1 W/(m<sup>2</sup>K), Kapitel 3.2.2), so liegen alle Messwerte liegen ca. 3 % bis 13 % unterhalb des Rechenwerts.

Tabelle 21: Messergebnisse Mauerwerk [31], M3.

Messdatum	Kommentar	UWert_F1, ohne Messgeräte mit Wärmeübergangswiderstand gem. Messung	UWert_F1 <sub>in</sub> mit Wärmeüber- gangswiderstand gem. Norm
		W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K
30.08.20	Ohne Messgeräte	0.900 ± 0.024	0.970 ± 0.021
31.08.20	Ohne Messgeräte	0.900 ± 0.024	0.970 ± 0.021
01.08.20 – 19.08.20	Mit Variation der Luftge- schwindigkeit auf Kaltseite und mit Messgeräten	0.860 ± 0.019 – 0.925 ± 0.024	0.960 ± 0.022 – 0.970 ± 0.020

### 6.1.1.2 Variation Luftgeschwindigkeit auf der Kaltseite

Tabelle 22 zeigt die Messergebnisse mit unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten auf der Kaltseite. Dabei werden die Messungen am 01.08. und am 04.08.20 mit Luftleitblech gemacht. Das bedeutet, dass das Bauteil in einem definierten Winkel angeströmt wird.

Die übrigen Messungen werden ohne Luftleitblech durchgeführt, d. h. frei angeströmt. Bei beiden Messungen ist ein Trend zu einem höheren, d.h. schlechteren U-Wert mit höherer Luftgeschwindigkeit feststellbar. Das ist zu erwarten, da der Wärmeübergangswiderstand mit zunehmender Luftgeschwindigkeit abnimmt.

Der Normwert bleibt gleich, da hier die normativen Wärmeübergangswiderstände berücksichtigt werden.

Tabelle 22: Messergebnisse Mauerwerk mit Variation Luftgeschwindigkeit auf der Kaltseite [31], M3.

Messdatum	Luftgeschwindigkeit auf Kaltseite	UWert_F1, ohne Messgeräte mit Wärmeübergangswiderstand gem. Messung	UWert_F1 <sub>in</sub> mit Wärmeüber- gangswiderstand gem. Norm
	m/s	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)
04.08.20	0.29 ± 0.01	0.900 ± 0.019	0.975 ± 0.010
01.08.20	0.75 ± 0.02	0.925 ± 0.019	0.970 ± 0.013
14.08.20	0.86 ± 0.01	0.860 ± 0.019	0.960 ± 0.015
11.08.20	1.35 ± 0.01	0.870 ± 0.019	0.950 ± 0.012
19.08.20	1.94 ± 0.03	0.900 ± 0.013	0.970 ± 0.014

### 6.1.1.3 Variation Lufttemperatur Kaltseite

Zur Untersuchung des dynamisch thermischen Verhaltens wird die Lufttemperatur auf der Kaltseite im Verlauf von 24 h mit einem sinusförmigen Verlauf und einer Amplitude von 5 K variiert (3 volle Durchgänge). Für die Analyse wird die zweite Schwingungsperiode ausgewählt. Dort ergeben sich die folgenden Werte [31]:

- Kaltseite Temperatur Amplitude: 3.74 ± 0.03 K
- Kaltseite Phasenverschiebung zur Lufttemperatur : 0.83 ± 0.93 h
- Warmseite Temperatur Amplitude: 0.1240 ± 0.0003 K
- Warmseite Phasenverschiebung zur Lufttemperatur auf der Kaltseite: 12.3 ± 2.1 h
- Messwert Amplitudendämpfung: 30.15 ± 0.23

### 6.1.2 Wand Mauerwerk M3 Messwerte in-situ Messgeräte

Tabelle 23 zeigt die Messwerte der Hotbox für den U-Wert und die Ergebnisse der in-situ Messgeräte. «Bei den betrachteten Messergebnissen handelt es sich um die Messergebnisse, welche das jeweilige in-situ-Messgerät als Wärmedurchgangskoeffizienten ausweist» [33]. Die gegebenen Werte stellen die Tagesmittelwerte dar [33].

Es werden die folgenden U-Werte festgestellt (Angabe Vertrauensintervalle siehe Tabelle 23):

- UWert\_F1<sub>i</sub> (Referenz): 0.86 – 0.93 W/(m<sup>2</sup> K)
- UWert\_F2 (Ahlborn): 0.85 – 0.89 W/(m<sup>2</sup> K)

- UWert\_F2 (greenTEG): 1.0 – 1.1 W/(m<sup>2</sup>K)
- UWert\_F3 (Testo): 1.2 – 2.2 W/(m<sup>2</sup>K)

Um die Abweichungen der in-situ Geräte von der Hotboxmessung zu ermitteln, wird der UWert\_F1<sub>i</sub> der Hotbox als Bezugspunkt genommen. Es wird die folgende Rangfolge deutlich (Abb. 18):

- UWert\_F2 (Ahlborn): dieser liegt mit -6 % und +2 % Abweichung am nächsten bei der Hotbox
- UWert\_F2 (greenTEG): er übersteigt die Hotboxwerte um +15 - +20 %
- UWert\_F3 (Testo): er übersteigt die Hotboxwerte um +24 - +27 %. Vergleichsbasis ist hier der UWert\_F1<sub>in</sub>, da der UWert\_F3 mit normativen Wärmeübergängen berechnet wird.

Die Sensoren der in-situ Messgeräte werden in der Hotbox auf zwei Arten an der Wand befestigt: Bei der Variante «M3\_Gr\_Lu» ist die Wärmeflussplatte nur an den Rändern mit Klebeband auf der Wand fixiert und die Temperatursensoren sind mit Kontaktmasse («Putty») befestigt. Bei Variante M3\_Cu\_Ko ist die Wärmeflussplatte mit Wärmeleitpaste mit der Wand verbunden und die Temperatursensoren mit Kupferband fixiert. Zu erwarten wäre, dass bei der Variante M3\_Cu\_Ko der U-Wert höher, d. h. schlechter ist, da hier eine besser leitende Verbindung zwischen den Sensoren und der Wand besteht. Bei keinem der Messgeräte (Abb. 18) kann eine klare Tendenz in die erwartete Richtung festgestellt werden. Betrachtet man die Unterschiede der Messergebnisse für die in-situ Messgeräte von denen der Hotbox hinsichtlich der Befestigungsart, so kann beim UWert\_F2 (Ahlborn) eine geringere Abweichung vom Hotboxwert festgestellt werden (+2 %), wenn die Befestigung mit Wärmeleitpaste und Kupferband gewählt wird (M3\_Gr\_Lu: -4 % bis -6 %). Bei den anderen Messgeräten ist diese Tendenz weniger eindeutig.

Tabelle 23: Zusammenfassung der Messwerte der Mauerwerkswand (M3) [33]. Informativ sind nochmals die Messwerte der Hotboxmessungen aus Tabelle 22 angegeben. Verwendete Abkürzungen: Lu = Luft («trockene» Verbindung), Cu = Kupferband, Gr («Putty») = Kontaktmasse (Firma greenTEG), Ko = Thermische Leitpaste der Firma Dow Corning.

Befestigung Sensoren	Messdatum Hotbox / in- situ Geräte	UWert_F1 <sub>i</sub> (Hotbox)	UWert_F1 <sub>in</sub> (Hotbox)	UWert_F1 (Ahlborn)	UWert_F2 (Ahlborn)	UWert_F2 (greenTEG)	UWert_F3 (Testo)
		W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)
M3_Gr_Lu_1	01.08.2020 / 02.08.20	0.925 ± 0.024	0.97 ± 0.020	n.a.	0.89 ± 0.085	1.06 ± 0.049	1.2 ± 0.028
M3_Gr_Lu_2	04.08.2020 / 03.08.20	0.9 ± 0.019	0.975 ± 0.016	n.a.	0.85 ± 0.081	1.06 ± 0.049	1.19 ± 0.028
M3_Cu_Ko_1	11.08.2020 / 12.08.20	0.87 ± 0.023	0.95 ± 0.018	n.a.	0.89 ± 0.087	1.04 ± 0.052	1.21 ± 0.03
M3_Cu_Ko_2	14.08.2020 / 13.08.20	0.86 ± 0.023	0.96 ± 0.022	n.a.	0.88 ± 0.084	1.03 ± 0.048	1.2 ± 0.033

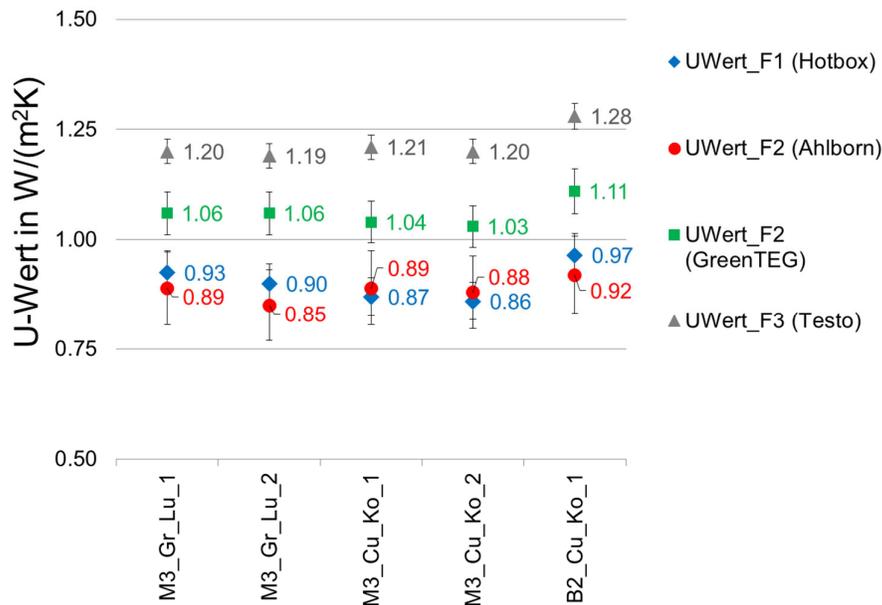


Abb. 18: Grafische Übersicht Messergebnisse U-Wert für die Hotbox und die in-situ Messgeräte für die Mauerwerkswand M3 und die Betonwand B2.

### 6.1.3 Wand Beton B2 Messwerte Hotbox

#### 6.1.3.1 U-Wert Messung Basis

Die Messungen werden einmal mit und einmal ohne Messgeräte durchgeführt. Es treten «keine signifikanten Unterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %» auf [32]. Im Vergleich zur berechneten Spannweite des UWert\_F4<sub>b</sub> mit 1.1 – 1.2 (B2, Kapitel 3.2.2) stimmen die Messwerte gut überein (maximale Unterschreitung 7 %).

Tabelle 24: Messergebnisse Betonwand [32], B2

Messdatum	Kommentar	UWert_F1 <sub>i</sub> ohne Messgeräte mit Wärmeübergangswiderstand gem. Messung	UWert_F1 <sub>in</sub> mit Wärmeübergangswiderstand gem. Norm
		W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)
30.11.20	U-Wert mit Messgeräten mit Wärmeübergangswiderstand gem. Messung	0.97 ± 0.03	1.10 ± 0.03
30.08.20	U-Wert ohne Messgeräte	0.98 ± 0.03	1.11 ± 0.03

#### 6.1.3.2 Variation Lufttemperatur Kaltseite

Zur Untersuchung des dynamisch thermischen Verhaltens wird die Lufttemperatur auf der Kaltseite im Verlauf von 24 h mit einem sinusförmigen Verlauf und einer Amplitude von 5 K variiert (6 volle Durchgänge). Für die Analyse wird die fünfte Schwingungsperiode ausgewählt. Dort ergeben sich die folgenden Werte [31]:

- Kaltseite Temperatur Amplitude:  $2.94 \pm 0.00$  K
- Kaltseite Phasenverschiebung zur Lufttemperatur: 1.0 h
- Warmseite Temperatur Amplitude:  $0.12 \pm 0.00$  K
- Warmseite Phasenverschiebung zur Lufttemperatur auf der Kaltseite:  $10.3 \pm 1.4$  h
- Messwert Amplitudendämpfung:  $25.30 \pm 0.05$

#### 6.1.4 Betonwand B2 Messwerte in-situ Messgeräte

Um die Abweichungen der in-situ Geräte von der Hotboxmessung zu ermitteln, wird der UWert\_F1<sub>i</sub> der Hotbox als Bezugspunkt genommen. Die Rangfolge, die beim Mauerwerk M3 festgestellt wurde, bestätigt sich (Abb. 18):

- am nächsten bei der Hotbox liegt der UWert\_F2 (Ahlborn) mit -5 % Abweichung
- der UWert\_F2 (greenTEG) übersteigt die Hotboxwerte um +15 %
- der UWert\_F3 (Testo) übersteigt die Hotboxwerte um +16 %. Vergleichsbasis ist hier der UWert\_F1<sub>in</sub>, da der UWert\_F3 mit normativen Wärmeübergängen berechnet wird.

Tabelle 25: Zusammenfassung der Messwerte der Mauerwerkswand (M3) [33]. Informativ sind nochmals die Messwerte der Hotboxmessungen aus Tabelle 24 angegeben. Verwendete Abkürzungen: Cu = Kupferband, Ko = Thermische Leitpaste der Firma Dow Corning

Befestigung	Messdatum	UWert_F1 <sub>i</sub> (Hotbox)	UWert_F1 <sub>in</sub> (Hotbox)	UWert_F1 (Ahlborn)	UWert_F2 (Ahlborn)	UWert_F2 (greenTEG)	UWert_F3 (Testo)
Sensoren	Hotbox / in-situ Geräte	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)
B2_Cu_Ko	03.11.2020 / 02.11.20	0.97 ± 0.03	1.10 ± 0.03	n.a.	0.92 ± 0.09	1.11 ± 0.05	1.28 ± 0.03

#### 6.1.5 Zusammenfassung

Vergleicht man den UWert\_F1<sub>in</sub> mit dem berechneten UWert\_F4<sub>b</sub> für das Mauerwerk M3 (1.0 – 1.1 W/(m<sup>2</sup>K), Kapitel 3.2.2), so liegen alle Messwerte ca. 3 % bis 13 % unterhalb des Rechenwerts. Beim Beton unterschreiten die gemessenen Werte die Berechnung um maximal 7 %.

Bei der Variation der Luftgeschwindigkeit auf der Kaltseite ist beim Mauerwerk ein Trend zu einem höheren, d.h. schlechteren U-Wert mit höherer Luftgeschwindigkeit feststellbar. Das ist zu erwarten, da der Wärmeübergangswiderstand mit zunehmender Luftgeschwindigkeit abnimmt.

Wird die Lufttemperatur auf der Kaltseite variiert, so wird beim Mauerwerk eine grössere Phasenverschiebung (12.3 ± 2.1 h) als beim Beton (10.3 ± 1.4 h) gemessen. Dies gilt auch für die Amplitudendämpfung, die beim Mauerwerk bei 30.2 ± 0.2 liegt, beim Beton bei 25.30 ± 0.05.

Die unterschiedliche Befestigung der Sensoren auf der Mauerwerkswand hat keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis.

Um die Abweichungen der in-situ Geräte von der Hotboxmessung zu ermitteln, wird der UWert\_F1<sub>i</sub> der Hotbox als Bezugspunkt genommen. Es wird die folgende Rangfolge deutlich (Abb. 18):

- UWert\_F2 (Ahlborn): Beim Mauerwerk liegt dieser mit -6 % und +2 % Abweichung und beim Beton mit -5 % Abweichung am nächsten bei der Hotbox.
- UWert\_F2 (greenTEG): beim Mauerwerk übersteigt er die Hotboxwerte um +15 - +20 %, beim Beton um +15 %.
- UWert\_F3 (Testo): Der Wert übersteigt die Hotboxwerte beim Mauerwerk um +24 - +27 %, beim Beton um +16 %. Vergleichsbasis ist hier der UWert\_F1<sub>in</sub>, da der UWert\_F3 mit normativen Wärmeübergängen berechnet wird.

## 6.2 Feuchte

### 6.2.1 Mauerwerk M3

Die Feuchte wird zwischen dem 01.08.2020 und dem 31.08.2020 bei jeder der sieben U-Wert Messungen bestimmt. Es ergeben sich die folgenden Bandbreiten (alle Werte siehe Tabelle 35):

- Kaltseite: relative Feuchte 69.5 ± 1.6 % - 93.67 ± 0.076 %
- Kaltseite: Wassergehalt 0.77 (+0.15, -0.57) – 1.2 (+0.98, -0.79) m-%
- Warmseite: relative Feuchte 42.6 ± 1.6 % - 44.31 ± 0.89 %
- Warmseite: Wassergehalt 0.35 (+0.18, -0.22) – 0.35 (+0.19, -0.22) m-%

– Darrprüfung (01.09.20) Wassergehalt 0.15 (+0.06, -0.07) m-%

Die Schwankungen bewegen sich in einem Mass, das das Messergebnis für die U-Werte nicht beeinflusst.

### 6.2.2 Beton, B2

Die Feuchte wird am 03.11.2020 und am 18.11.2020 bestimmt. Es ergeben sich die folgenden Bandbreiten (alle Werte siehe Tabelle 36):

- Kaltseite: relative Feuchte  $51.75 \pm 0.37$  % -  $54.64 \pm 0.16$  %
- Kaltseite: Wassergehalt 1.8 (+0.46, -0.27) – 1.95 (+0.48, -0.3) m-%
- Warmseite: relative Feuchte  $55.08 \pm 0.34$  % -  $57.23 \pm 0.14$  %
- Warmseite: Wassergehalt 1.98 (+0.48, -0.30) – 2.11 (+0.48, -0.30) m-%
- Darrprüfung (10.12.20) Wassergehalt 0.45 (+0.11, -0.05) m-%

Es sind kaum Schwankungen feststellbar.

## 7. Resultate Simulationen

### 7.1 Modellvalidierung

Tabelle 26 zeigt die Simulationsergebnisse für das Bauteil Beton mit den aus der Messung berechneten und als «best fit» ermittelten sowie mit den normativen Wärmeübergangskoeffizienten. Die Differenzen der gemessenen und simulierten Mittelwerte von  $\theta_{si}$ ,  $\theta_{se}$  und des Wärmestroms werden mit den angepassten Wärmeübergangsperioden als hinreichend gering erachtet. Die RMSE-Werte (siehe 3.5.2) reduzieren sich durch die Anpassung der Wärmeübergangskoeffizienten auch deutlich. Der RMSE-Wert der Wärmestromdichte entspricht ca. 7 % der mittleren Wärmestromdichte des betrachteten Zeitraums und wird ebenfalls als ausreichend gering erachtet.

Die weiteren Simulationsergebnisse beruhen damit auf dem Modell mit den genannten Anpassungen.

Tabelle 26: Ergebnisse Vergleich Messung und Simulation Wand Beton. Verwendete Abkürzungen: h = Wärmeübergangskoeffizient, i = innen, e = aussen,  $\Delta$  = Differenz,  $\theta$  = Temperatur (°C), si = Oberfläche innen, se = Oberfläche aussen, q = Wärmestromdichte (W/m<sup>2</sup>), RMSE = Root Mean Square Error (dt.: Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)  
Betrachtungszeitraum: 28.01.2021 11:16 Uhr bis 13.02.2020 11:16 Uhr.

$h_{se}$	$h_{si}$	$\Delta\theta_{si}$	$\Delta\theta_{se}$	$\Delta q$	RMSE i	RMSE e	RMSE q
W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	K	K	W/m <sup>2</sup>	K	K	W/m <sup>2</sup>
12.0	5.8	0.04	0.44	-0.05	0.22	0.90	1.19
25.0	7.7	-0.36	0.98	-2.6	0.42	1.54	2.99

### 7.2 Untersuchung operativer Fehler der Wärmeflussplatte

Die Ergebnisse zeigen, dass je nach Material der Wärmeflussplatte der operative Fehler der Wärmeflussplatte zwischen 0 % und 2 % liegen kann. Der Hersteller Ahlborn gibt als Material für die Platte Epoxidharz an. Da die genaue Wärmeleitfähigkeit des Materials nicht bekannt ist, wird in der Messunsicherheitsanalyse von einer einschlägigen Unsicherheit von 2 % ausgegangen, die Messdaten werden jedoch nicht mit einem Offset o.ä. korrigiert.

Tabelle 27: Ergebnisse operativer Fehler Wärmeflussensor.

Wärmeleitfähigkeit W/(m K)	Ähnlichkeit mit	Abweichung Wärmestromdichte von Kupfer (%)
0.18	PVC	-2.5
1.2	Epoxidharz	-0.2
8.8	beidseitig Lackschicht aus Epoxidharz, Kern Kupfer	-0.1
380	Kupfer	0.0

### 7.3 Untersuchung Klebe- und Kontaktmittel

In der Simulation werden die Wärmeübergänge  $h_{se}$  und  $h_{si}$  vorgegeben. Damit ist die Simulation in Bezug auf die Auswertungen gemäss UWert\_F1.1 und UWert\_F1.2 überbestimmt. Die Auswertung konzentriert sich somit auf UWert\_F2. Tabelle 28 zeigt unterschiedliche Varianten für die Befestigung der Sensoren und die resultierenden U-Werte auf. Wenn Die Schichtdicke der Verbindung zwischen Sensor und Wand 0.1 mm stark ist, dann liegen die Ergebnisse für den UWert\_F2<sub>s</sub> zwischen 1.08 und 1.09 W/(m<sup>2</sup> K). Die Abweichung zwischen den Verbindungen mit  $\lambda = 0.8$  und  $\lambda = 0.1$  W/(m K) liegt bei 0.3 %. Bei einer Schichtdicke von 0.5 mm ist der U-Wert UWert\_F2<sub>s</sub> im Bereich von 1.07 und 1.08 W/(m<sup>2</sup> K). Die Abweichung zwischen den Verbindungen mit  $\lambda = 0.8$  und  $\lambda = 0.1$  W/(m K) liegt bei 1.5 %

Der mit den in der Simulation verwendeten Wärmeübergängen berechnete UWert\_F4<sub>b</sub> liegt bei 1.1 W/(m<sup>2</sup> K).

Tabelle 28: Simulationsvarianten und Ergebnisse für die Befestigungsmittel der Sensoren und der Wärmeflussplatte. Die Schichtdicke der Verbindung zwischen Sensor und Wand beträgt immer 0.1 mm, bzw. 0.5 mm. Alle simulierten U-Werte  $\pm 4.7$  % (Standardabweichung, s)

Material Wärme- flussplatte	Material Tempera- turfühler	$\lambda$ Verbindung Senso- ren mit Wand W/(m K)	UWert_F2 simuliert, Schichtdicke Verbindung Sensor Wand:0.1 mm W/(mK)	UWert_F2 simuliert, Schichtdicke Verbindung Sensor Wand:0.1 mm W/(mK)
PVC	Kupfer	0.8	1.09	1.08
PVC	Kupfer	0.4	1.09	1.08
PVC	Kupfer	0.2	1.09	1.08
PVC	Kupfer	0.1	1.08	1.07

### 7.4 Vergleich Simulation und in-situ Messungen

Gemäss Abschnitt 3.5.2 werden im Simulationsmodell ausschliesslich die Wärmeübergangskoeffizienten angepasst, d.h., z.B. die Wärmeleitfähigkeit der Materialien wird nicht verändert – grundsätzlich liesse sich damit eine weitere Verbesserung der Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erzielen. Für die hier durchgeführten Einfluss-Abschätzungen wird das jedoch als nicht nötig betrachtet.

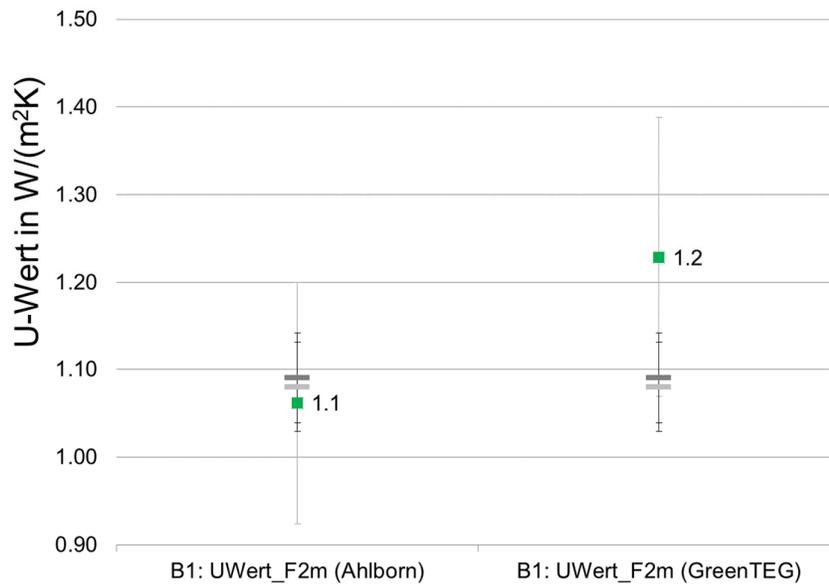


Abb. 19 Vergleich zwischen Messungen und Simulationen. Der dunkelgraue Balken gibt das Simulationsergebnis PVC\_08 an, der hellgraue Balken das Simulationsergebnis PVC\_01. Alle gemessenen U-Werte  $\pm 13\%$ , alle simulierten U-Werte  $\pm 4.7\%$  (einfache Standardabweichung, s)

Der Vergleich mit den Messungen in Abb. 19 zeigt, dass der simulierte U-Wert mit den angenommenen Materialeigenschaften 2.6 % (Messung Ahlborn) über und bis 14 % (Messung greenTEG) unter den Messresultaten liegt. Die Abweichungen für die Messung Ahlborn liegen innerhalb der Unsicherheitsbereiche. Die grösseren Abweichungen beim Messgerät GreenTEG kommen daher, dass  $\theta_i$  und  $\theta_e$  als Eingangsparameter für die Simulation vom Messgerät Ahlborn stammen (das Messgerät GreenTEG gibt die für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten notwendigen Werte für  $\theta_{si}$  und  $\theta_{se}$  nicht aus).

## 8. Vergleich Messung in-situ und Labor

### 8.1 Vergleich Mauerwerkswand Messung in-situ (M1/M2) und Labor (M3)

Abb. 20 zeigt die Messergebnisse für die Messgeräte in der Hotbox und im freien Feld (in-situ). Die Werte für die Geräte im freien Feld beziehen sich auf eine Mittelung der Messungen für das Mauerwerk M1 und M2 (siehe Abb. 17, Abschnitt 5.1.4).

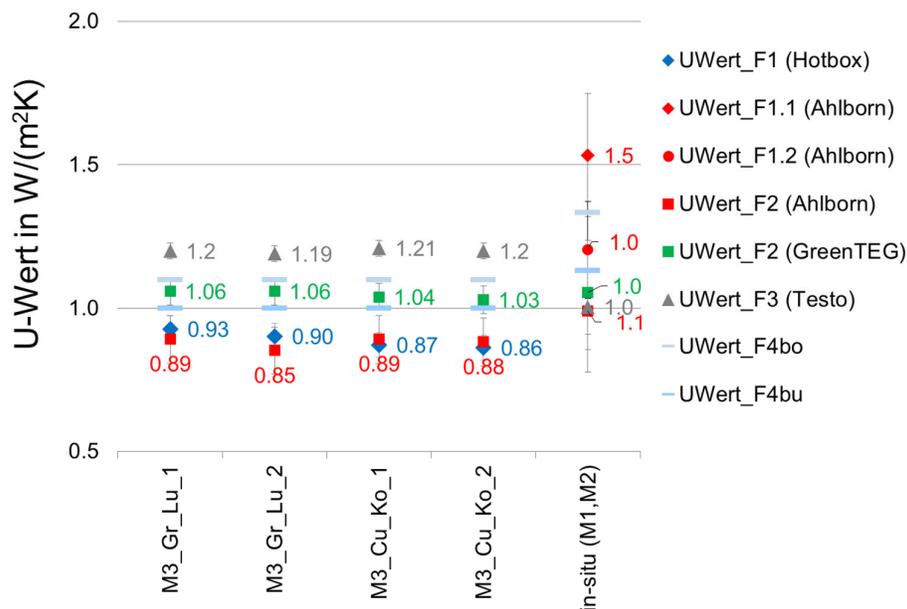


Abb. 20: Ergebnisse für Messergebnisse der in-situ Geräte im freien Feld (Mauerwerkswand M1/M2) und in der Hotbox (Mauerwerkswand M3).

Die Berechnungen (UWert\_F4<sub>b</sub>) für das Mauerwerk M1/M2 und M3 zeigen, dass die U-Werte beider Konstruktionen zwischen 12 % und 20 % auseinanderliegen. Es sind also unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten und aus den Messungen im Feld könnten etwas höhere U-Werte resultieren. Der Vergleich mit dem berechneten UWert\_F4<sub>b</sub> (Tabelle 10) zeigt, dass in der Hotbox die Messergebnisse für das Gerät von greenTEG genau in der berechneten Spannweite liegen (Abb. 20, M3\_Gr\_Lu\_1 und \_2, sowie M3\_Cu\_Ko\_1 und \_2). Das Gerät von Ahlborn und die Hotbox (-3 % bis -13 %) selber unterschreiten die berechnete Spannweite, das Gerät von Testo überschreitet die Berechnungen. Bei der Messung im freien Feld (Abb. 20, in-situ («M1, M2»)) ergibt sich für die Berechnung eine grössere Spannweite, da das Bauteil einen anderen U-Wert aufweist. In dieser Spannweite liegt das Gerät Ahlborn mit UWert\_F1.2. Die Geräte Ahlborn (UWert\_F2), greenTEG und Testo liegen unter dieser Spannweite. Gemäss ISO 9869-1 (Abschnitt 2.1.3) liegt der UWert\_F1.1 (Ahlborn) signifikant über der unteren Grenze (Abb. 20, UWert\_F4<sub>bu</sub>) und nicht signifikant über der oberen Grenze der berechneten Werte (Abb. 20, UWert\_F4<sub>bo</sub>).

Um eine Aussage zu den Messgeräten machen zu können, werden zwei Vergleiche gezogen:

- Messgerät / Messgerät: Hier werden die Messwerte im freien Feld mit den Messwerten der Geräte in der Hotbox verglichen.
- Messgerät / Hotbox: Hier werden die Messwerte im freien Feld mit der Hotbox ( $\bar{x}$  für UWert\_F2<sub>i</sub> aus Tabelle 23) verglichen. Auch hier sind Überschreitungen zu erwarten.

Die Ergebnisse dieses Vergleichs zeigt Tabelle 29. Bezogen auf die Messgeräte lassen sich die folgenden Rückschlüsse ziehen:

- Ahlborn
  - UWert\_F1.1: Der U-Wert überschreitet den Hotboxwert um 73 %. Diese Überschreitung liegt signifikant ausserhalb der erwarteten Spannweite.
  - UWert\_F1.2: Der U-Wert überschreitet den Hotboxwert um 35 %. Diese Überschreitung liegt signifikant ausserhalb der erwarteten Spannweite.
  - UWert\_F2: Der im freien Feld gemessene U-Wert liegt zwischen +12 % und +17 % über dem mit den Messgeräten in der Hotbox gemessenen Wert. Das erfüllt die Erwartung an einen schlechteren U-Wert. Dies trifft auch auf den Vergleich des Messgerätes in der Hotbox mit dem Hotboxwert zu.
- greenTEG: Die Erwartung an eine Abweichung, bzw. Überschreitung wird nicht erfüllt.

– Testo: Die Messwerte des Gerätes in der Hotbox werden im freien Feld unterschritten, sind also tiefer. Das widerspricht der Erwartung, da das Bauteil im freien Feld einen höheren U-Wert hat. Beim Vergleich des Messgerätes in der Hotbox mit dem Hotboxwert liegt das Messgerät über dem Hotboxwert. Werden die Messwerte des Gerätes von Ahlborn mit der Formel  $U_{Wert\_F2}$  ausgewertet, misst das Gerät am verlässlichsten.

Tabelle 29: Abweichungen von Messergebnissen der in-situ Messungen von den Messungen in der Hotbox für das Bauteil M1/M2 und M3.  
Kommentar zu  $U_{Wert\_F1}$ , Vergleich Messgerät in-situ und / Messgerät in Hotbox: Da die Rohdaten der Messungen in der Hotbox nicht vorliegen, kann hier kein Vergleich zwischen dem Gerät in der Hotbox und im freien Feld gezogen werden.

Vergleich	U-Wert	Ahlborn	greenTEG	Testo
		Abweichung (%)	Abweichung (%)	Abweichung (%)
Messgerät in-situ / Messgerät in Hotbox	$U_{Wert\_F1.1}$	n. a. *		
Messgerät in Hotbox / Hotbox	$U_{Wert\_F1.1}$	+73		
Messgerät in-situ / Messgerät in Hotbox	$U_{Wert\_F1.2}$	n. a. *		
Messgerät in Hotbox / Hotbox	$U_{Wert\_F1.2}$	+35		
Messgerät in-situ / Messgerät in Hotbox	$U_{Wert\_F2}$	+11 - +17	-1 - +2	
Messgerät in Hotbox / Hotbox	$U_{Wert\_F2}$	+12	+19	
Messgerät in-situ / Messgerät in Hotbox	$U_{Wert\_F3}$			-15 - -17
Messgerät in Hotbox / Hotbox	$U_{Wert\_F3}$			+13

\* = Da die Rohdaten der Messungen in der Hotbox nicht vorliegen, kann hier kein Vergleich zwischen dem Gerät in der Hotbox und im freien Feld gezogen werden.

## 8.2 Vergleich Betonwand Messung in-situ (B1) und Labor (B2)

Abb. 21 zeigt die Messergebnisse für die Betonwand im freien Feld (B1) und in der Hotbox (B2). Da der Bauteilaufbau gleich ist, werden ähnliche Werte wie in der Hotbox erwartet.

Der Vergleich mit dem berechneten  $U_{Wert\_F4b}$  (Kapitel 3.2.2) zeigt, dass in der Hotbox das Gerät von greenTEG den berechneten Wert trifft (Abb. 21, B»\_Cu\_Ko\_1). Der Hotboxwert und das Gerät der Firma Ahlborn liegen unter der errechneten Spannweite, das Gerät von Testo liegt darüber. Im freien Feld wird die Spannweite vom Messgerät Ahlborn ( $U_{Wert\_F2}$ ) knapp unterschritten und mit  $U_{Wert\_F1.2}$  überschritten. Am besten in der berechneten Spannweite liegt das Gerät von greenTEG mit einer knappen Unterschreitung. Gemäss ISO 9869-1 (Abschnitt 2.1.3) liegt der  $U_{Wert\_F1.1}$  (Ahlborn) signifikant über der unteren und der oberen Grenze (Abb. 21,  $U_{Wert\_F4bu}$ ,  $U_{Wert\_F4bo}$ ).

Für eine Aussage zu den Messgeräten werden die folgenden Vergleiche gezogen:

- Messgerät / Messgerät: Hier werden die Messwerte im freien Feld mit den Messwerten der Geräte in der Hotbox verglichen.
- Messgerät / Hotbox: Hier werden die Messwerte der Betonwand im freien Feld mit dem Messwert der Hotbox (für  $U_{Wert\_F2}$  aus Tabelle 23) verglichen. Es sind keine Überschreitungen zu erwarten.

Die Ergebnisse zeigt Tabelle 30. Insgesamt liegen die mit den Geräten im freien Feld gemessenen U-Werte über denen, die mit den Geräten in der Hotbox gemessen wurden. Da die Bauteile B1 und B2 den gleichen Aufbau haben, ist das unerwartet. Zu den Geräten können die folgenden Aussagen gemacht werden:

- Ahlborn:
  - $U_{Wert\_F1.1}$ : Der U-Wert überschreitet den Hotboxwert signifikant um 82 %.
  - $U_{Wert\_F1.2}$ : Der U-Wert überschreitet den Hotboxwert signifikant um 37 %.
  - $U_{Wert\_F2}$ : Die Überschreitungen  $U_{Wert\_F2}$  liegen zwischen +10 % (Messgerät / Hotbox) und +15 % (Messgerät / Messgerät).
- greenTEG: Messgerät / Messgerät und Messgerät / Hotbox: Die Überschreitungen liegen zwischen +11 % (Messgerät / Messgerät) und +27 % (Messgerät / Hotbox).

– Testo: ein Vergleich ist nicht möglich.

Werden die Messwerte des Messgerätes von Ahlborn mit UWert\_F2 ausgewertet, misst das Messgerät am verlässlichsten.

Tabelle 30: Abweichungen von Messergebnissen der in-situ Messungen von den Messungen in der Hotbox für das Bauteil B1 und B2.

Vergleich	U-Wert	Ahlborn	greenTEG	Testo
		Abweichung (%)	Abweichung (%)	Abweichung (%)
Messgerät in-situ / Messgerät in Hotbox	UWert_F1.1	n. a. *		
Messgerät in Hotbox / Hotbox	UWert_F1.1	+82		
Messgerät in-situ / Messgerät in Hotbox	UWert_F1.2	n. a. *		
Messgerät in Hotbox / Hotbox	UWert_F1.2	+37		
Messgerät in-situ / Messgerät in Hotbox	UWert_F2	+15	+11	
Messgerät in Hotbox / Hotbox	UWert_F2	+10	+27	
Messgerät in-situ / Messgerät in Hotbox	UWert_F3	**		
Messgerät in Hotbox / Hotbox	UWert_F3	**		

\* = Da die Rohdaten der Messungen in der Hotbox nicht vorliegen, kann hier kein Vergleich zwischen dem Gerät in der Hotbox und im freien Feld gezogen werden.

\*\* = Ein Vergleich kann nicht gezogen werden, da für die Betonwand im freien Feld keine gültigen Messungen gemacht werden konnten.

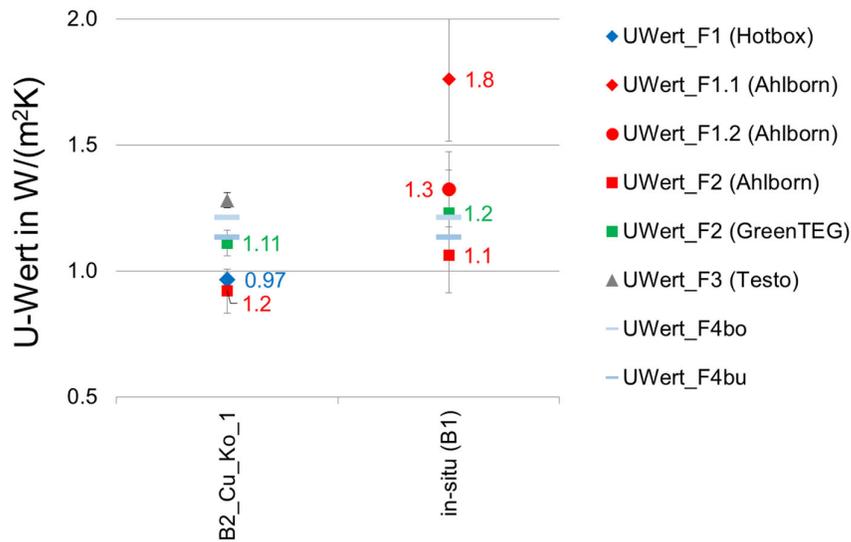


Abb. 21: Ergebnisse für Messergebnisse der in-situ Geräte im freien Feld (Betonwand B1) und in der Hotbox (Betonwand B2).

## 9. Abkürzungsverzeichnis

### 9.1 Variablen

$\varepsilon$  = Emissivität

$h$  = Wärmeübergangskoeffizient ( $W/(m^2 K)$ )

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit ( $W/(m K)$ )

$q$  = Wärmestromdichte ( $W/m^2$ )

$R$  = Wärmedurchlasswiderstand ( $m^2 K/W$ )

$RT$  = Wärmedurchgangswiderstand ( $m^2 K/W$ )

$s$  =  $\sqrt{s^2}$ , Standardabweichung ( $\langle s \rangle$ )

$s^2$  = Varianz ( $\langle s^2 \rangle$ )

$\sigma$  = Stefan-Bolzmann Konstante ( $5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ )

$\theta$  = Temperatur ( $^{\circ}C$ )

$\theta_i$  = Umgebungstemperatur innen; im Weiteren gemäss Definition des U-Wertes auf Grundlage der Lufttemperatur wird hier die Lufttemperatur angesetzt (für Details siehe [4], 4.2 & Annex A) (K)

$T$  = Temperatur (K)

$U$  = Wärmedurchgangskoeffizient ( $W/(m^2 K)$ )

$\Lambda$  = Wärmeleitzahl ( $W/(m^2 K)$ ) =  $q/(T_{si} - T_{se})$

$W$  = Wärmestrom in (W)

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_i = \text{Mittelwert}$$

### 9.2 Indizes

$b$  = Berechnung

$c$  = konvektiv

$e$  = aussen

$i$  = innen

$l$  = Labor

$m$  = Messung

$n$  = Norm

$r$  = langwellig (radiativ)

$s$  = Simulation

$si$  = Wandoberfläche innen

$se$  = Wandoberfläche aussen

## 10. Literatur

- [1] Ahlborn, "Wärmeflussplatte (Typ 117), Thermodratfühler (NiCr-Ni) Datenlogger Almemo 809 (V7)," 2018.
- [2] greenTEG, "gSKIN KIT-2615C calibrated (U-Value Kit)," 2018.
- [3] Testo, "Feuchte-/Temperatur-Messgerät mit Messwertspeicher, Testo 635-2," 2018.
- [4] ISO 9869-1, *Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method*. 2014.
- [5] *Bundesgesetz über die Reduktion der CO2-Emissionen (CO2-Gesetz) vom 23. Dezember 2011*. .
- [6] C. Hoffmann and A. Geissler, "Vorstudie zum Projekt "Die zerstörungsfreie Messung des U-Wertes von Aussenbauteilen - eine praxisorientierte Anwendungshilfe," Energie Schweiz, Bundeamt für Energie BFE, Bern, 2017.
- [7] 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.
- [8] D. Varesano, R. Camponovo, P. Gallinelli, and L. Riquet, “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.
- [9] S. Schwab and L. Riquet, “Rénovation énergétique - approche globale pour l’enveloppe du bâtiment,” TRANSFORM, Haute école d’ingénierie et d’architecture de Fribourg, Fribourg, 2016.
- [10] G. Ficco, F. Iannetta, E. Ianniello, F. R. d’Ambrosio Alfano, and M. Dell’Isola, “U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings,” *Energy Build.*, vol. 104, pp. 108–121, 2015.
- [11] W. Hässig and S. Wyss, “UFELD: Feldmessungen von U-Werten zur Überprüfung der im Gebäudeenergieausweis (GEAK) hinterlegten U-Werte,” Susstech (im Auftrag des BFE), Bern, 2017.
- [12] C. Hoffmann and A. Geissler, “The prebound-effect in detail: real indoor temperatures in basements and measured versus calculated U-values,” *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 32–37, 2017.
- [13] SIA D 47, *k-Wert-Messungen am Bau*. Schweiz, 1981.
- [14] Ahlborn, *ALMEMO Handbuch für alle ALMEMO Messgeräte und Sensoren*. Holzkirchen: Ahlborn, 2020.
- [15] greenTEG, “U-Wert Messung mit dem gSKIN® U-Wert Kit,” Rümlang, 2019.
- [16] Testo, “Temperaturfühler zur U-Wert Bestimmung 0614 1635: Anwendungshinweise,” Lenzkirch, 2006.
- [17] greenTEG, “Gebrauchsanleitung für das gSKIN® U-Wert Kit,” Rümlang, 2016.
- [18] greenTEG, “U-Wert Messung mit dem gO Mess-System,” Rümlang, 2019.
- [19] greenTEG, “Montageempfehlung für gO Mess-System® Messknoten und Sensoren,” Rümlang, 2018.
- [20] C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik - Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.
- [21] DIN 4108:1960, *DIN 4108 - Wärmeschutz im Hochbau*. 1961, pp. 1–26.
- [22] “Bau-Praxis,” 2021. [Online]. Available: [www.baupraxis-blog.de](http://www.baupraxis-blog.de).
- [23] K. Schild and W. M. Willems, *Wärmeschutz*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [24] SIA 180, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Schweiz, 2014, pp. 1–72.
- [25] GANN Mess- und Regeltechnik, “Betriebsanleitung Hydromette M4050,” Gerlingen, 2004.
- [26] L. Peeters, I. Beausoleil-Morrison, and A. Novoselac, “Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 8, pp. 2227–2239, 2011.
- [27] ISO 6946, *Building components and elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods*. 2017.
- [28] L. Evangelisti, C. Guattari, P. Gori, R. de Lieto Vollaro, and F. Asdrubali, “Experimental investigation of the influence of convective and radiative heat transfers on thermal transmittance measurements,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 78, pp. 214–223, 2016.
- [29] L. Evangelisti, C. Guattari, F. Asdrubali, and R. de Lieto Vollaro, “In situ thermal characterization of existing buildings aiming at NZEB standard: A methodological approach,” *Dev. Built Environ.*, vol. 2, no. December 2019, p. 100008, 2020.
- [30] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd ed. Melville: University Science Books, 1997.
- [31] C. Geyer and B. Wehle, “Messbericht: Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Mauerwerkswand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990,” Biel, 2021.
- [32] C. Geyer and B. Wehle, “Messbericht: Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Betonwand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990,” Biel, 2021.
- [33] C. Geyer and B. Wehle, “Zerstörungsfreie Messung des U-Wertes – Eine Anwendungshilfe: Messung der Wärmedurchgangskoeffizienten von zwei Prüfkörpern und Vergleich mit In-Situ-Messgeräten,” Biel, 2021.
- [34] <http://www.physibel.be/v0n2vo.htm>, “VOLTRA Physibel.” [Online]. Available: <http://www.physibel.be/v0n2vo.htm>. [Accessed: 25-Mar-2019].

## 11. Dank

Die Entnahme der Prüfkörper sowie die Messungen konnten in Gebäuden der Baugenossenschaft des Bundespersonals Basel (BBB) durchgeführt werden.

Die Materialoberflächenprüflinge wurden von der Firma Stamm Bau AG (Gipserabteilung) als Forschungsbeitrag kostenfrei angefertigt und uns zur Verfügung gestellt.

Folgenden Firmen haben uns für das Projekt kostenfrei Klebemittel zur Verfügung gestellt:

- Testo AG
- Dreyer GmbH
- 3M (Schweiz) GmbH

Die Messungen in der Hotbox wurden an und von der Berner Fachhochschule Biel (BFH) durchgeführt. Unser Dank dafür und für konzeptionelle Hinweise zur Projektdurchführung und der in-situ Messungen geht an die Projektpartner, insbesondere an Herrn Prof. Dr. C. Geyer und Frau B. Wehle.

## 12. Anhang

### 12.1 Herleitung Unsicherheit der Berechnungsansätze

```
### Uncertainty analysis for U-value measurements ###
### Author: A. Geissler
### Version: 0.10
### Last change: 03.09.21
##
##
## F1.1m = 1 / (1/hi + 1/SF + 1/he)
##
## where
## hi = q / (theta_i - theta_si),
## SF = q / (theta_si - theta_se) and
## he = q / (theta_se - theta_e)
##
F1.1m_ <- function(SF, hi, he) {
  result <- 1 / (1/hi + 1/SF + 1/he)
  return(result)
}
## Note: Basically, F1.1m can be analytically reduced to F2m, whereby of course the usage of measured values theta_si and
theta_se is eliminated.

## F1.2m is equivalent to F1.1m at this stage, as the difference is in the calculation of hi, only. And hi is a function parameter, here.
F1.2m_ <- F1.1m_

##
## F2m = q / (theta_i - theta_e)
##
F2m_ <- function(q, theta_i, theta_e) {
  result <- q / (theta_i - theta_e)
  return(result)
}

##
## F3m = hi,c (theta_i - theta_si) / (theta_i - theta_a)
##
F3m_ <- function(hic, theta_i, theta_si, theta_e) {
  result <- hic * (theta_i - theta_si) / (theta_i - theta_e)
  return(result)
}

##
## General approach for uncertainty calculations:
## f = f(x1, x2, ... xn)
##
## u(f) is the uncertainty in f, likewise ux1 is the uncertainty in x1
##
## u(f) = sqrt( (df/dx1 ux1 )^2 + ... (df/dxn uxn)^2 )
##
##
## Define generic function for specific heat flux coefficient h_.
## Unit: W/(m2 K).
## hi: thi = theta_i, tlow = theta_si
## SF: thi = theta_si, tlow = theta_se
## he: thi = theta_se, tlow = theta_e
h_ <- function(q, thi, tlow) {
  result <- q / (thi - tlow)
  return(result)
}

## Define function for derivative of specific heat flux coefficient h_.
## Unit: 1/K for "q", W/(m2 K2) for "thi" and "tlow"
##
dh_ <- function(q, thi, tlow, dx) {
  result <- switch(
    dx,
    "q" = 1 / (thi-tlow),
    "thi" = -q / (thi-tlow)^2,
    "tlow" = q / (thi-tlow)^2)
  return(result)
}
```

```

## Define function for uncertainty in specific heat flux coefficient h_. This is also the uncertainty in the U-value according to F2m.
##
uh_ <- function(q, thi, tlow, uq, uthi, utlow) {
  result <- sqrt( (dh_(q, thi, tlow, "thi") * uthi)^2 +
                 (dh_(q, thi, tlow, "q") * uq)^2 +
                 (dh_(q, thi, tlow, "tlow") * utlow)^2)
  return(result)
}

uF2m <- uh_

## Define function for uncertainty in heat flux coefficient hi calculated from empirical functions for convective and radiative parts, here
## hi = hc + hr
## hc = 1.98 * (theta_si - theta_1)^0.32
## hr = 4*0.9*(5.670367*10^-8)*T_si^3
uh1.2_ <- function(thi, tlow, uthi, utlow) {
  # dh / dthi (i.e. dh/dti)
  result <- (0.6336*(thi - tlow)^-0.68 * uthi)^2
  # dh / dtlow (i.e. dh/dtsi)
  result <- result + ((-0.6336*(thi - tlow)^-0.68 + 12*0.9*(5.670367*1E-8)*(tlow+237.15)^2)*utlow)^2
}

## Define function for uncertainty in F1.1m.
##
uF1.1m <- function(q, theta_i, theta_si, theta_se, theta_e,
                  uq, uti, utsi, utse, ute) {
  hi <- h_(q, theta_i, theta_si)
  SF <- h_(q, theta_si, theta_se)
  he <- h_(q, theta_se, theta_e)
  F1.1m <- F1.1m_(SF, hi, he)
  result <- uh_(q, theta_i, theta_si, uq, uti, utsi)/hi^4
  result <- result + uh_(q, theta_si, theta_se, uq, utsi, utse)/SF^4
  result <- result + uh_(q, theta_se, theta_e, uq, utse, ute)/he^4
  result <- F1.1m^4*result
  result <- sqrt(result)
  return(result)
}

## Define function for uncertainty in F1.2m.
##
uF1.2m <- function(q, theta_i, theta_si, theta_se, theta_e,
                  uq, uti, utsi, utse, ute) {
  hi <- 1.98*(theta_i-theta_si)^0.32 + 4*0.9*(5.670367*1E-8)*(theta_si+273.15)^3
  SF <- h_(q, theta_si, theta_se)
  he <- h_(q, theta_se, theta_e)
  F1.2m <- F1.2m_(SF, hi, he)
  result <- uh1.2_(theta_i, theta_si, uti, utsi)/hi^4
  result <- result + uh_(q, theta_si, theta_se, uq, utsi, utse)/SF^4
  result <- result + uh_(q, theta_se, theta_e, uq, utse, ute)/he^4
  result <- F1.2m^4*result
  result <- sqrt(result)
  return(result)
}

## Define function for uncertainty in F3m
##
uF3m <- function(hic, theta_i, theta_si, theta_e,
                uhic, uti, utsi, ute) {
  F3m <- F3m_(hic, theta_i, theta_si, theta_e)
  result <- (hic*(theta_si - theta_e)/(theta_i - theta_e)^2*uti)^2
  result <- result + (F3m/(theta_i - theta_e)*ute)^2
  result <- result + (-hic/(theta_i - theta_e)*utsi)^2
  result <- result + (F3m/hic*uhic)^2
  result <- sqrt(result)
  return(result)
}

## Test data.
# q, theta_i, theta_si, theta_se, theta_e
# 1 2 3 4 5
D1 <- c(23.23, 20.0, 17.0, 0.7, -0.2)

## Uncertainties acc. to manufacturer.
# uq, uti, utsi, utse, ute
uAhl <- c(D1[1]*0.05, D1[2]*0.004, D1[3]*0.004, D1[4]*0.004, D1[5]*0.004)
uGTG <- c(D1[1]*0.03, D1[2]*0.025, D1[3]*0.025, D1[4]*0.025, D1[5]*0.025)
uTST <- c(D1[1]*0.0, D1[2]*0.015, D1[3]*0.015, D1[4]*0.015, D1[5]*0.015)

```

D<-D1

F2m\_(D[1], D[2], D[5])

uF1.1m(D[1], D[2], D[3], D[4], D[5], uAhI[1], uAhI[2], uAhI[3], uAhI[4], uAhI[5])

uF1.2m(D[1], D[2], D[3], D[4], D[5], uAhI[1], uAhI[2], uAhI[3], uAhI[4], uAhI[5])

uF2m( D[1], D[2], D[5], uAhI[1], uAhI[2], uAhI[5])

uF2m( D[1], D[2], D[5], uGTG[1], uGTG[2], uGTG[5])

uF3m(7.69, D[2], D[3], D[5], 0, uAhI[2], uAhI[3], uAhI[5])

uF3m(7.69, D[2], D[3], D[5], 0, uTST[2], uTST[3], uTST[5])

## 12.2 Testergebnisse Haftmittel

### 12.2.1 Beurteilung

Die Testergebnisse für die Rückstandsfreiheit und Haftung werden gemäss Tabelle 31 beurteilt. Wenn sich die Testresultate auf den beiden Prüflingen unterscheiden, dann werden beide Werte genannt, die Einfärbung aber gemäss dem schlechteren Wert vorgenommen.

Tabelle 31: Beurteilung Rückstandsfreiheit und Haftung

Beurteilung Rückstandsfreiheit	Code	Beurteilung Haftung	Code
Unversehrt	a	gut	1
homogene Spuren sichtbar, schwach	b1	mittel	2
homogene Spuren sichtbar, stark	b2	schlecht	3
lokale „Inseln“ sichtbar, schwach	c1	haftet nicht	4
lokale „Inseln“ sichtbar, stark	c2		
Ablösungen, schwach	d1		
Ablösungen, stark	d2		
kein Test		kein Test	

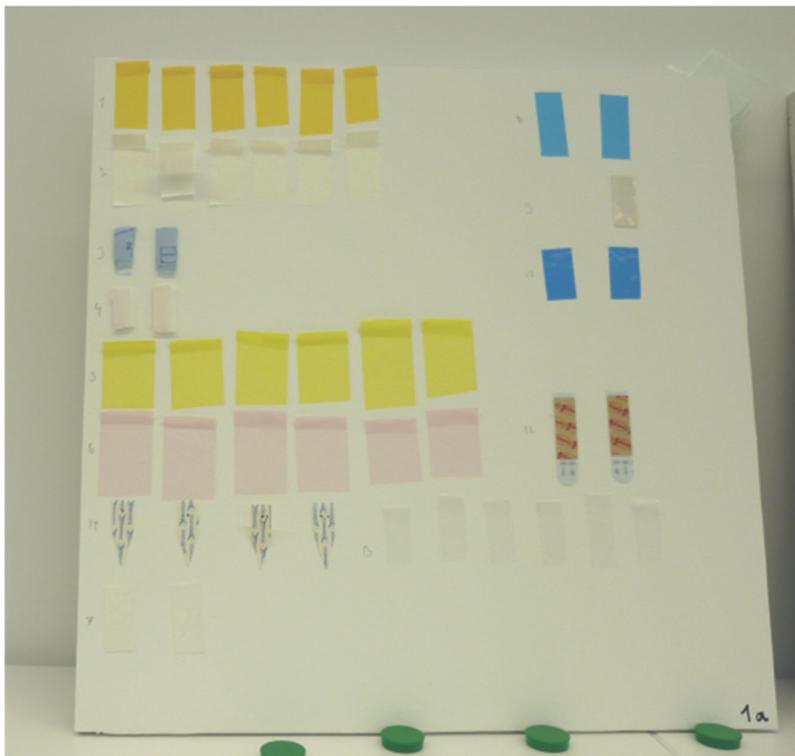


Abb. 22: Testaufbau Test 1

Tabelle 32: Testergebnisse Test 1, Rückstandsfreiheit und Haftung. Verwendete Abkürzungen: R = Rückstandsfreiheit, H = Haftung.

Produkt	ID	Bewertung	Matte Farbe auf Tapete	Matte Farbe auf GK	Glänzende Farbe auf Tapete	Glänzende Farbe auf GK	Weissputz	Rauputz / Abrieb (1 mm)	Rauputz / Abrieb (3 mm)
Scotch 244 High Precision	1	R	a	a	a	a	a	a	a
		H	1	1	1	1	1	3	4
Blu-Tack	3	R	a	a	a	a	b2	a, c1	a
		H	1	1	1	1	1	1	1
UHU Patafix	4	R	a	a	a	a	b2	a, c1	a
		H	1	1	1	1	1	1	1
tesa Profi-Malerband "Innen"	5	R	a	a	a	a	a	a	
		H	1	1	1	1	1	2	4
tesa Profi-Malerband "Tapete"	6	R	a	a	a	a	a	a	
		H	1	2	2	1	1	2	4
3 M Thermally Conductive Tapes 8815	7	R	a	a	a, d2	a, d1	a, d1	a	a
		H	1	1	1	1	1	3	2
4 M Thermally Conductive Tapes 8805	8	R	a	a	a, d1	a	a, d1	a	a
		H	2	1	1	1	1	3	2
Dreyer Thermal Tape DS-TAP_B_a2_1.2-0.125	10	R	d1	b1, d1	a, d2	d2	c2, d2	a	a
		H	1	1	1	1	1	2	2
Strips 3M Command	12	R	a	a	a	a	a	a	a
		H	3	2	1	1	1	2	2
Scotch Removable	13	R	b1	b1, d1		a	a, b1		
		H	3	2	4	2	2	4	4

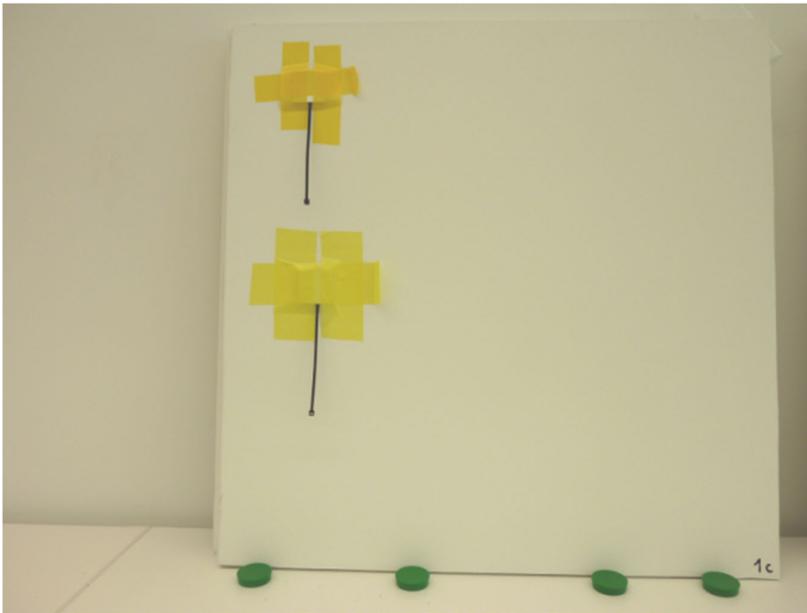


Abb. 23: Testaufbau Test 2

Tabelle 33: Testergebnis Rückstandsfreiheit und Haftung mit Sensor. Verwendete Abkürzungen: R = Rückstandsfreiheit, H = Haftung

Produkt	ID	Abbildung	Bewertung	Matte Farbe auf Tapete	Matte Farbe auf GK	Glänzende Farbe auf Tapete	Glänzende Farbe auf GK	Weissputz	Rauputz / Abrieb (1 mm)	Rauputz/ Abrieb (3 mm)
Scotch 244 High Precision	1		R	a	a	a	a	a		
			H	1	1	1	1	1		
Blu-Tack	3		R						a	a
			H						1	1
UHU Patafix	4		R						a	a
			H						1	1
tesa Profi-Malerband "Innen"	5		R	a	a	a	a	a		
			H	1	1	1	1	1		
Strips 3M Command	12		R						a	a
			H						1	1

## 12.3 Messergebnisse U-Wert in-situ

Tabelle 34: Übersicht über die Messergebnisse. Die Abkürzungen dU2/3 und dU24 beziehen sich auf die Abbruchkriterien gemäss [4]. Erklärung der Abkürzungen: dU2/3 (Abbruchkriterium 3): Die Abweichung des Messwerts, der aus den Daten der ersten 2/3 der Analyseperiode erhalten wird; rot hinterlegt, wenn dieser mehr als ±5 % vom Wert der letzten 2/3 der Analyseperiode abweicht. dU24 (Abbruchkriterium 2): Abweichung des Messwerts (U-Wert) am Ende der Messung; rot hinterlegt, wenn dieser mehr als ±5 % vom Wert vor 24 h abweicht.

Messungen	U-Wert Formel F1			U-Wert Formel F2			U-Wert Formel F3			s	Start	Ende
	UWert_F1_m	dU2/3	dU24	UWert_F2_m	dU2/3	dU24	UWert_F3_m	dU2/3	dU24			
M1_Gr_Lu_Ah_1	1.5	3%	1%	0.93	2%	1%	1.5	-2%	0%	1.39	2019-12-15 12:31:00 UTC	2019-12-18 12:31:00 UTC
M1_NA_Lu_Gr_4				0.89	4%	1%				2.46	2020-01-04 15:27:00 UTC	2020-01-07 15:27:00 UTC
M1_Cu_Gr_Ah_2	1.3	4%	-4%	0.90	3%	-3%	1.3	-3%	2%	2.71	2020-01-18 07:02:00 UTC	2020-01-21 07:02:00 UTC
M1_NA_Gr_Gr_2				1.1	-3%	3%				2.69	2020-01-18 07:03:00 UTC	2020-01-21 07:03:00 UTC
M1_Cu_NA_Te_2							1.0	-2%	2%	2.29	2020-01-18 07:03:00 UTC	2020-01-21 07:03:00 UTC
M1_UH_Ko_Ah_3	1.5	-1%	-1%	1.0	-1%	-1%	1.3	1%	1%	1.78	2019-12-30 09:44:00 UTC	2020-01-02 09:44:00 UTC
M1_NA_GrP_Gr_3				0.87	1%	1%				1.79	2019-12-30 10:20:00 UTC	2020-01-02 10:20:00 UTC
M1_Te_NA_Te_3							0.89	-1%	0%	1.60	2019-12-30 10:20:00 UTC	2020-01-02 10:20:00 UTC
M1_UH_Ko_Ah_4	1.4	-5%	-1%	1.0	-4%	-1%	1.2	2%	-1%	2.45	2020-01-04 15:43:00 UTC	2020-01-07 15:43:00 UTC
M1_UH_NA_Te_4							1.0	0%	-2%	1.98	2020-01-04 15:27:00 UTC	2020-01-07 15:27:00 UTC
M1_Cu_Ko_Ah_5	1.9	3%	9%	1.1	2%	5%	1.5	-1%	-5%	1.88	2020-01-08 12:10:00 UTC	2020-01-11 12:10:00 UTC
M1_NA_Ko_Gr_5				1.2	-2%	-5%				1.84	2020-01-08 12:12:00 UTC	2020-01-11 12:12:00 UTC
M1_Cu_NA_Te_5							1.1	-2%	-4%	2.41	2020-01-09 18:10:00 UTC	2020-01-12 18:10:00 UTC
M1_Cu_Lu_Ah_6	1.9	0%	-5%	1.2	0%	-3%	1.5	0%	3%	2.87	2020-01-13 16:31:00 UTC	2020-01-16 16:31:00 UTC
M1_NA_Lu_Gr_6				1.2	0%	3%				2.81	2020-01-13 16:34:00 UTC	2020-01-16 16:34:00 UTC
M1_Cu_NA_Te_6							1.1	-1%	2%	2.61	2020-01-13 16:34:00 UTC	2020-01-16 16:34:00 UTC
M2_Cu_Ko_Ah_7	1.4	-4%	1%	1.0	-3%	1%	1.4	3%	0%	2.69	2020-01-23 09:33:00 UTC	2020-01-26 09:33:00 UTC
M2_NA_Ko_Gr_7				1.3	3%	-1%				2.77	2020-01-23 09:43:00 UTC	2020-01-26 09:43:00 UTC
M2_Cu_NA_Te_7							0.6	0%	-3%	2.08	2020-01-23 09:43:00 UTC	2020-01-26 09:43:00 UTC
B1_Gr_Lu_Ah_8	1.6	5%	3%	1.0	4%	2%	1.5	-2%	-2%	2.18	2020-02-16 08:38:00 UTC	2020-02-19 08:38:00 UTC
B1_NA_Lu_Gr_8				1.2	-4%	-2%				2.43	2020-02-16 08:43:00 UTC	2020-02-19 08:43:00 UTC
B1_Gr_NA_Te_8							0.25	3%	-5%	2.66	2020-02-16 01:50:00 UTC	2020-02-19 01:50:00 UTC
B1_Cu_Ko_Ah_9	2.1	-3%	-2%	1.2	-2%	-1%	1.6	2%	2%	2.09	2020-02-01 00:16:00 UTC	2020-02-04 00:16:00 UTC
B1_NA_Ko_Gr_9				1.1	3%	4%				3.18	2020-02-05 17:38:00 UTC	2020-02-08 17:38:00 UTC
B1_Cu_NA_Te_9							0.29	-5%	20%	3.36	2020-01-28 21:13:00 UTC	2020-01-31 21:13:00 UTC
B1_Cu_Gr_Ah_10	1.6	4%	-1%	1.0	2%	-1%	1.4	-2%	0%	2.51	2020-02-25 18:52:00 UTC	2020-02-28 18:52:00 UTC
B1_NA_Gr_Gr_10				1.4	4%	-3%				3.05	2020-02-22 20:55:00 UTC	2020-02-25 20:55:00 UTC
B1_Cu_NA_Te_10							0.0	-107%	289%	2.71	2020-02-22 20:55:00 UTC	2020-02-25 20:55:00 UTC
B1_UH_Ko_Ah_11	1.8	0%	11%	1.1	1%	8%	1.5	1%	-5%	3.93	2020-02-09 06:24:00 UTC	2020-02-12 06:24:00 UTC
B1_NA_GrP_Gr_11				1.1	6%	1%				3.35	2020-02-28 08:42:00 UTC	2020-03-02 08:42:00 UTC
B1_Te_NA_Te_11							0.23	9%	3%	2.57	2020-02-10 01:36:00 UTC	2020-02-13 01:36:00 UTC

## 12.4 Messergebnisse Feuchte Labor

Tabelle 35: Relative Feuchte und daraus abgeschätzter Wassergehalt der Mauerwerkswand M3 3 cm unter der Oberfläche des Probekörpers [31]

	Messdatum	Relative Feuchte Kaltseite in % r F	Relative Feuchte Warmseite in % r F	Wassergehalt in m-% Kaltseite in m-%	Wassergehalt in m-% Warmseite in m-%
M1	01.08.20	69,5 ± 1,6	42,6 ± 1,6	0,77 +0,15 -0,57	0,35 +0,18 -0,22
M2	04.08.20	76,34 ± 0,33	45,732 ± 0,078	0,79 +0,44 -0,58	0,35 +0,19 -0,22
M3	11.08.20	75,3 ± 1,2	44,31 ± 0,56	0,79 +0,24 -0,59	0,35 +0,19 -0,22
M4	14.08.20	79,88 ± 0,40	45,69 ± 0,33	0,79 +1,3 -0,55	0,35 +0,19 -0,22
M5	19.08.20	83,82 ± 0,94	53,17 ± 0,52	0,79 +2,1 -0,54	0,54 +0,12 -0,38
M6	30.08.20	93,769 ± 0,077	44,31 ± 0,89	1,2 +9,8 -0,79	0,35 +0,19 -0,22
M7	31.08.20	93,67 ± 0,076	45,75 ± 0,39	1,2 +9,7 -0,78	0,35 +0,19 -0,22
Darrprüfung					
	01.09.20			0,15 +0,06 -0,07	

Tabelle 36: Relative Feuchte und daraus abgeschätzter Wassergehalt der Betonwand B2 3 cm unter der Oberfläche des Probekörpers [32]

	Insitu Messgeräte	Messdatum	Relative Feuchte Kaltseite in % r F	Relative Feuchte Warmseite in % r F	Wassergehalt in m-% Kaltseite in m-%	Wassergehalt in m-% Warmseite in m-%
	mit	03.11.20	51,75 ± 0,37	55,08 ± 0,34	1,80 <sup>+0,46</sup> -0,27	1,98 <sup>+0,48</sup> -0,30
	ohne	18.11.20	54,64 ± 0,16	57,23 ± 0,14	1,95 <sup>+0,48</sup> -0,30	2,11 <sup>+0,48</sup> -0,30
<b>Darrprüfung</b>						
		10.12.20			0,45 <sup>+0,11</sup> -0,05	

## 12.5 Forschungsberichte Labormessungen BFH

- C. Geyer and B. Wehle, "Messbericht: Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Mauerwerkswand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990," Biel, 2021.
- C. Geyer and B. Wehle, "Messbericht: Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Betonwand in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990," Biel, 2021.
- C. Geyer and B. Wehle, "Zerstörungsfreie Messung des U-Wertes – Eine Anwendungshilfe: Messung der Wärmedurchgangskoeffizienten von zwei Prüfkörpern und Vergleich mit In-Situ-Messgeräten," Biel, 2021.