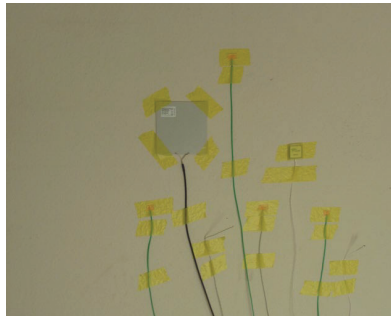


U-Wert Messungen vor Ort mit drei unterschiedlichen Messgeräten



Caroline Hoffmann, Achim Geissler

Kontaktperson: Caroline, Hoffmann, Caroline.Hoffmann@fhnw.ch, <https://www.fhnw.ch>

Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau

Zusammenfassung

Übergeordnetes Ziel des Projektes ist es die Durchführung von U-Wert Messungen im Feld zu erleichtern. Dazu soll eine Anwendungshilfe erstellt werden. Um die Einflussgrößen auf die U-Wert Messung besser eingrenzen zu können, werden im Winter 2019/20 an zwei Mauerwerkswänden (M1 und M2) und einer Betonwand (B1) mit drei unterschiedlichen mobilen U-Wertmessgeräten insgesamt 11 Messungen durchgeführt. Die einzelnen Messgerätetypen weisen unterschiedliche Ausstattungen mit Fühlern und Wärmeflussplatten auf. Daher werden die U-Werte pro Gerät aus unterschiedlichen Eingangsgrößen berechnet. Eine Kontrollmessung der Bauteilfeuchte zu Beginn und nach Abschluss der gesamten Messperiode zeigt, dass der Feuchtegehalt aller Wände (fast) gleichgeblieben ist und daher das Messergebnis für die U-Werte nicht beeinflusst. 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 und es kann pro Messgerät und Bauteil ein Mittelwert gebildet werden. Diese mittleren U-Werte liegen für M1 zwischen 1.5 (Messgerät Firma Ahlborn), 1.1 (Messgerät Firma GreenTEG) und 1.0 W/(m² K) (Messgerät Firma Testo) und für B1 zwischen 1.8 (Ahlborn) und 1.2 W/(m² K) (GreenTEG; Testo = ungültige Werte). Der berechnete U-Wert liegt für alle Bauteile (M1, M2 und B1) zwischen 1.2 und 1.3 W/(m² K). Damit überschreiten die gemessenen U-Werte für das Messgerät Ahlborn deutlich (M1, B1) die berechnete Bandbreite. Die gemessenen U-Werte mit dem Messgerät GreenTEG liegen etwas unter (M1) oder in der berechneten Spannweite (B1) für beide Bauteile. Der U-Wert mit dem Messgerät Testo unterschreitet die berechnete Spannweite für das Mauerwerk (für B1 gibt es keine gültige Messung). Ergänzende Labormessungen und Simulationen stehen noch aus, daher ist die Interpretation der Ergebnisse noch nicht abgeschlossen.

1. Ausgangslage

Gerade im Kontext von geschützten bzw. historischen Bauten liefert die sichere und zerstörungsfreie Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten wichtige Hinweise zu den energetischen Bauteileigenschaften und dem entsprechenden Verbesserungspotential.

Heute erhältliche mobile U-Wert Messgeräte sind sehr nutzerfreundlich. Allerdings sind die Randbedingungen einer Messung vor Ort komplex, da sich beispielsweise Einflussgrößen wie das Wetter schlecht kontrollieren lassen.

Dass die Komplexität der Messungen bekannt ist, zeigen Befragungen: Von den Büros, welche derzeit keine in-situ U-Wert Messungen anbieten (gesamt 70 %, davon planen 23 % ein zukünftiges Angebot, N = 22) werden Barrieren im Bereich Fachkenntnisse und Grundlagenerarbeitung für die Messung und Vertrauen in Fremdmessungen identifiziert. Hier setzt das Forschungsprojekt an, aus dem erste Ergebnisse vorgestellt werden. Ziel des 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.

Basis dafür ist es, die wesentlichen Einflussparameter auf die Qualität einer Messung einzugrenzen. Dazu wird der Wärmedurchgangskoeffizient einer Beton- und einer Mauerwerkswand unter definierten Einflüssen im Labor in einer Doppelklimakammer (Hotbox) gemessen. Unter gleichen Randbedingungen wird der U-Wert mit drei mobilen Messgerätetypen unterschiedlicher Hersteller bestimmt. Damit können Aussagen zur Messgenauigkeit der mobilen Geräte getroffen werden. Mit thermisch dynamischen Simulationen werden ergänzend einzelne Einflussgrößen analysiert und Randbedingungen variiert. Messungen im freien Feld von zwei mit den Labor-Prüfkörpern identischen Konstruktionen erlauben 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 gewährleistet, indem in einer Siedlung, die etappenweise abgerissen wird, gemessen wird. Ein ungedämmter Mauerwerksprüfling und ein Betonprüfling werden im Sommer 2019 einem abzureissenden Gebäude entnommen. Die Messungen vor Ort finden im Winter 2020 in baugleichen Gebäuden der Siedlung statt. Die Untersuchungen basieren so auf der Annahme, dass die Prüfkörper für die Labormessung und die Wände für die in-situ Messung bezüglich Wärmeleitfähigkeit und Dichte gleich sind.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die Messungen vor Ort. Gemessen wird mit drei mobilen U-Wert Messgeräten unterschiedlicher Hersteller. Alle U-Wert Messgeräte verfügen entweder über Messfühler zur Erfassung der Wandoberflächentemperatur und/oder der Wärmestromdichte (siehe Abschnitt 2.2). Ein wichtiger Punkt ist daher, wie die Messfühler auf der Wandinnenseite befestigt werden können. Geht man von einer bewohnten Wohnung aus, so ist eine fleckenfreie, thermisch gut leitende Befestigung gewünscht. Im Vorfeld werden daher auf sieben unterschiedlichen Wandoberflächen (variiert werden Mattigkeitsgrade von Wandfarbe und unterschiedliche Körnung von Putz) 14 unterschiedliche handelsübliche Haftmaterialien geprüft. Bezüglich Haltbarkeit und Fleckenarmut bewähren sich für gestrichene Flächen zwei Klebebänder und für Putz zwei Kontaktmassen.

Ziel der Messung vor Ort ist es, den Einfluss unterschiedlicher Befestigungen auf die Messung und mögliche Fehlerquellen bei der Erfassung der Aussentemperatur zu quantifizieren. Für Mauerwerk und Beton werden jeweils unterschiedliche Messsituationen erfasst. Variiert werden dabei die Befestigung der Temperatur- und Wärmestromsensoren auf der Wand und die Positionen der Messfühler, welche die Aussentemperatur erfassen.

Ausblick: Ab August 2020 werden Messungen im Labor durchgeführt. Dort werden die im Sommer 2019 entnommenen Prüflinge aus Mauerwerk und Beton untersucht. Den Messungen in der Doppelklimakammer (Hotbox) unter definierten Einflüssen (Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit erzwungene Konvektion) werden Messungen unter gleichen Randbedingungen mit den drei mobilen Messgeräten gegenübergestellt. Daraus kann die Messgenauigkeit der mobilen Messgeräte abgeleitet werden.

2. Vorgehen

2.1 Untersuchte Wände

Prüfkörper für die Labormessung

Der Prüfkörper Mauerwerk ist ungedämmt, der Prüfkörper Beton hat aussenseitig eine Dämmung aus ca. 1.5 cm starkem Kork. Es resultieren die folgenden Aufbauten (von aussen nach innen):

- Mauerwerk Prüfkörper: Aussenputz (2.0 cm), Mauerwerk (Ziegelsteine und Mörtel: 39.0 cm), Innenputz (1.0 cm), Gesamt: 42.0 cm, Rohdichte (gewogen): 1470 kg/m^3 (dieser Prüfkörper wird ab August 2020 im Labor gemessen)
- Beton Prüfkörper: Aussenputz (1.0 cm), Kork (1.5 cm), Beton (41.5 cm), Innenputz (1.0 cm), Gesamt: 45 cm
Rohdichte (gewogen): 2057 kg/m^3 (dieser Prüfkörper wird ab August 2020 im Labor gemessen)

Wände für die in-situ Messung

Die in-situ Messungen an zwei Mauerwerkswänden werden im 3. OG durchgeführt. Abweichend vom Prüfkörper aus dem 1. OG für die Labormessung weist das Mauerwerk dort die folgende Wandstärke auf:

- Mauerwerk 1 und 2: Aussenputz (2.0 cm), Mauerwerk (Ziegelsteine und Mörtel: 33.0 cm), Innenputz (1.0 cm), Gesamt: 36.0 cm
- Beton 1: die Betonwand entspricht dem Beton Prüfkörper

2.2 U-Wert Messung in-situ

Die 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 am Mauerwerk 1 (M1), Messung 7 wird an einer anderen Mauerwerkswand (M2) durchgeführt. Messung 7 dient als Kontrollmessung, um zu sehen, ob die Mauerwerkswände im Gebäude vergleichbar sind. Messungen 8 – 11 erfolgen an einer Betonwand (B1).

Es werden drei in-situ U-Wert Messgeräte mit den folgenden Messfühlern eingesetzt:

- Almemo (Fa. Ahlborn): eine Wärmeflussplatte, jeweils ein Fühler Wandoberflächentemperatur innen und aussen, ein Fühler wandnahe Lufttemperatur innen und ein Fühler Lufttemperatur aussen
- gSKIN U-Value KIT (Fa. GreenTEG): eine Wärmeflussplatte, ein Fühler wandnahe Lufttemperatur innen und ein Fühler Lufttemperatur aussen
- Testo 635-2 U-Wert-Set (Fa. Testo): drei Fühler Wandoberflächentemperatur innen, ein Fühler Lufttemperatur innen am Fühlerstecker des Messgerätes und ein Fühler Lufttemperatur aussen

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 «Blu tack»
 - Sonstiges: Fühler mit Kupferklebeband an der Wand befestigt
- Flächige Befestigung Wärmeflussplatte
 - Kontaktmassen: «Putty» (Firma GreenTEG), «Wacker» = (Silikon) Wärmeleitpaste der Firma Wacker ($\lambda 0.6 - 0.8 \text{ W/(m K)}$).
 - Sonstiges: Haftpads «Mount» der (Firma GreenTEG), «trockene» Verbindung («Luft» = Wärmeflussplatte nur mit Klebeband an der Wand befestigt)

Die Aussenluft-Temperaturfühler sind mit einem Strahlungsschirm versehen (ausser bei Messung 6) und mit einem Abstand von mindestens ca. 20 cm zur Hauswand angebracht. Aufgrund der

Abschirmung wird aussen die Lufttemperatur, innen eine Mischtemperatur erfasst. Die Messdaten werden im Abstand von 10 Minuten aufgezeichnet.

Die Messungen werden gemäss ISO 9869-1 [1] ausgewertet. Je nach Ausstattung der Messgeräte werden die in Tabelle 1 angegebenen Formeln verwendet.

Tabelle 1: Möglichkeiten der U-Wert Berechnung in Abhängigkeit vom Messgerät, bzw. den erfassten Messgrössen.

Formel	Benennung im Text	Almemo (Ahlborn) [2]	gSKIN U-Value KIT (GreenTEG) [3]	Testo 635-2 U-Wert-Set (Testo) [4]
$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{si}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_{se}}\right)}$ (F1)	UWert_F1m	✓	✗	✗
$U = \frac{q}{T_i - T_e}$ (F2)	UWert_F2m	✓	✓	✗
$U = h_{si} \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}$ (F3) mit 7.69 W/(m ² K) für h _{si}	UWert_F3m	✓	✗	✓

Für die Datenanalyse wird die «Average Method» aus [1] verwendet. Dabei wird der aufsummierte Wärmefluss durch die aufsummierte Temperaturdifferenz geteilt.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (F4)$$

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 τ_j
- T_{ij}, T_{ej} Innentemperatur bzw. Aussen(luft)temperatur in K zum Zeitpunkt τ_j
- q_j Wärmestromdichte in W/m² zum Zeitpunkt τ_j

Diese Näherung gilt 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 spezifischer Wärmekapazität (> 20 kJ/(m² K)) immer ein Vielfaches von 24 h. Die Messung kann dann gestoppt werden, wenn die drei Abbruchkriterien gemäss [1] erfüllt sind:

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

Als Messunsicherheit wird die Angabe in [1] verwendet, wonach diese bei guten Messgeräten und sorgfältigem Messen unter der Annahme, dass sämtliche Einzelfehler unabhängig und zufälliger Natur sind, bei 14 % und bei additiven Fehlern bei 28 % liegt. In vorliegendem Beitrag wird vereinfachend von 28 % ausgegangen.

Bei der Benennung der Messungen kommt die Systematik gemäss Abbildung 1 zum Einsatz.

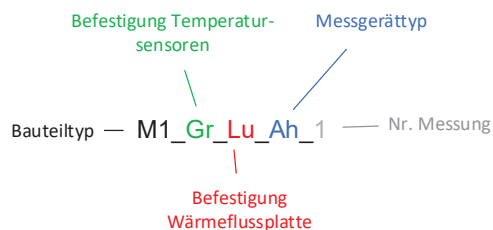


Abbildung 1: Systematik für die Benennung der Messungen. Die Abkürzungen werden in Abbildung 2 erläutert.

2.3 Messung Feuchte

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.

2.4 U-Wert Berechnung

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

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_k \left(\frac{d_k}{\lambda_k} \right) + R_{se}} \quad (F5), \text{ Benennung in weiteren Text: UWert_F5}_b$$

Annahmen bei der Berechnung:

Für R_{si} und R_{se} werden die Werte $0.13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ($h_i = 8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$) und $0.04 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ($h_e = 25 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$) gemäss [5] verwendet.

Berechneter U-Wert M1 und M2:

Da die exakte Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Ziegel nicht bekannt ist, ergibt sich für den UWert_F5_b eine Spannweite von $1.2 - 1.3 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ (mit Ziegel $1'470 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0.52$ [6], bzw. 0.58 W/(m K) [7]).

Berechneter U-Wert B1:

Der berechnete Wert für die Betonwand hat aufgrund der unbekanntenen Wärmeleitfähigkeit eine Bandbreite von ebenso $1.2 - 1.3 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ (mit Beton $2'057 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1.2$ [6], bzw. 1.35 W/(m K) [7]).

3. Messergebnisse

3.5 U-Wert

Auswertung verschiedene Befestigungsmethoden Sensoren

Beim Mauerwerk (M1) sind für jedes Messgerät die Messungen 1 – 6, beim Beton 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 unterschiedliche U-Werte (alle U-Werte $\pm 28 \%$):

- Ahlborn: mittlerer UWert_F1_m Mauerwerk 1 (M1): 1.5 W/(m² K), Beton 1 (B1): 1.8 W/(m² K), Abweichungen Messung 1 - 6 von diesem Mittelwert bei M1: +14 und -20 %, Abweichungen Messung 8 - 10 von diesem Mittelwert bei B1: + 10 und -15 %
- GreenTEG: mittlerer UWert_F2_m M1: 1.1 W/(m² K), B1: 1.2 W/(m² K), Abweichungen Messung 1 - 6 von diesem Mittelwert bei M1: +21 und -13 %, Abweichungen Messung 8 - 10 von diesem Mittelwert bei B1: +10 und -10 %
- Testo: mittlerer UWert_F3_m M1: 1.0 W/(m² K), B1: ungültig, Abweichungen Messung 1 - 6 von diesem Mittelwert bei M1: +13 und -8 %, B1: ungültig

Es zeigt sich, dass Ahlborn die höchsten U-Werte ausweist. 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 die folgenden Werte (alle U-Werte ± 28 %):

- UWert_F1_m (Ahlborn): 1.4 W/(m² K), UWert_F2_m (GreenTEG): 1.3 W/(m² K), UWert_F3_m (Testo): 0.6 W/(m² K)

In Abbildung 2 sind die aus den Messergebnissen resultierenden U-Werte für das Mauerwerk 1 und 2 wiedergegeben. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für den Beton. Für alle Ergebnisse, die in der Grafik nicht gefüllte Markierungen aufweisen, kann kein gültiger U-Wert berechnet werden, d.h., die Abbruchkriterien gemäss Abschnitt 2.2 [1] 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.

Bei der Befestigung der Wärmeflussplatte ist anzunehmen, dass bei keiner oder einer wenig leitenden Verbindung zwischen Wandoberfläche und Wärmeflussplatte ein eher zu tiefer U-Wert gemessen wird.

Messergebnisse mit Messgerät Ahlborn

Die Differenzen zwischen den einzelnen Messungen am Bauteiltyp Mauerwerk (Abbildung 2) entsprechen nicht den Erwartungen, da sich z.B. zwischen den Messungen mit trockener Verbindung (Lu) und den Messungen mit Wärmeleitpaste kein systematischer Unterschied ausmachen lässt. Beim Beton (Abbildung 3) lässt sich die erwartete Tendenz schon eher feststellen, hier weisen die Messungen 8 (Lu) und 10 (sonstige, Kontaktpaste «Putty») einen tieferen UWert_F1_m 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.

Messergebnisse mit Messgerät GreenTEG

Mit diesem Messgerät kann das erwartete Messverhalten beim Mauerwerk 1 und Beton etwas besser beobachtet werden: beim M1 wird der höchste UWert_F2_m bei Messung 5 (Wärmeleitpaste) gemessen, gefolgt von Messung 2 mit Kontaktmasse «Putty». Die tiefsten UWerte_F2_m 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. Tiefere 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_m nahe beieinanderliegen. Diese Erwartung wird mit Werten zwischen 1.0 und 1.1 W/(m² K) (± 28 %) erfüllt. Der UWert_F3_m für M2 (gleiche Befestigungsmittel) ist mit 0.6 W/(m²

K) ($\pm 28\%$) deutlich tiefer (die Ursache dafür ist nicht klar). Bei der angenommenen Messunsicherheit von 28% ist diese Abweichung nicht signifikant.

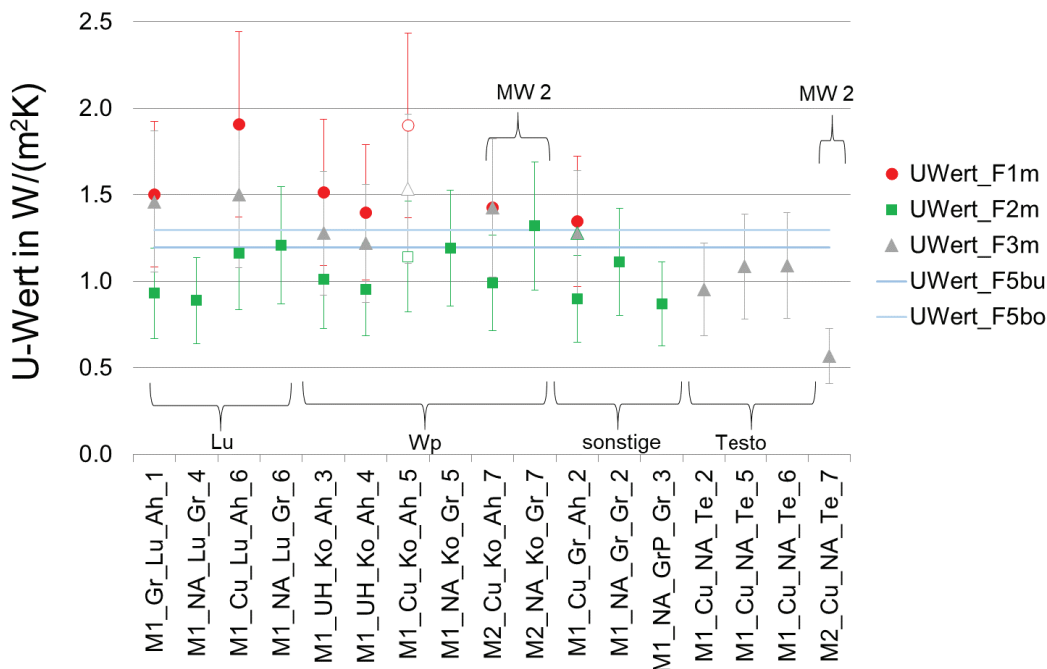


Abbildung 2: U-Wert Messungen Mauerwerk 1 und 2 (alle U-Werte $\pm 28\%$). Zum besseren Vergleich sind die Messungen mit gleicher Befestigungsart der Wärmeflussplatte nebeneinander aufgeführt. Verwendete Abkürzungen: Ah = Ahlborn, Gr = GreenTEG, Te = Testo, Lu = Luft (kein Haftmittel), Wp = Thermische 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.

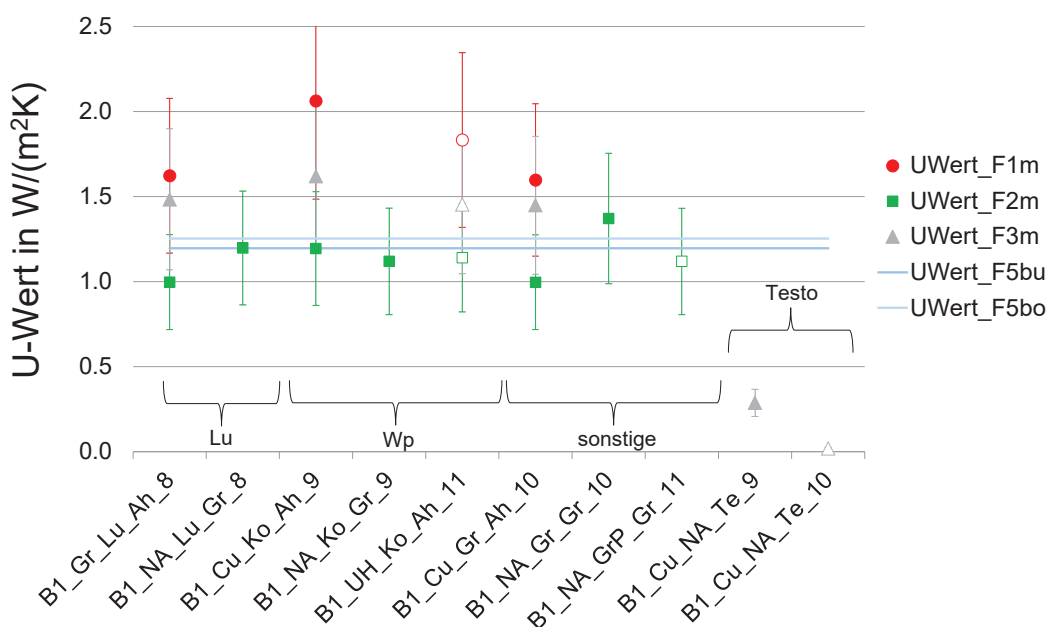


Abbildung 3: U-Wert Messungen Beton 1 (alle U-Werte $\pm 28\%$). Zum besseren Vergleich sind die Messungen mit gleicher Befestigungsart der Wärmeflussplatte nebeneinander aufgeführt. Verwendete Abkürzungen: siehe Abbildung 2. Die Messergebnisse von Testo sind sehr niedrig.

Auswertung bezogen auf Gerät

Wie Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen, resultiert bei allen Messungen mit dem Messgerät Ahlborn (UWert_F1_m) stets der höchste (schlechteste) U-Wert. Werden aus den Messergebnissen dieses Messgerätes der UWert_F2_m und der UWert_F3_m berechnet (Formeln Tabelle 1), so ist die Rangfolge immer gleich: UWert_F1_m: höchster Wert, UWert_F3_m: Abweichung zwischen 0 und -27 % gefolgt von UWert_F2_m: Abweichung zwischen -44 und -64 %. Vergleicht man den UWert_F2_m der Messgeräte Ahlborn und GreenTEG, so ergeben sich Abweichungen zwischen +25 und -16 %. Die höchsten Abweichungen ergeben sich beim UWert_F3_m der Messgeräte Ahlborn und Testo mit -22 bis -151 %. Bei diesem Vergleich werden nur Messungen, welche die Abbruchkriterien gemäss [1] innerhalb von identischen Auswertungsperioden erfüllen, berücksichtigt.

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 UWert_F2_m und den UWert_F3_m von +2 % und für den UWert_F1_m eine Abweichung von +3 %.
- Auswirkung unterschiedlicher Zeitspannen innerhalb eines Messzeitraumes: Es ergeben sich Abweichungen zwischen +2 % (UWert_F2_m und UWert_F3_m) und +3 (UWert_F1_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 (F4) keine Abweichung bei den UWert_F1_m Berechnungen. Aufgrund der Summenbildung ist dies erwartbar, könnte sich bei einer anderen Auswertung aber ändern.
- 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). 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: UWert_F1_m +5 %, UWert_F2_m +3 %, UWert_F3_m +3 %
 - Ohne Strahlungsschirm Abweichung zur Referenz: UWert_F1_m +1 %, UWert_F2_m +1 %, UWert_F3_m +1 %

3.6 Feuchte

Die Messungen zeigen, dass sich die Feuchte der Wände während des Messverlaufs nicht oder nur geringfügig geändert hat. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der Feuchtegehalt der Wände das Messergebnis für die U-Wert Messung nicht beeinflusst hat.

4. Zusammenfassung und Diskussion

Zwischen dem 12.12.2019 und dem 02.03.2020 werden an zwei Mauerwerkswänden (M1 und M2) und an einer Betonwand (B1) mit drei unterschiedlichen Messgeräten insgesamt 11 U-Wert Messungen durchgeführt. Eine Kontrollmessung der Bauteilfeuchte vor Beginn und nach

Abschluss der gesamten Messperiode zeigt, dass der Feuchtegehalt der Wände (fast) gleichgeblieben ist und daher das Messergebnis für den U-Wert nicht beeinflusst.

Bei den durchgeführten Messungen wird hauptsächlich die Befestigung der Temperaturfühler und Wärmeflussplatten an den Wänden variiert. Trotz der unterschiedlichen Befestigung sind die Messungen für die Bauteile untereinander vergleichbar und es kann pro Messgerät und Bauteil ein Mittelwert gebildet und mit der Spannweite des rechnerischen U-Wertes verglichen werden (Abbildung 4). Es zeigt sich so, dass Ahlborn mit $U_{Wert_F1_m}$ mit der angenommenen Messunsicherheit von 28 % nicht-signifikant über dem rechnerischen $U_{Wert_F5_b}$ von M1 und demjenigen von B1 liegt. Der Messwert mit dem Gerät von GreenTEG liegt mit dem $U_{Wert_F2_m}$ beim Mauerwerk etwas unter dem $U_{Wert_F5_b}$, jedoch nicht signifikant. Beim Beton stimmen Messung und rechnerischer Wert sehr gut überein. Der Messwert mit dem Gerät von Testo liegt mit $U_{Wert_F3_m}$ nicht-signifikant unter dem $U_{Wert_F5_b}$ beim Mauerwerk, beim Beton gab es keine gültigen Messungen.

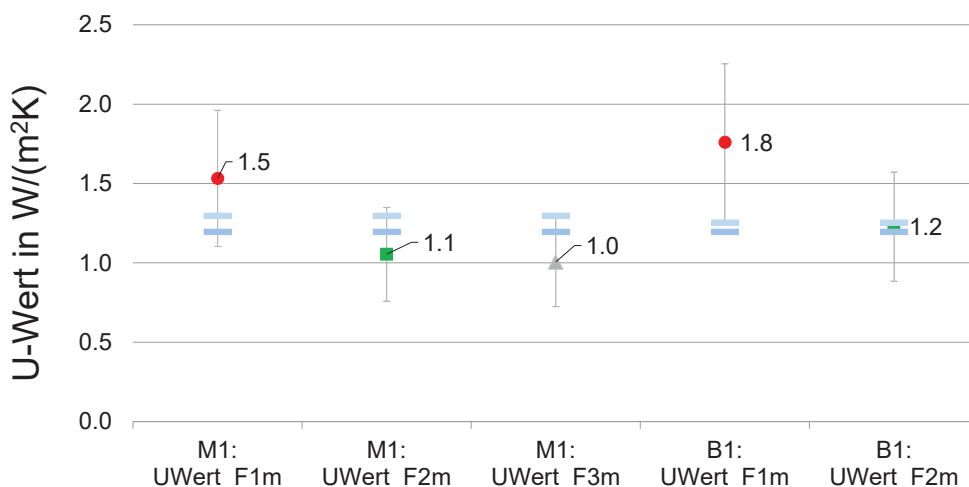


Abbildung 4: Übersicht mittlere U-Werte Messung und Berechnung (U_{Wert_F5}). Dabei werden die folgenden Messungen berücksichtigt: MW 1: $U_{Wert_F1_m}$: Messung 1-4,6; M1: $U_{Wert_F2_m}$: Messung 1-6; M1: $U_{Wert_F3_m}$: Messung 1-6; B1: $U_{Wert_F1_m}$: Messung 8-10; B1: $U_{Wert_F2_m}$: Messung 8-10. Die blauen Balken zeigen die obere (hellblau) und untere (mittelblau) Grenze der Spannweite des berechneten U-Wertes.

Beim Vergleich der Messungen von M1 und M2 liegen die Differenzen ($M2 U_{Wert_F1_m}$: 1.4 $W/(m^2K)$) 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 einen Einfluss auf den gemessenen U-Wert hat. Da der Unterschied zwischen den einzelnen Befestigungsmethoden und den betrachteten Bauteilen aber nicht konsistent ist, ist es nicht schlüssig, für die Abweichungen die Befestigung der Wärmeflussplatte alleine verantwortlich zu machen. Dies gilt auch für die Befestigung der Temperaturfühler.

Da das Messgerät Ahlborn die meisten Grössen erfasst, können für dieses Messgerät neben dem $U_{Wert_F1_m}$ auch der $U_{Wert_F2_m}$, sowie der $U_{Wert_F3_m}$ berechnet und somit die Ansätze der Messgeräte miteinander verglichen werden (siehe Tabelle 1). Der $U_{Wert_F1_m}$ ist immer am höchsten, gefolgt vom $U_{Wert_F2_m}$ (Abweichung zwischen 0 und -27 %) und schliesslich dem $U_{Wert_F3_m}$ (Abweichung zwischen -44 und -64 %). Damit beeinflusst die Anzahl der in die Berechnung einflussenden Messgrössen, bzw. die der impliziten Annahmen den U-Wert erheblich. Vergleicht man die Messgeräte untereinander, so ergeben sich beim $U_{Wert_F2_m}$ (Ahlborn und GreenTEG) Abweichungen zwischen +25 und -16 %. Beim $U_{Wert_F3_m}$ (Ahlborn und Testo) treten mit -22 bis -151 % 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 – 3 %

- Unterschiedliche Zeitspannen innerhalb eines Messzeitraumes: 2 – 3 %
- Unterschiedliche Messintervalle (1 Minute versus 10 Minuten) bei vorliegender Auswertungssystematik (F4): 0 %
- Unterschiedliche Erfassung der Aussentemperatur (Basis für den Vergleich: Strahlungsschirm): hinter Fensterladen ohne Strahlungsschirm: 3 – 5 %, ohne Strahlungsschirm: 1 %

Der Einfluss des Strahlungsschirms muss im Weiteren noch überprüft werden. Da die untersuchte Messperiode sonnig war (mit täglichen Maximalwerten für die Globalstrahlung auf die nordwestorientierte Fassade zwischen 290 und 340 W/m²), widerspricht das Ergebnis den Erwartungen. Mit nur einer Messung ist die Basis für den Vergleich klein.

5. Ausblick

Die Messergebnisse des Projektes überraschen in zweierlei Hinsicht: zum einen weichen die Ergebnisse zwischen den Geräten voneinander ab, zum anderen variieren die Messergebnisse bei ein und dem selben Gerät. Insbesondere die Tatsache, dass das Gerät von Ahlborn, welches eigentlich die meisten Grössen erfasst, eher über dem berechneten Wert liegt, muss noch eingehender analysiert werden. Ob die Unterschiede bei ein und demselben Gerät alleine auf die Befestigungsart der Sensoren zurückzuführen ist, ist mit den vorhandenen Messungen nicht zu beurteilen. Dazu wäre die Wiederholung ein und derselben Messung mit gleichbleibender Befestigungsart der Messfühler notwendig. Es ist anzunehmen, dass äussere Einflüsse wie das Klima eine Ursache für die Abweichungen sind. Als nächster Arbeitsschritt im Projekt folgen ab August 2020 die Messungen im Labor und die Simulationen des U-Wertes. Mit den Simulationen ist zum Beispiel auch die Frage zu klären, wie die Messresultate durch mögliche Wärmebrückeneinflüsse im Wandbereich der Messung beeinflusst werden. Insgesamt soll mit diesem Vorgehen aus Messungen vor Ort und im Labor, sowie den Simulationen geklärt und gegebenenfalls quantifiziert werden, welche Einflüsse auf die Messungen einwirken.

Anhang Literatur

- [1] ISO 9869-1, *Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method*. 2014.
- [2] Ahlborn, "Wärmeflussplatte (Typ 117), Thermodratfühler (NiCr-Ni) Datenlogger Almemo 809 (V7)," 2018.
- [3] greenTEG, "gSKIN KIT-2615C calibrated (U-Value Kit)," 2018.
- [4] Testo, "Feuchte-/Temperatur-Messgerät mit Messwertspeicher, Testo 635-2," 2018.
- [5] SIA 180, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Schweiz, 2014, pp. 1–72.
- [6] K. Schild and W. M. Willems, *Wärmeschutz*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [7] H. W. Bobran and I. Bobran-Wittfoht, *Handbuch der Bauphysik*, 8th ed. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2010.

Abkürzungsverzeichnis

k = Konstruktion
l = Länge
q = Wärmestromdichte [W/m²]
R = Wärmedurchlasswiderstand [m² K/W]
R_{si} = innerer Wärmeübergangswiderstand [m² K/W]
R_{se} = äusserer Wärmeübergangswiderstand [m² K/W]
R_T = Wärmedurchgangswiderstand [m² K/W]

T_i = Umgebungstemperatur innen; im Weiteren gemäss Definition des U-Wertes auf Grundlage der Lufttemperatur wird hier die Lufttemperatur angesetzt (für Details siehe [1], 4.2 & Annex A) [K]

T_e = Umgebungstemperatur aussen; dito. [K]

T_{si} = Oberflächentemperatur innen [K]

T_{se} = Oberflächentemperatur aussen [K]

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

Λ = Wärmeleitfähigkeit [$W/(m^2 K)$]

$\Delta T1 = T_i - T_{si}$

$\Delta T2 = T_i - T_a$

Dank

Das Projekt wird vom Bundesamt für Energie, BFE, unter dem Vertrag SH/8100049-01-01-22 gefördert. Die Entnahme der Prüfkörper sowie die Messungen konnten in Gebäuden der Baugenossenschaft des Bundespersonals Basel (BBB) durchgeführt werden.

Projektpartner

Berner Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur