

Anlage zum Schlussbericht vom Oktober 2021

Anwendungshilfe zur zerstörungsfreien Messung des U-Wertes von Aussenbauteilen



O. 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

1.	Grundlagen zur U-Wert Messung	5
1.1	Vorbemerkung	5
1.2	Das Messprinzip	5
1.3	Messgeräte und Komponenten.....	6
1.4	U-Wert Berechnung	8
1.5	Bestimmung der Gültigkeit der Messung (ISO 9869-1).....	9
1.6	Bestimmung der Messunsicherheit.....	10
1.6.1	Beschreibung Vorgehen Bestimmung Messunsicherheit	10
1.6.2	Anpassung Messunsicherheit auf spezifische Geräte	10
2.	Messung vor Ort	12
2.1	Planung der Messung	12
2.1.1	Jahreszeit und Dauer	12
2.1.2	Benötigtes Material	12
2.1.3	Testmessung	12
2.1.4	Anzahl der Messungen	13
2.2	Aufbau der Messung.....	13
2.2.1	Auswahl Messort.....	13
2.2.2	Befestigung der Fühler an der Wand.....	13
2.2.2.1	Klebe und Kontaktmittel.....	13
2.2.2.2	Wärmeflussplatte	14
2.2.2.3	Innenlufttemperaturfühler.....	14
2.2.2.4	Temperaturfühler Oberflächentemperatur innen	14
2.2.2.5	Aussenlufttemperaturfühler.....	14
2.2.2.6	Temperaturfühler Oberflächentemperatur aussen	15
2.2.3	Datenspeicherung.....	15
2.2.4	Kontrolle der laufenden Messung	15
2.3	Gerätespezifische Hinweise.....	15
2.3.1	greenTEG gSKIN U-Value KIT [2]	16
2.3.2	Testo 635-2 U-Wert-Set [3].....	16
2.3.3	Ahlborn Almemo [1]	16
3.	Checkliste für Behörden zur Prüfung von Messungen	17

4.	Abkürzungsverzeichnis.....	18
4.1	Variablen	18
4.1	Indizes.....	18
5.	Literatur.....	18

1. Grundlagen zur U-Wert Messung

1.1 Vorbemerkung

Diese Anwendungshilfe soll Energieberatern, Bauphysikern und Fachexperten für die Durchführung von U-Wert Messungen vor Ort unterstützende Erläuterungen und Hinweise geben. Basis des Inhaltes ist ein Forschungsprojekt, in dessen Rahmen U-Wert Messungen vor Ort mit drei unterschiedlichen Messgeräten und vergleichende Messungen im Labor durchgeführt wurden. Ergänzend dazu wurden Simulationen erstellt und Kontakt- und Haftmittel zur Befestigung der Sensoren an den zu messenden Bauteilen getestet. Untersucht wurden schwere, homogene Bauteile, damit beziehen sich die Hinweise hauptsächlich auf diesen Bauteiltyp. Das vorliegende Dokument fokussiert auf die Anwendung, ausführliche Hintergrundinformationen zu Herleitungen zu den Empfehlungen finden sich im Projektschlussbericht. In Fällen, in denen sich bestimmte Erfahrungen direkt auf ein konkretes Messgerät beziehen, wird das im Text auch so ausgewiesen.

1.2 Das Messprinzip

Das Messprinzip basiert in der Regel auf der sogenannten Hilfswandmethode, bei der über eine Wärmestromplatte direkt auf der Bauteiloberfläche die Wärmestromdichte q in W/m^2 gemessen wird. Zusätzlich werden über zwei Temperatursensoren die Lufttemperaturen innen und aussen gemessen. In Ergänzung dazu können noch die Oberflächentemperaturen auf der Bauteilinnen- und aussenseite erfasst werden. Damit ist dann auch eine Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten innen, h_{si} , und aussen, h_{se} , möglich (Informationen und eine kritische Diskussion hierzu finden sich im Projektschlussbericht). Manche Messgeräte verzichten auf die direkte Erfassung des Wärmestroms und berechnen den U-Wert durch Bestimmung der raumseitigen Oberflächentemperatur unter Annahme eines Wertes für h_{si} . In Tabelle 2 ist zusammengefasst, wie jeweils mit welchen verfügbaren Messgrössen der U-Wert berechnet wird. Allen Messprinzipien ist gemeinsam, dass der resultierende U-Wert so wenig wie möglich schwanken sollte. Dies wird über die Messdauer und darauf aufbauend über bestimmte Verfahren bei der Auswertung sichergestellt (siehe Abschnitt 1.5). Eine Vorbedingung für eine gültige Messung sind möglichst konstante Randbedingungen über die Messdauer. Die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen sollte zudem so gross wie möglich sein (> 15 K). Das Bauteil sollte möglichst homogen sein. Bei der U-Wert Messung werden die Messfühler (je nach Messgerät und Ausstattung innen und aussen) am bzw. nahe am Bauteil befestigt. Die Messung dauert mindestens 72 h. Anschliessend wird die Messung ausgewertet und ihre Gültigkeit überprüft.

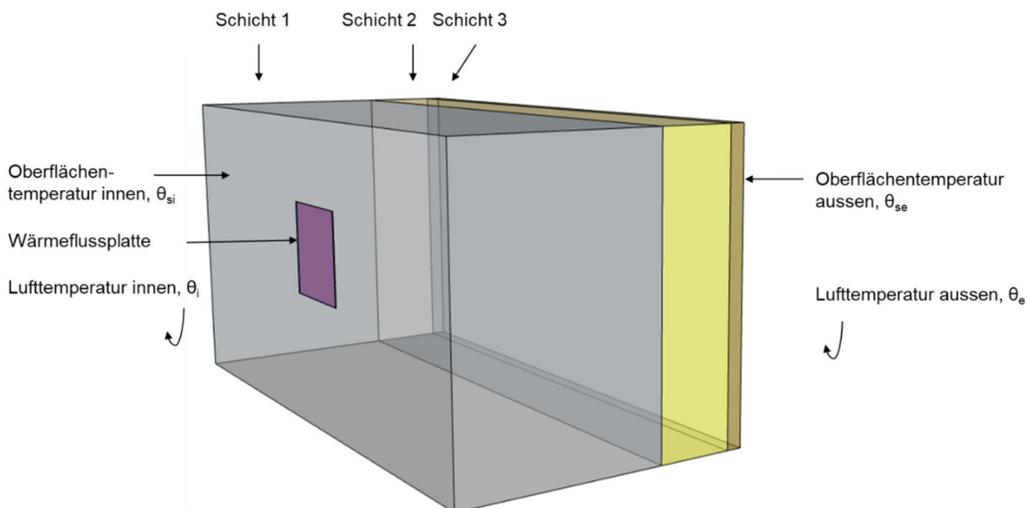


Abb. 1: Messgrössen bei der U-Wert Messung.

1.3 Messgeräte und Komponenten

In Tabelle 1 sind mögliche Gerätausstattungen mit Messfühlern aufgezeigt. Wenn nicht explizit die Messung der Wärmeübergangskoeffizienten geplant ist, dann ist die folgende Ausstattung für das Messgerät ausreichend:

- Wärmeflussplatte
- Fühler Raumlufttemperatur
- Fühler Aussenlufttemperatur

Achtung: Bei Messungen mit geringer Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen (< 15 K) können bei rein temperaturbasierten Messgeräten die gemessenen U-Werte signifikant zu tief ausfallen.

Abb. 2 bis Abb. 4 zeigen exemplarisch U-Wert Messgeräte. Damit ist das Prinzip erkennbar, die Optik kann sich natürlich ändern.

Tabelle 1: Mögliche Ausstattung der Messgeräte für die U-Wert Messung vor Ort. Die mit einer Klammer versehenen Fühler sind für die Messung der Wärmeübergangskoeffizienten erforderlich.

	Fünf Messgrössen	Drei Messgrössen	Drei Messgrössen (temperaturbasiert)
Beispielgerät	Almemo [1]	gSKIN U-Value KIT [2]	Testo 635-2 U-Wert- Set [3]
Hersteller	Ahlborn	greenTEG	Testo
Wärmeflussplatte (misst Wärmestromdichte)	1	1	-
Fühler Oberflächentemperatur innen, θ_{si}	(1)		3
Fühler Oberflächentemperatur aussen, θ_{se}	(1)	-	-
Fühler wandnahe Innentemperatur, θ_i	1	1	
Fühler Innentemperatur, θ_i , am Fühlerstecker des Messgerätes	-	-	1
Fühler Aussentemperatur, θ_e	1	1	1

Verbindung zum Datenlogger:

Zunehmend werden Geräte mit Funkverbindungen angeboten. Die hierdurch unnötige Verkabelung insbesondere durch Aussenbauteile hindurch kann eine deutliche Erleichterung darstellen. Allerdings gibt es zwei Nachteile zu bedenken: Erfolgt die Energieversorgung im Aussenbereich über eine Batterie, so kann sich diese speziell bei tiefen Temperaturen schnell entladen. Weiter kann es bei der Funkverbindung zu Datenlücken kommen, wenn die Verbindung unterbrochen wird.

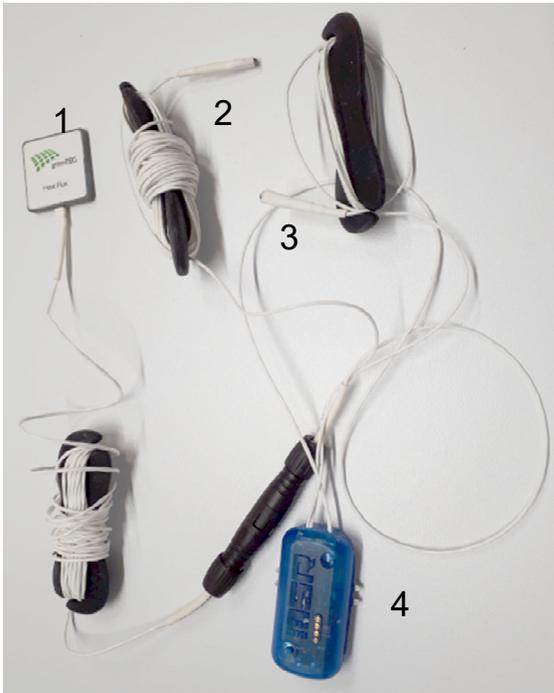


Abb. 2: Messgerät von GreenTEG. 1 = Wärmeflussplatte, 2 = Fühler Aussentemperatur, θ_e (langes Verbindungskabel), 3 = Fühler Innentemperatur, θ_i , 4 = Datenlogger.

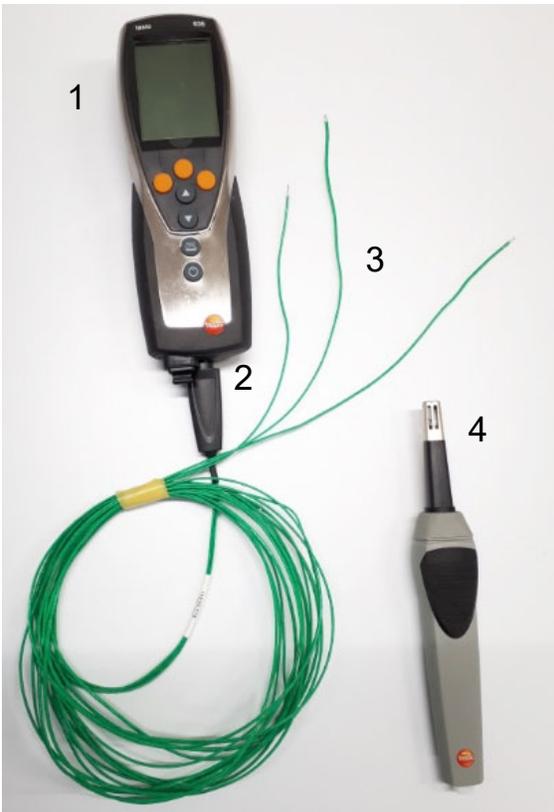


Abb. 3: Messgerät von Testo. 1 = Datenlogger, 2 = Sensor an der Unterseite des Datenloggers für die Innentemperatur, θ_i , 3 = drei Fühler für Oberflächentemperatur innen, θ_{si} , 4 = Funkfühler Aussentemperatur, θ_e .



Abb. 4: Messgerät von Ahlborn: 1 = Datenlogger, 2 = Wärmeflussplatte, 3 = Fühler Innentemperatur, θ_i , 4 = Es muss mindestens noch ein Fühler für die Aussentemperatur, θ_e , angeschlossen werden (gleiche Optik, auf Abbildung nicht dargestellt).

1.4 U-Wert Berechnung

Die meisten Messgeräte (auch alle in Tabelle 1 aufgeführten Geräte) geben bereits direkt einen U-Wert über eine mitgelieferte Software aus. Die direkte Verwendung der ausgegebenen U-Werte ist kritisch zu hinterfragen, da die Mittelwertbildung der Messwerte unterschiedlich oder gar nicht erfolgt und die Gültigkeit der Messung auf Grundlage der Kriterien gemäss ISO 9869-1 nicht von allen Geräten (Ausnahme GreenTEG) ausgegeben wird.

Zur Berechnung des U-Wertes aus den Messgrössen können je nach Ausstattung der Messgeräte die in Tabelle 2 angegebenen Formeln verwendet werden.

Tabelle 2: Möglichkeiten der U-Wert Berechnung in Abhängigkeit von dem Messgerät bzw. den erfassten Messgrössen. Quelle F1: [4], Quelle F2: Herstellerangaben Testo.

Formel	Benennung im Text	Almemo (Ahlborn)	gSKIN U-Value KIT (greenTEG)	Testo 635-2 U-Wert-Set (Testo)
$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_e}$ (F1)	UWert_F1	✓	✓	✗
$U = h_{si} \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{(\theta_i - \theta_e)}$ (F2)	UWert_F2	✓	✗	✓

dabei ist:
 $h_{si} = 7.69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

1.5 Bestimmung der Gültigkeit der Messung (ISO 9869-1)

Das Ergebnis einer U-Wert Messung soll ein stabiler Wert und nicht ein Momentanwert sein. Um dies zu gewährleisten, ist für die Datenanalyse die «Average Method» aus ISO 9869-1 [4] anzuwenden. Dabei wird die aufsummierte Wärmestromdichte durch die aufsummierte Temperaturdifferenz geteilt. Gleichung F3 beschreibt formal das Vorgehen für den UWert_F1. Diese Art der Mittelung kann sinngemäss auch für UWert_F2¹ verwendet werden.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (\theta_{ij} - \theta_{ej})} \quad \text{in (W/(m}^2 \text{ K)) (F3)}$$

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
- θ_{ij}, θ_{ej} Innenlufttemperatur bzw. Aussen(luft)temperatur in (°C) zum Zeitpunkt τ_j
- q_j Wärmestromdichte in W/m^2 zum Zeitpunkt τ_j

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

- Nahezu gleichbleibender Wärmegehalt des Bauteils während der Datenerfassungsperiode; dies bedeutet möglichst geringe Temperaturänderungen sowie ein konstanter Feuchtegehalt.
- Die Wärmeflussplatte und die Temperaturfühler sind keiner direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt; grundsätzlich sollen Nord-Orientierungen für die Messungen bevorzugt werden. Dann tritt i.d.R. auch durch Fenster keine direkte kurzweilige Strahlung. Ggf. Türe zum «Mess»-Raum geschlossen halten.
- Die Wärmeleitfähigkeit des Bauteils ist konstant; dies ist bei bauüblichen Materialien i.d.R. gewährleistet, Luftschichten oder spezielle Materialien wie z.B. PCM können hier jedoch Unsicherheiten verursachen.

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

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.

Diese Bestimmung der Gültigkeit der Messung wird dringend empfohlen. Wenn die Bestimmung nicht erfolgt, so ist dies im Bericht zwingend anzugeben. Wird zum Beispiel der U-Wert der Geräteausgabe angegeben und die Messergebnisse nicht gemäss ISO 9869-1 gemittelt, so ergeben sich Veränderungen des gemessenen U-Wertes zwischen -5% und $+15 \%$. Auch die Verwendung des letzten Tagesmittelwertes anstelle des normativ gemittelten U-Wertes kann erhebliche Abweichungen (zwischen -4% und $+28 \%$) verursachen.

Das Messgerät der Firma greenTEG bestimmt die Gültigkeit der Messung gemäss ISO 9869-1 parallel zur Datenerfassung. Nach derzeitigem Stand muss für die Messgeräte anderer Firmen die Bestimmung der Gültigkeit durch den Anwender erfolgen.

¹ $U = h_{si} \frac{\sum_{j=1}^n (\theta_{ij} - \theta_{sij})}{\sum_{j=1}^n (\theta_{ij} - \theta_{ej})}$ in (W/(m² K)) (F4)

² Es wird nicht angegeben, ob dieser Wert mit oder ohne Wärmeübergangswiderständen gilt. Dieser Wert wird unabhängig hiervon mit üblichen massiven Konstruktionen weit überschritten.

1.6 Bestimmung der Messunsicherheit

Für die Ermittlung der Messunsicherheit, welche zwingend der Angabe des gemessenen U-Wertes beizufügen ist, empfiehlt sich die Vorgehensweise aus ISO 9869-1 [4]. Nachstehend wird das Vorgehen zunächst beschrieben, anschliessend wird aufgezeigt, wie sich die Messunsicherheit gerätespezifisch anpassen lässt. Die Gesamtunsicherheit der Messung setzt sich aus den Geräteunsicherheiten und der Unsicherheit der Gerätinstallation zusammen. Hinzu kommt noch die Berücksichtigung des Berechnungsansatzes.

1.6.1 Beschreibung Vorgehen Bestimmung Messunsicherheit

Die Gesamtunsicherheit der Messung setzt sich gemäss ISO 9869-1 aus den folgenden Faktoren zusammen (die genannten Zahlenwerte sind aus [4] übernommen):

- (1) Kalibrationsgenauigkeit von der Wärmeflussplatte und von den
- (2) Temperatursensoren: zusammen 5 % des Messwertes für gut kalibrierte Sensoren
- (3) Variationen aufgrund von Unterschieden im thermischen Kontakt zwischen Wand und Wärmeflussplatte: 5 % des Messwertes bei einer sorgfältig installierten Wärmeflussplatte. Kann durch den Einsatz von mehreren Wärmeflussplatten verringert werden.
- (4) Operativer Fehler der Wärmeflussplatte unter der Voraussetzung, dass dieser in der Auswertung über einen Korrekturfaktor berücksichtigt ist. Der Korrekturfaktor kann entfallen, wenn die Wärmeflussplatte sehr dünn ist und einen geringen thermischen Widerstand aufweist. Verbleibende Unsicherheit: 2 - 3 % des Messwertes
- (5) Fehler durch fluktuierende Temperaturen und Wärmeströme über die Messdauer. Wenn geeignete Abbruchkriterien gewählt werden (siehe dazu Abschnitt 0) beträgt er ca. ± 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 % des Messwertes.

Wenn die genannten Bedingungen erfüllt sind, liegt die Messunsicherheit nach Norm bei guten Messgeräten und sorgfältigem Messen etwa zwischen

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

Je nach Messgerät kann die Messunsicherheit auch etwas tiefer liegen (siehe Kapitel 1.6.1). Mit der Wurzel der Quadratsumme wird die Messunsicherheit unter der Annahme erfasst, dass die einzelnen Unsicherheiten voneinander unabhängig und zufälliger Natur sind. Mit der arithmetischen Summe wird die maximale Messunsicherheit erfasst [5].

1.6.2 Anpassung Messunsicherheit auf spezifische Geräte

Die in [4] genannten Zahlenwerte der Unsicherheiten können – wenn vorhanden – durch gerätespezifische Werte ersetzt werden. Diese finden sich in den Herstellerunterlagen. Nachfolgend die exemplarische Bestimmung der Messunsicherheit für die drei in Tabelle 1 genannten Messgeräte. Die Nummern beziehen sich auf die Liste im vorherigen Kapitel 1.6.1.

- (1) Kalibrationsgenauigkeit der Wärmeflussplatte:
 - a. Ahlborn: 5 % des Messwertes,
 - b. greenTEG: 3 % des Messwertes,
 - c. Testo: Wärmeflussplatte 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 und Temperaturfühler bzw. Wärmeflussplatte: 5 %, wird übernommen, da (in der Regel) 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 und der thermische Widerstand des Sensors sehr klein, kann der Fehler vernachlässigt werden (die Dicke ist nicht näher definiert, es wird angenommen, dass die im Projekt verwendeten Geräte dieser Anforderung entsprechen). In allen anderen Fällen muss der operative Fehler abgeschätzt und die Daten korrigiert werden (Angaben dazu finden sich in ISO 9869-1; wir empfehlen, den Hersteller zu kontaktieren). Mit einer Datenkorrektur bleibt eine Unsicherheit von: 2 – 3 %. Es kann angenommen werden, dass der operative Fehler aktueller Wärmeflussensoren 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: ± 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 die genannten einzelnen 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**.

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

Einschliesslich der Unsicherheit infolge der Installation ergibt sich durch Berücksichtigung von (3) folgende Gesamtunsicherheit für die **installierten Geräte** (inkl. (1) und (2)).

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

Die gewonnenen Messergebnisse schliesslich zeigen folgende **Gesamtunsicherheiten Messung** bei Berücksichtigung von (4), (5) und (6), (inkl. (1), (2) und (3)).

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

In diesen genannten Gesamtunsicherheiten können die Unsicherheiten der Messgeräte (erste zwei Terme) durch die Berücksichtigung der Messgeräte in den **Berechnungsansätzen** gemäss nachstehender Liste ersetzt werden. Hierbei wird berücksichtigt, welche und wie viele Messgrössen (mit der zugehörigen Unsicherheit) in die Berechnungsformel für den U-Wert einfließen.

δF_{1m} , Ahlborn	=	0.06 W/(m ² K)	=	5 %,
δF_{1m} , greenTEG	=	0.04 W/(m ² K)	=	4 %,
δF_{2m} , Ahlborn	=	0.04 W/(m ² K)	=	3 % und
δF_{2m} , Testo	=	0.14 W/(m ² K)	=	12 %.

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

Dieses Ergebnis, bzw. bei Verwendung eines anderen Gerätes das angepasste Ergebnis, ist als Gesamtunsicherheit Messung inkl. Berechnungsansatz der Angabe des gemessenen U-Wertes beizufügen. In der Regel mit der Angabe <Messwert> ± x %, oder als positiver und negativer Fehlerbalken bei einer grafischen Darstellung.

2. Messung vor Ort

2.1 Planung der Messung

2.1.1 Jahreszeit und Dauer

Die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussentemperatur sollte möglichst gross sein. Ein guter Richtwert sind mindestens 15 K, besser 20 K. Je geringer die Temperaturdifferenz ist, desto stärker schwanken in der Regel die resultierenden U-Werte. Eine gültige Messung ist somit schwerer zu erreichen. Bei geringen Temperaturdifferenzen (< 15 K) kann mit temperaturbasierten Messgeräten unter Umständen kein sinnvolles Messergebnis erreicht werden.

Die Mindestdauer unter idealen Messbedingungen beträgt 72 h. Es ist aber anzuraten, die Messdauer länger zu planen (ca. eine Woche, wenn während der Messung die Gültigkeit überprüft werden kann), da es durchaus möglich ist, dass nach 72 h keine gültige Messung erreicht ist. Für Messgeräte, bei denen die Gültigkeit gemäss Norm nicht während der Messung ausgewiesen wird, ist entweder die Messung vor Abbruch gleich vor Ort auszuwerten oder die Messperiode ist ausreichend lange zu wählen (ca. 10 Tage). Im schlechtesten Fall kann bei dem letztgenannten Vorgehen allerdings immer noch eine ungültige Messung vorliegen.

2.1.2 Benötigtes Material

Für die Messung werden neben dem Messgerät selbst die folgenden Materialien benötigt:

- Befestigungsmaterial für die Messfühler (siehe Abschnitt 2.2.2)
- Wenn eine Messung der Oberflächentemperatur vorgesehen ist: Kupferklebeband und ein ca. 2 cm x 2 cm x 1 cm grosses Stück EPS (oder ein ähnliches Dämmmaterial)
- Abschirmung für die Aussenlufttemperaturfühler (siehe Abschnitt 2.2.2)
- Möglichkeit, die Aussenlufttemperaturfühler in etwa 20 cm Entfernung von der Aussenwand zu befestigen (z. B. Drahtbügel)

2.1.3 Testmessung

Wird das Messgerät erstmalig oder nach längerer Pause in Betrieb genommen, so empfiehlt sich eine Testmessung, um die Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Speziell ist dies anzuraten, wenn die Messung vor Ort nur in einem definierten Zeitraum möglich ist und Fehlschläge daher unerwünscht sind. Nach einer längeren Pause ist die Gültigkeit der Kalibration rechtzeitig vor dem Messtermin zu überprüfen.

2.1.4 Anzahl der Messungen

Die Messung ist möglichst an mehreren Orten am Bauteil zu wiederholen, um Zufallseffekte zu vermeiden. Idealerweise bei identischen Randbedingungen, d.h., mit mehreren (baugleichen) Messgeräten gleichzeitig.

2.2 Aufbau der Messung

2.2.1 Auswahl Messort

Der Messort sollte die folgenden Eigenschaften haben:

- Raumtemperatur innen soll möglichst konstant sein. Idealerweise wird der Raum während der Messung beheizt, aber nicht genutzt (Fensterlüftung ist zu vermeiden).
- Die Wand soll nicht feucht sein.
- Die Aussenseite soll möglichst nicht besonnt sein, d.h. Nordorientierungen sind vorteilhaft
- Die Aussenseite muss zugänglich sein, da hier die Aussenlufttemperaturfühler (und eventuell der Oberflächentemperaturfühler) angebracht sind. Je nach Messgerät sind Aussenlufttemperaturfühler und Logger mit einem Kabel verbunden.
- Der Messort innen soll nicht über einer Heizung liegen und mindestens 1 m vom Fenster und von der Raumecke, vom Boden und der Decke (oder anderen Wärmebrücken) entfernt sein (siehe Abb. 5).

Sofern eine Wärmebildkamera verfügbar ist, ist es sinnvoll, die Wand vor der Messung auf Unregelmäßigkeiten (z. B. Fugen, Materialwechsel wie z. B. Metallträger unter der Putzschicht) hin zu untersuchen.

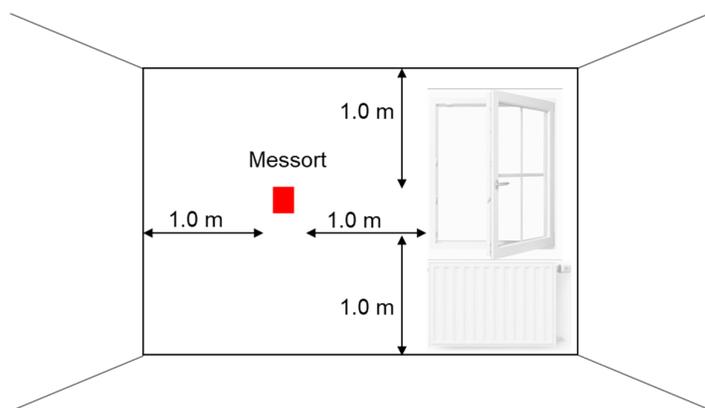


Abb. 5: Anforderungen Messort für U-Wert Messung.

2.2.2 Befestigung der Fühler an der Wand

Die Messtechnik innen und aussen soll etwa auf der gleichen Höhe befestigt sein.

Selbst bei sorgfältiger Arbeit kann es sein, dass die Befestigung der Fühler Flecken an der Wand hinterlässt. Es ist daher anzustreben an einem Ort zu messen, an dem Flecken zulässig bzw. möglichst wenig störend sind (z.B. für die Dauer der Messung Bild abhängen, kleines Möbelstück verrücken).

2.2.2.1 Klebe und Kontaktmittel

Beispiele für Klebemittel, die auf glatter Oberfläche in der Regel keine Spuren hinterlassen und gut haften:

- Scotch 244 High Precision (einseitiges Klebeband)
- Tesa Profi-Malerband «Innen» (einseitiges Klebeband)
- Strips 3M Command (zweiseitige Klebestrips, haften nicht auf allen Untergründen)

Beispiele für Klebemittel, die auf rauer Oberfläche wenig Spuren hinterlassen und gut haften:

- «Putty» Fa. greenTEG (weiche, cremefarbene Haft-/Kontaktmasse)
- «Blue-Tack» Fa. Bostik (mittelharte hellblaue Haft-/Kontaktmasse)
- «UHU Patafix» (mittelharte weisse Haft-/Kontaktmasse)

Bei den Haft- und Kontaktmassen können leichte Ölflecken und kleinere Brösel zwischen Putzkörnern zurückbleiben. Letztere können mit einer Kugel aus dem gleichen Material abgetupft werden.

Grundsätzlich kann meist gleich zu Beginn festgestellt werden, ob die genannten Produkte haften oder nicht. Haften sie zu Beginn fest an der Wand, dann ist dies in der Regel auch während der gewünschten Befestigungsdauer der Fall.

Wärmeleitpaste kann nach der Messung von den Sensoren mit «Sterilium classic pur» (Handdesinfektionsmittel, rückfettend) vorsichtig abgewischt werden. Vor dem Abwischen an einer Ecke des Sensors vorsichtig testen, dass die Oberfläche des Sensors selber nicht angegriffen wird. Aceton (Nagellackentferner) greift viele Oberflächen an.

2.2.2.2 *Wärmeflussplatte*

Wenn Flecken auf der Wand möglich sind:

- Grundsätzlich ist die Befestigung der Wärmeflussplatte mit Wärmeleitpaste an der Wand zu empfehlen. Dabei wird die Rückseite der Wärmeflussplatte mit der Wärmeleitpaste gerade so dick bestrichen, dass die Platte satt auf der Wand aufliegt. Zwischen Wand und Platte dürfen keine Luftblasen sein. Zusätzlich ist die Platte an den Ecken oder umlaufend mit Klebeband zu sichern.

Wenn keine Flecken auf der Wand möglich sind:

- Auf glatten Oberflächen kann die Wärmeflussplatte direkt auf die Wand aufgelegt und umseitig mit Klebeband gesichert werden.
- Auf rauen Oberflächen kann «Putty» verwendet werden.

Auf der Grundlage von Simulationsrechnungen 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 ca. 2 % und ist damit als gering einzustufen.

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 wann immer möglich Wärmeleitpaste verwendet werden. Ist eine Verschmutzung der Wandoberfläche nicht zulässig, so kann bei glatten Wandoberflächen ohne eine Erhöhung der Unsicherheit auf Wärmeleitpaste verzichtet werden. Bei rauen Oberflächen ist «Putty» zu verwenden oder – sollte auch dies nicht möglich sein – die anzunehmende Unsicherheit (3) zu erhöhen.

2.2.2.3 *Innenlufttemperaturfühler*

Der Fühler soll mindestens 10 cm Abstand von der Wandoberfläche haben. Steife Messleitungen aus Draht (z.B. an Thermoelementen) können entsprechend gebogen werden. Für Fühler mit flexiblen Leitungen kann eine Halterung aus Draht gebogen werden.

2.2.2.4 *Temperaturfühler Oberflächentemperatur innen*

Den Fühlerkopf mit einem kleinen Streifen Kupferklebeband überdecken, optional aber zu empfehlen mit einem ca. 2 x 2 cm² grossen, ein cm dicken EPS-Würfel abdecken und alles mit einem einseitigen Klebeband festkleben (siehe Abb. 8).

2.2.2.5 *Aussenlufttemperaturfühler*

Aussenlufttemperaturfühler sind stets verschattet mit einem Strahlungsschirm anzubringen.

Die Fühler sollen mindestens 20 cm Abstand von der Wand haben. Als Strahlungsschirm eignen sich insbesondere einschlägige Schutzgehäuse für Temperatursensoren/Wetterstationen. Alternativ können kleine Plastikblumentöpfe, Joghurtbecher oder PET-Flaschen zugeschnitten und mit Aluminiumfolie verkleidet und über den Sensor gestülpt werden (siehe Abb. 6 und Abb. 7). Der Sensor muss sich innerhalb der Schutzhülle befinden und darf die Schutzhülle nicht berühren. Für eine ausreichende Belüftung ist zu sorgen (Boden mit entsprechenden Öffnungen versehen).

Die Positionierung hinter Fensterläden empfiehlt sich nicht, da hier ein möglicherweise vorhandenes Warmluftpolster die Aussenlufttemperatur verfälscht.



Abb. 6: Schutzgehäuse für die Aussentemperaturfühler.

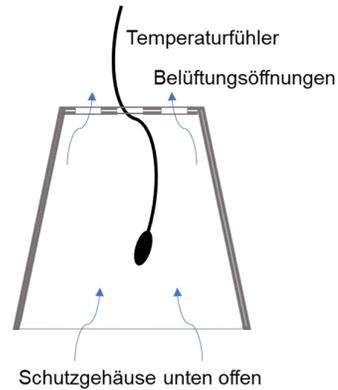


Abb. 7: Schemazeichnung Schutzgehäuse.

2.2.2.6 Temperaturfühler Oberflächentemperatur aussen

Der Fühler darf nicht an einer besonnten Wand befestigt werden. Den Fühlerkopf mit einem kleinen Streifen Kupferklebeband überdecken, mit einem ca. 2 x 2 cm² grossen, ein cm dicken EPS-Würfel abdecken und alles mit einem einseitigen Klebeband festkleben (siehe Abb. 9).

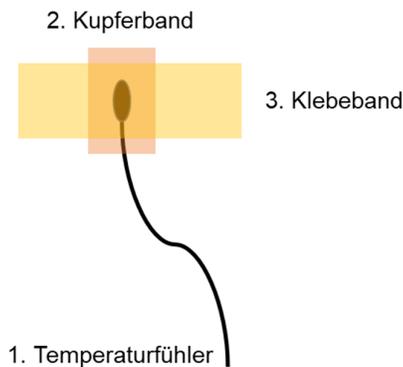


Abb. 8: Befestigung Temperaturfühler Oberflächentemperatur innen.

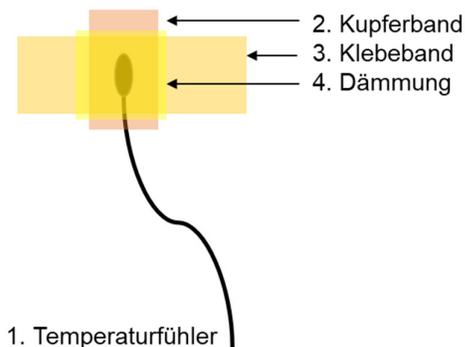


Abb. 9: Befestigung Temperaturfühler Oberflächentemperatur aussen.

2.2.3 Datenspeicherung

Aktuelle Messgeräte sind meist rechnerunabhängig mit Datenlogger ausgestattet. Für die Gerätbedienung und zum Auslesen der Daten wird der Logger mit einem PC verbunden. Werden PCs mit älteren Windows Versionen als Messrechner verwendet, empfiehlt sich eine Abklärung bezüglich der Kompatibilität. Eine Messwerterfassung bzw. -speicherung alle 10 Minuten ist ausreichend.

2.2.4 Kontrolle der laufenden Messung

Die Messungen nach 24 h kontrollieren, ob die Datenerfassung funktioniert.

2.3 Gerätespezifische Hinweise

Die folgenden Tipps beziehen sich auf die im Projekt verwendete Geräte- und Programmgeneration bzw. -version. Allfällige Verbesserungen oder Veränderung, die ggf. seitens der Hersteller in der Zwischenzeit vorgenommen wurden, sind nicht berücksichtigt.

2.3.1 greenTEG gSKIN U-Value KIT [2]

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

2.3.2 Testo 635-2 U-Wert-Set [3]

- Das U-Wert Messgerät ist hinsichtlich der Batteriebetriebsdauer standardmässig nicht für Langzeitmessungen von mehreren Tagen ausgelegt. Für diese empfiehlt die Firma, ein Netzteil (Zubehör) zu verwenden.
- Der Funkfühler hat eine Auto-Off Funktion. Um diese auszuschalten, muss der linke Schieber in der Batteriebox in der gezeigten Stellung sein (siehe Abb. 10, grüner Pfeil). Es gibt auch im Messgerät selbst eine Auto-Off Funktion. Es empfiehlt sich, diese und gleichzeitig auch die Auto-Off Funktion in der Gerätsoftware (wenn das Gerät bei der Messung über den PC bedient wird) auszuschalten.
- Ausgegebener U-Wert: Berechnung U-Wert für jeden Zeitschritt. Es erfolgt kein Test gemäss ISO 9869-1.



Abb. 10: Schieber zum Abstellen der Auto-Off Funktion (grüner Pfeil) beim Messgerät von Testo.

2.3.3 Ahlborn Almemo [1]

- Ausgegebener U-Wert: Berechnung experimenteller U-Wert (UWert_F2) für jeden Zeitschritt, dann Mittelung dieses U-Wertes. Kein Test gemäss ISO 9869-1.

3. Checkliste für Behörden zur Prüfung von Messungen

Diese Checkliste soll es ermöglichen, eine U-Wert Messung auf die Sorgfalt und die Qualität der Durchführung hin zu überprüfen. Eine Überprüfung der Messwerte auf Plausibilität ist Teil der Auswertung. Dies könnte z. B. durch eine Berechnung der zu erwartenden U-Werte mit vermuteten Konstruktionen sein.

Thema		Kommentar / Hilfestellung
Dokumentation	Daten zum gemessenen Bauteil (Ort am Gebäude, Messort, Orientierung, Zweck der Messung, Bauteiltyp, Dicke, Aufbau)	Orientierung des Bauteils Nordseite, oder komplett verschattete Wand, Abstand zu eindeutigen Wärmebrücken und Wärmequellen (Heizkörper) > 1 m; ggf. Anmerkung vorhanden, warum eine Bedingung nicht erfüllt werden kann und wie damit umgegangen wird (z.B. Erhöhung der Unsicherheit), Infos siehe Kapitel 2.1.1
	Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussentemperatur	Bei temperaturbasierten Messgeräten sollten die Messungen bei einer Temperaturdifferenz von mindestens $\Delta\theta > 15$ K zwischen innen und aussen erfolgen (Winter); bei Geräten mit Wärmeflussplatte kann dieser Wert auch tiefer sein. Infos siehe Kapitel 2.1.1
	Angabe Messzeitraum	
	Datenerfassungsintervall	≤ 30 Minuten, Intervall ≥ 60 Minuten kritisch zu hinterfragen, Infos siehe Kapitel 2.2.3
	Dauer der Messung (mindestens ≥ 72 h), bis Gültigkeit gemäss ISO 9869-1 erreicht ist	Kürzere Messungen, ohne schlüssige Begründung, sind abzulehnen, Infos siehe Kapitel 0
	Überprüfung der Gültigkeit der Messung gemäss ISO 9869-1	Empfehlung: Muss enthalten und erfüllt sein, Infos siehe Kapitel 0
	Abschätzung Messunsicherheit	Empfehlung: Muss enthalten sein, Infos siehe Kapitel 1.6
Messaufbau	Temperatursensor aussen mit Strahlungsschirm versehen?	Empfohlen, Infos siehe Kapitel 2.2.2.5
	Temperatursensor aussen (min. ca. 20 cm) und innen (min. ca. 10 cm) Abstand von Wand?	Empfohlen, Infos siehe Kapitel 2.2.2

4. Abkürzungsverzeichnis

4.1 Variablen

ε = Emissivität

h = Wärmeübergangskoeffizient (W/m^2K)

λ = Wärmeleitfähigkeit ($W/(m K)$)

q = Wärmestromdichte (W/m^2); Ausgabegrösse der Wärmestromplatte

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

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

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

θ = Temperatur ($^{\circ}C$)

θ_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) ($^{\circ}C$)

T = Temperatur (K)

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

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

W = Wärmestrom in (W)

4.1 Indizes

c = konvektiv

e = aussen

i = innen

r = Strahlung, langwellig (radiativ)

s = Simulation

si = Oberfläche innen

se = Oberfläche aussen

5. 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] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd ed. Melville: University Science Books, 1997.