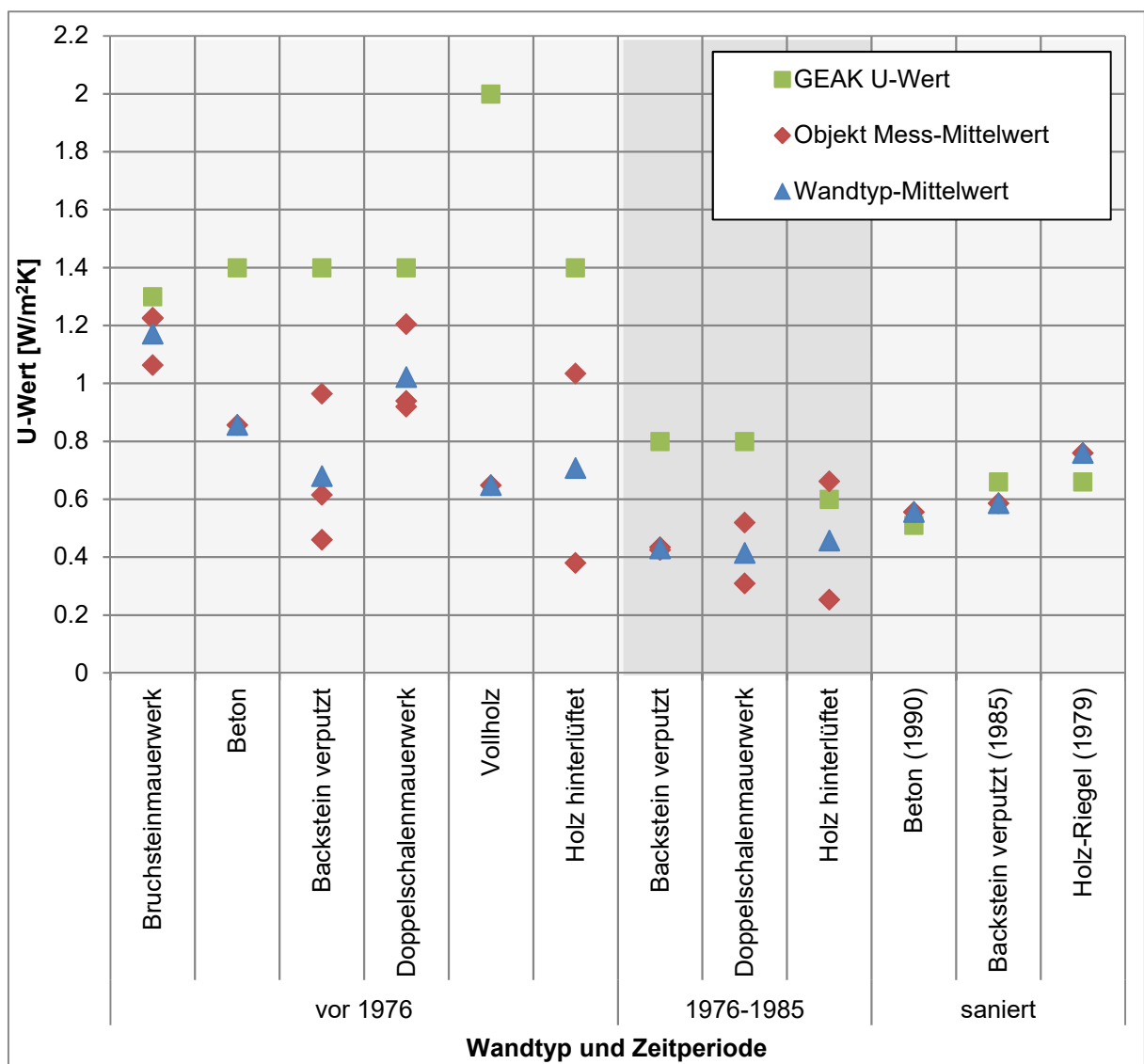




Schlussbericht vom 31. Dezember 2016

## UFELD: Feldmessungen von U-Werten zur Überprüfung der im Gebäudeenergieausweis (GEAK) hinterlegten U-Werte





**UFELD:** Feldmessungen von U-Werten zur Überprüfung der im Gebäudeenergieausweis (GEAK) hinterlegten U-Werte

hässig **sustech**  
Prima Klima

**Datum:** 31. Dezember 2016

**Ort:** Bern

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Gebäude und Städte  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

Flumroc AG, 8890 Flums  
isofloc AG, 9606 Bütschwil  
Agitec AG, 8108 Dällikon

**Auftragnehmer/in:**

hässig sustech gmbh  
Neuwiesenstrasse 8, 8610 Uster  
[www.sustech.ch](http://www.sustech.ch)

**Autor/in:**

Sara Wyss, hässig sustech, [wyss@sustech.ch](mailto:wyss@sustech.ch)  
Werner Hässig, hässig sustech, [haessig@sustech.ch](mailto:haessig@sustech.ch)

**BFE-Bereichsleitung:** Andreas Eckmanns, [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)  
**BFE-Programmleitung:** Rolf Moser, [moser@enerconom.ch](mailto:moser@enerconom.ch)  
**BFE-Vertragsnummer:** SI/501365-01

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

**Bundesamt für Energie BFE**

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



## Zusammenfassung

Ein neues Messverfahren erlaubt das Messen von U-Werten. Dies ermöglicht den IST-Zustand vor Sanierungen genauer zu bestimmen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden verschiedene Wandtypen mit Baujahr vor 1985 gemessen. Das Ziel dabei war, mit berechneten Werten zu vergleichen und die im GEAK-Berechnungstool hinterlegten U-Werte zu überprüfen. Die Untersuchung zeigt, dass mit dem gSKIN-Messgerät U-Werte mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 20\%$  direkt am Bau gemessen werden können. Dies ist vor allem bei unbekanntem Bauteilen eine grosse Hilfe für die Praxis.

Die Messungen zeigten im Vergleich zu den GEAK U-Werten deutlich tiefere Werte für den Wärmedurchgang. Diese tieferen Werte erscheinen realistisch und es werden Anpassungen für den GEAK vorgeschlagen. Die rund 100 durchgeführten Messungen zeigten auch einige Grenzen des Messverfahrens und dass es Anwendungserfahrung braucht. Deshalb wird das Messverfahren primär für Fachleute empfohlen. Stabile Randbedingungen und der Einsatz von zwei oder mehreren Messgeräten zeigen die besten Resultate.

## Résumé

Un nouvel appareil a été utilisé pour mesurer les valeurs U de différents types de murs construits avant 1985. L'objectif était d'évaluer la validité des valeurs U intégrées dans le modèle de calcul GEAK pour les murs typiques qu'il faut bientôt rénover. En fait, les valeurs U des murs construits avant l'application des premiers codes d'énergie modèle (milieu des années 70) étaient beaucoup plus basses que celles du GEAK. Les valeurs U mesurées semblent valides et donc des modifications aux valeurs U du GEAK sont proposées. En général, les valeurs U étaient dispersées sur une plage relativement grande (à la fois dans et entre différents types de murs). Les mesures ont montré que l'appareil gSKIN peut fournir des valeurs U mesurées raisonnables avec une précision de  $\pm 20\%$  par rapport aux valeurs calculées. Après environ 100 prises de mesures les limites du potentiel de cet appareil et la nécessité d'un utilisateur expérimenté sont également devenues apparentes. Il est donc recommandé que cet appareil soit utilisé par des experts dans le domaine des valeurs U. Les meilleurs résultats d'une mesure sont obtenus avec des stables conditions aux limites en mesurant avec au moins deux appareils de valeur U.

## Abstract

A newly developed device was used to measure the U-values of various wall types built before 1985. The goal was to assess the validity of the embedded U-values in the GEAK calculation model for typical walls that are due for a retrofit. It turns out that walls built before the first model energy codes were implemented (mid-70s) were much lower U-values than those found in the GEAK. These measured U-values appear valid and therefore changes to the GEAK U-values are proposed. In general, the U-values were scattered over a relatively large range (both within and between different wall types). The measurements showed that the gSKIN device can provide reasonable in-situ measured U-values with an accuracy of  $\pm 20\%$  compared to the calculated values. The approximately 100 measurements also illustrated the limits of the device's capabilities and the need for an experienced user. Therefore it is recommended that this device be used by experts in the field of U-values. Stable boundary conditions and measurements with two or more U-value kits provide the best results.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung (lang)</b> .....	<b>6</b>
<b>Ausgangslage</b> .....	<b>15</b>
<b>Ziel der Arbeit</b> .....	<b>15</b>
<b>Grundlagen</b> .....	<b>15</b>
GEAK U-Werte .....	15
U-Wert Berechnung.....	16
<b>Vorgehen</b> .....	<b>18</b>
Generell .....	18
Messung .....	19
Material/Messgerät .....	19
Vorgehen Messung .....	23
Messverfahren nach Norm ISO 9869.....	23
Messaufstellung .....	23
Messablauf .....	25
Messobjekte .....	25
Erfahrung Messungen .....	26
Abweichungen zwischen Messgeräten .....	26
Ungültige Messungen (gemäss ISO 9869) .....	28
Empfehlungen für die Anwendung von gSKIN.....	28
<b>Ergebnisse und Diskussion Messungen</b> .....	<b>30</b>
Vergleich zwischen Messungen und berechneten bzw. GEAK U-Werten.....	30
Abweichungen und mögliche Erklärungen .....	35
Vergleich detailliert pro Wandtyp.....	36
Bruchstein-Mauerwerk .....	36
Sandstein-Mauerwerk .....	37
Betonwände.....	37
Backstein verputzt .....	38
Backstein hinterlüftet .....	39
Doppelschalen-Mauerwerk.....	39
Vollholzwand .....	40
Holz-Rahmenbau .....	41



Riegelbau .....	42
Fazit .....	43
<b>Ergebnisse und Diskussion dynamische Effekte .....</b>	<b>44</b>
Massive Wände .....	46
Objekt 5-BH-01 – doppelschalige Backsteinwand, gedämmt, hinterlüftet .....	48
Objekt 6-DM-03 – doppelschalige Backsteinwand, gedämmt .....	50
Objekt 6-DM-04 – doppelschalige Backsteinwand, gedämmt .....	52
Objekt 7-VH-01 – Vollholzwand ohne Dämmung.....	54
Zusammenfassung Massivwände .....	56
Leichte Wände.....	56
Objekt 8-HH-01 – Holz-Rahmenbau, gedämmt .....	57
Objekt 8-HH-03 – Holz-Rahmenbau, gedämmt .....	59
Zusammenfassung Leichtbau-Wände .....	61
<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>62</b>
Folgerungen zu den Messergebnissen .....	62
Vergleich GEAK-U-Werte .....	62
Vergleich Berechnung .....	62
Messverfahren .....	63
Dynamische Betrachtung .....	64
<b>Referenzen .....</b>	<b>65</b>
<b>Anhang 1 Tabelle U-Wert Resultate.....</b>	<b>66</b>
<b>Anhang 2 <math>\lambda</math>-Werte Bruchsteinmauerwerk.....</b>	<b>70</b>
<b>Anhang 3 Musterberechnung Transmissionswärmeverlust mit/ohne Sonnenschein.....</b>	<b>73</b>
<b>Anhang 4 Detaillierte Ergebnisblätter aller Messungen.....</b>	<b>78</b>



## Zusammenfassung (lang)

### Ausgangslage

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) ist für die Berechnung des Wärmebedarfs eine sehr wichtige Grösse, auf der viele Energiegesetze und Fördergeldbedingungen basieren. Ein neues Messverfahren erlaubt eine nicht invasive Messung des U-Werts an Bauteilen. Diese Messung ist von grosser Bedeutung für bestehende Objekte, die vor einer Sanierung stehen, um die Ausgangslage genau zu kennen.

Hauptziel dieser Untersuchung war, die im Berechnungstool des GEAK (Gebäudeenergienachweis der Kantone) hinterlegten U-Werte für Aussenwände durch Messungen zu überprüfen. Ein weiteres Ziel war, die Messungen mit den berechneten U-Werten zu vergleichen und Abweichungen zu ergründen.

Die Messungen der U-Werte erfolgte mit dem gSKIN U-Wert Messgerät (Firma greenTEG AG, Zürich). Im GEAK sind U-Werte gemäss Abbildung 1 hinterlegt. Leichte Aussenwände wurden bereits in den 40-er Jahren etwas gedämmt. Ab Mitte der 70-er Jahre traten die ersten Energiegesetze in Kraft. Danach wurden die Wärmedämmvorschriften immer wieder verschärft und die U-Werte der Aussenwände bewegten sich entsprechend nach unten.

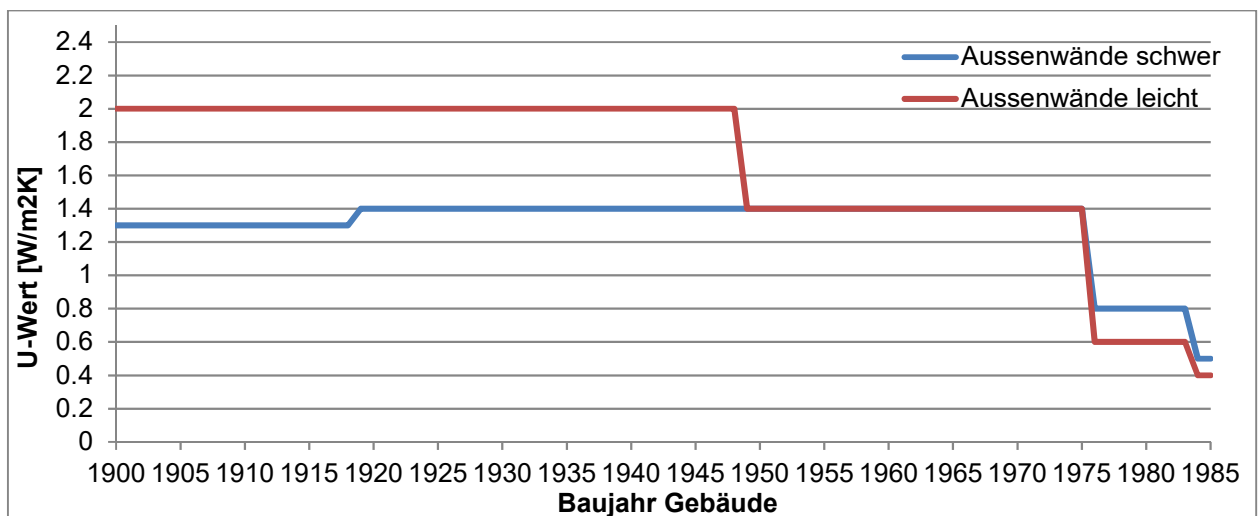


Abbildung 1: Die im GEAK hinterlegten U-Werte für schwere und leichte Wände von 1900 bis 1985

Im GEAK wird nur zwischen „schweren“ und „leichten“ Wänden differenziert und nicht nach verschiedenen Wandtypen. Für diese Untersuchung wurden die Wandtypen weiter differenziert.

### Vorgehen

Das folgende Vorgehen wurde gewählt:

1. Repräsentative Baukonstruktionen auswählen (nur Aussenwände)
2. Objekte (Gebäude) suchen und auswählen.
3. U-Werte messen
4. Abweichungen zu den heutigen GEAK- und berechneten U-Werten auswerten



### Messobjekte

Insgesamt wurden 103 Messungen an 32 Objekten und 9 verschiedenen Wandtypen durchgeführt. Alle Messungen erfolgten zwischen Dezember 2015 und April 2016. Insgesamt standen sechs gSKIN-Messgeräte im Einsatz.

	Wandkonstruktion	Geplante Anzahl Objekte	Effektive Anzahl gemessene Objekte	Anzahl Messungen pro Objekt	Anzahl Messungen effektiv
1	Bruchstein-Mauer (BM)	4	4	2-4	11
2	Sandstein-Mauer (SM) * keine Messobjekte waren verfügbar	2	0*		
3	Beton-Wand (BW)	2	2	3	6
4	Backstein verputzt (BV)	8	8	2-4	26
5	Backstein mit Zementfaserplatten oder Holz, hinterlüftet (BH)	2	2	3	6
6	Doppelschalen-Mauerwerk (DM)	6	6	2-4	15
7	Vollholz (VH)	3	3	6	14
8	Holz-Rahmenbau hinterlüftet (HH)	6	6	3-6	20
9	Holz Riegelbau (HR)	1	1	5	5
	Summe	34	32		103

**Tabelle 1:** Die verschiedenen Wandkonstruktionen mit Anzahl Messungen

Einige Messungen konnten nicht genutzt werden, weil sie innerhalb der Messperiode die nach ISO-Norm definierten Gültigkeitskriterien nicht erfüllten. Diese Norm und die Bedingungen für eine gültige Messung sind im nächsten Abschnitt beschrieben.

### Messverfahren

Die Firma greenTEG (ein Spin-off der ETH Zürich) hat das U-Wert Messgerät entwickelt. Das Produkt gSKIN KIT-2615C enthält alles, was für die U-Wert Messung notwendig ist.

Das gSKIN misst den Wärmefluss durch die Messfläche. Die beiden Temperatursensoren messen Innen-, resp. Aussentemperatur. Die drei Sensoren sind an einen Datenlogger angeschlossen, der während der Messung in regelmässigen Zeitabständen die Messdaten speichert. Um die Sensoren am Bauteil zu befestigen, wird ein Klebeband verwendet. Um den Kontakt zwischen Wärmeflussensor und Oberfläche zu verbessern, ist eine dünne Kontaktfolie angebracht.



**Abbildung 2:** gSKIN Mess-Kit Koffer; links: Wärmeflussensor und zwei Temperaturfühler

Der U-Wert wird über die gesamte Messdauer mit folgender Formel laufend berechnet:

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

U: Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup>· K)]

q: Wärmefluss [W/m<sup>2</sup>]

T<sub>i</sub>: Innentemperatur [°C]

T<sub>a</sub>: Aussentemperatur [°C]

Das Messverfahren basiert auf ISO 9869-1:2014 „Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance“. Diese Norm definiert die Gültigkeit einer Messung unter folgenden Bedingungen:

- Messdauer mindestens 72 Stunden
- in den letzten 24 Stunden eine U-Wertgenauigkeit dU<sub>24</sub> < 5%

Laut der ISO 9869 kann bis zu einer Abweichung von ±20% von einer „Übereinstimmung“ zwischen den gemessenen und berechneten U-Werten gesprochen werden. Diese relativ grosse Ungenauigkeit hat mit unbekanntem Heterogenitäten und Wärmeübergängen zu tun. Im Rahmen der Messungen wurde auch eine gewisse Abhängigkeit zur Innentemperatur beobachtet, welche aber nicht weiter quantifiziert werden konnte.

Das richtige Platzieren der Sensoren ist sehr wichtig. Viele Einflussfaktoren können die Messresultate verfälschen. Geeignete Messorte sind solche, wo die Messsensoren möglichst ungestört sind. Innen bedeutet dies, dass die Sensoren weit genug entfernt von Lüftungsdurchlässen, Sonneneinstrahlung und Radiatoren platziert werden. Um mögliche Randeffekte zu vermindern, ist der Sensor mindestens 0.5 m vom Fenster entfernt zu platzieren. Aussen ist der Temperatursensor möglichst vor der Sonne zu schützen. Die Messungen sollten bei einem Temperaturunterschied aussen/innen von mindestens 5 Kelvin stattfinden.

Der Datenlogger kann Datenpunkte mit Intervallen zwischen 1 Sekunde und 1 Stunde aufnehmen. In dieser Untersuchung wurde ein Intervall von 10 Minuten gewählt. Die Daten wurden nach vollendetem Messdurchgang als pdf sowie als csv-Datei zur weiteren Analyse gespeichert.





## Resultate

Die Resultate sind in drei Gruppen gegliedert:

- „vor 1976“ – Wände vor 1976 erstellt und nicht saniert
- „1976-1985“ – Wände ab 1976 erstellt und nicht saniert
- „saniert“ – sanierte Wände (GEAK U-Wert entsprechend angepasst)

Bei allen Objekten wurde an jeder Wand mehrfach gemessen. Die Werte wurden (wenn gültig) gemittelt, um einen U-Wert für die Wand zu erhalten. Danach wurden die U-Werte von unterschiedlichen Wänden des gleichen Typs und gleicher Zeitperiode nochmals gemittelt um einen U-Wert pro Wandtyp und Zeitperiode zu erhalten (z.B. alle Bruchstein-Wände mit Baujahr vor 1976). So konnte der Vergleich zum GEAK U-Wert gezogen werden. Die Tabelle unten fasst die Messresultate zusammen.

Zeitperiode	Objekt	Mittelwert gemess. U-Wert pro Wandtyp [W/m <sup>2</sup> K]	Mittelwert Messung U-Wert erstes Objekt [W/m <sup>2</sup> K]	Mittelwert U-Wert zweites Objekt [W/m <sup>2</sup> K]	Mittelwert U-Wert drittes Objekt [W/m <sup>2</sup> K]	Abweichung vom Wandtyp-Mittelwert	GEAK U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
vor 1976	Bruchsteinmauerwerk	1.17	1.23	1.06	1.23	-9% bis 5%	1.3
	Beton	0.86	0.86	-	-	-	1.4
	Backstein verputzt	0.68	0.46	0.97	0.62	-32% bis 42%	1.4
	Doppelschalenmauerwerk	1.02	0.94	1.21	0.92	-10% bis 18%	1.4
	Vollholz	0.65	0.65	-	-	-	2
	Holz hinterlüftet	0.71	0.38	1.04	-	-46% bis 46%	1.4
1976-1985	Backstein verputzt	0.43	0.44	0.43	-	-1% bis 1%	0.8
	Doppelschalenmauerwerk	0.42	0.31	0.52	-	-25% bis 25%	0.8
	Holz hinterlüftet	0.46	0.25	0.66	-	-45% bis 45%	0.6
saniert	Beton (1990)	0.56	0.56	-	-	-	0.51
	Backstein verputzt (1985)	0.59	0.59	-	-	-	0.66
	Holz-Riegel (1979)	0.76	0.76	-	-	-	0.66

**Tabelle 2:** Messresultate zu den U-Werten (mit gSKIN an verschiedenen Objekten gemessen)



Teilweise wurden grosse Unterschiede zwischen den einzelnen gemessenen U-Werten an verschiedenen Wänden innerhalb eines Wandtyps gemessen. Dies hat vor allem mit den Heterogenitäten der Wände und den unbekanntem Einflüssen wie Wärmeübergang zu tun.

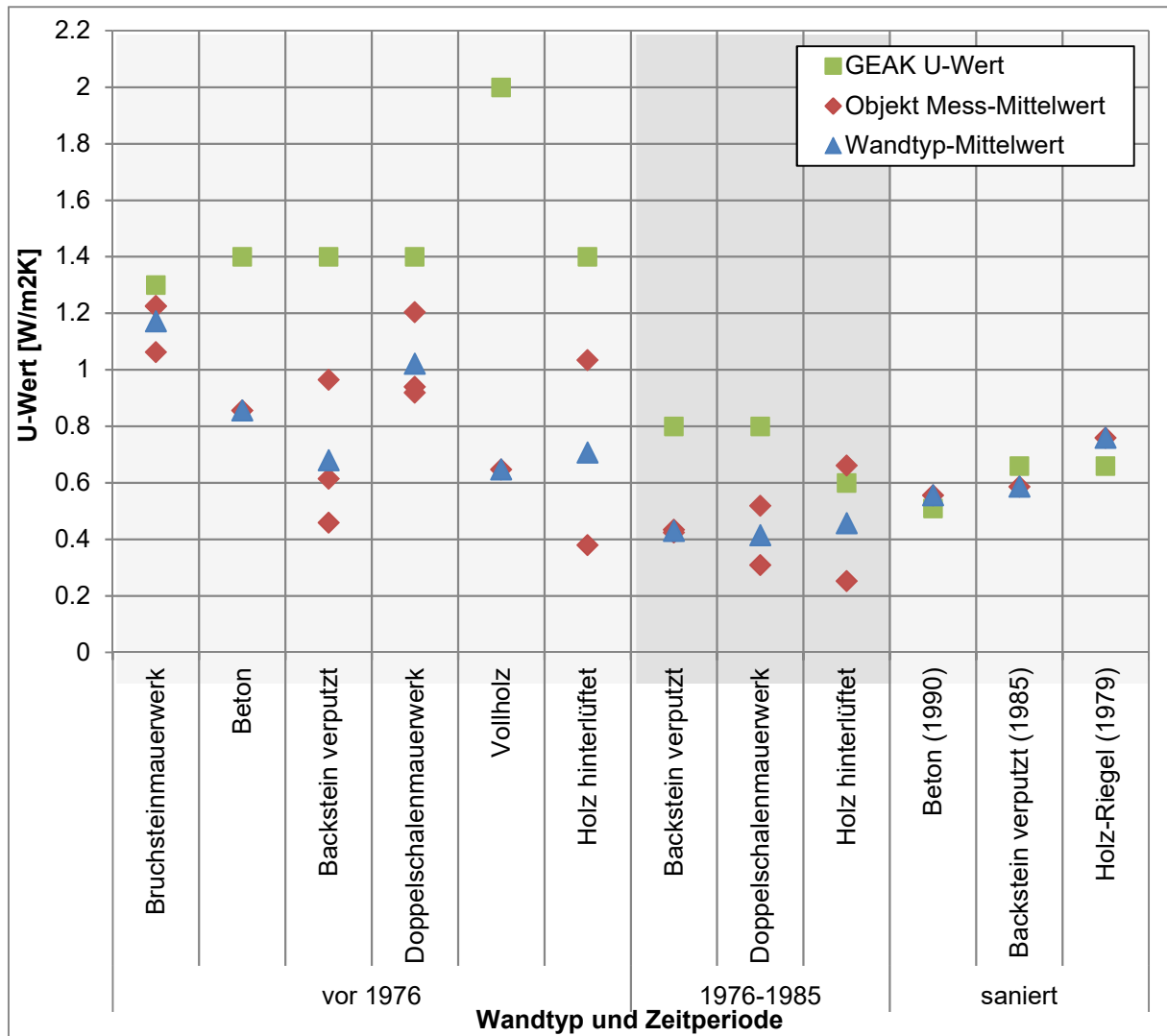


Abbildung 3: Die U-Wert Messungen im Vergleich zu den GEAK U-Werten für verschiedene Wandkonstruktionen

Aus Abbildung 3 wird deutlich, dass die hinterlegten GEAK U-Werte viel höher als die gemessenen U-Werte sind. Es ist also wichtig, dass die GEAK-Experten bei jedem Objekt die U-Werte kritisch hinterfragen und bei Bedarf eine Messung vornehmen. Einen GEAK einfach mit den hinterlegten U-Werten zu erstellen, wird sonst dazu führen, dass tendenziell zu hoher Wärmeverlust ausgewiesen wird.

In der nächsten Tabelle unten werden die Mittelwerte der gemessenen U-Werte pro Wandtyp und Bauperiode mit dem GEAK U-Wert und Mittelwert der berechneten U-Werte pro Wandtyp verglichen.



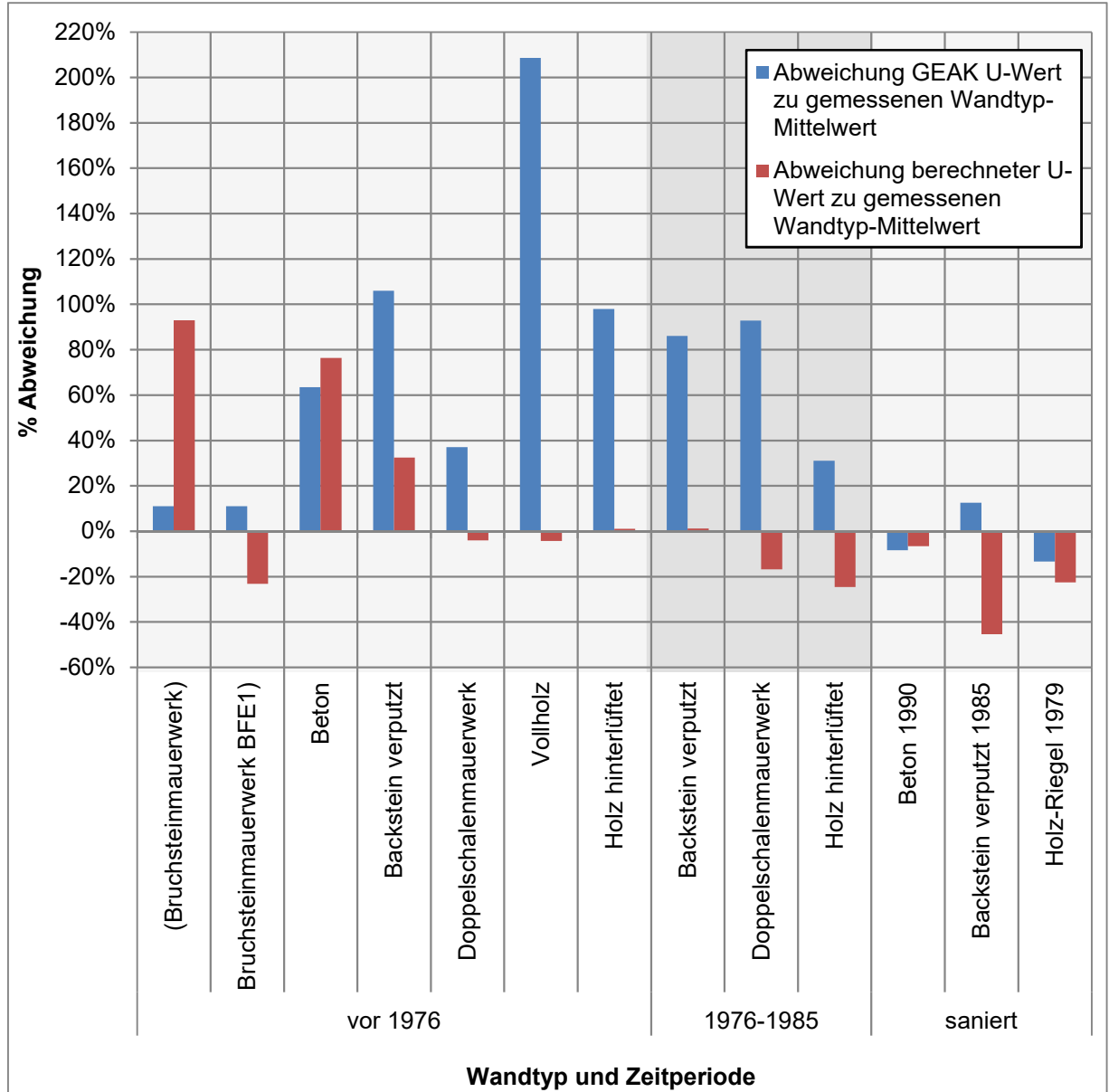
Baujahr	Objekt	Anzahl Objekte	Wandtyp-Mittelwert (aus Messung) [W/m <sup>2</sup> K]	Im GEAK hinterlegter U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Abweichung GEAK U-Wert zu Wandtyp-Mittelwert gemessen	Mittelwert spezifisch berechneter U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Abweichung berechneter U-Wert zu Wandtyp-Mittelwert gemessen
Vor 1976	(Bruchstein mauerwerk)	3	1.17	1.30	+11%	2.26	+93%
	Bruchstein mauerwerk BFE <sup>1)</sup>	3	1.17	1.30	+11%	0.90	-23%
	Beton	1	0.86	1.40	+63%	1.51	+76%
	Backstein verputzt	3	0.68	1.40	+106%	0.90	+32%
	Doppelschalen-mauerwerk	3	1.02	1.40	+37%	0.98	-4%
	Vollholz	1	0.65	2.00	+208%	0.62	-4%
	Holz hinterlüftet	2	0.71	1.40	+98%	0.72	+1%
1976-1985	Backstein verputzt	2	0.43	0.80	+86%	0.44	+1%
	Doppelschalen-mauerwerk	2	0.42	0.80	+93%	0.35	-17%
	Holz hinterlüftet	2	0.46	0.60	+31%	0.35	-25%
Saniert	Beton (1990)	1	0.56	0.51	-8%	0.52	-7%
	Backstein verputzt (1985)	1	0.59	0.66	+13%	0.32	-45%
	Holz-Riegel (1979)	1	0.76	0.66	-13%	0.59	-23%

**Tabelle 3:** Vergleich der Messresultate mit berechneten U-Werten sowie den GEAK U-Werten

1) U-Wert vom Bauteilkatalog Sanierungen vom BFE und nicht nach SIA 279 berechnet

Auffallend bei den gemessenen U-Werten sind die grossen Unterschiede bei den Bauteilen mit Baujahr vor 1976. Hier sind die U-Werte zwischen 0.65 W/m<sup>2</sup>K bei den Holz-hinterlüfteten Wänden und 1.17 W/m<sup>2</sup>K bei Bruchstein-Mauerwerk. Eine Erklärung dazu könnte darin liegen, dass bevor die ersten Energievorschriften entstanden, viel unterschiedlicher gebaut wurde. Die Mittelwerte der U-Werte von Wänden mit Baujahr zwischen 1976-1985 sind im Vergleich einander sehr ähnlich, zwischen 0.42 und 0.46 W/m<sup>2</sup>K und zudem mit geringen Abweichungen zu den berechneten Werten.

Die U-Werte der Wände wurden anhand von vorhandenen Unterlagen der Bauteile und mit Material- $\lambda$ -Werten aus der Baustoff-Kennwerte-Tabelle des SIA (SIA 279) berechnet.



**Abbildung 4:** Prozentuale Abweichung der gemessenen U-Werte (0-Linie) zu GEAK- bzw. zu berechneten U-Werten  
1) U-Wert vom Bauteilkatalog Sanierungen vom BFE und nicht nach SIA 279 berechnet

Die Resultate zeigen, **dass die GEAK U-Werte deutlich höher (50-60%)** als die gemessenen wie auch die berechneten U-Werte liegen. Der Unterschied zwischen gemessenen und den GEAK U-Werten war bei Wänden, die vor der Einführung der ersten Energiegesetze (ca. 1976) erstellt wurden, am grössten.

Die gemessenen U-Werte stimmten häufig gut (d.h. im Bereich +/- 20%) mit den berechneten U-Werten überein. Es gab einzelne Wände, die aus Objekt-spezifischen Gründen vom berechneten U-Wert abgewichen sind (Beton-Wand vor 1976, sanierte Backstein-Wand). In diesen Einzelfällen wurde



davon ausgegangen, dass die Berechnungen auf fehlerhaften Unterlagen basierten und die Abweichung darauf zurückzuführen ist. Nur die Bruchstein-Wände haben über mehrere Objekte eine Abweichung zu den berechneten U-Werten aufgezeigt. Dort waren die gemessenen U-Werte deutlich tiefer als die berechneten. Dies hat höchstwahrscheinlich mit den eingesetzten Material- $\lambda$ -Werten zu tun. Im Bauteilkatalog des BFE für Sanierungen ist ein U-Wert für typische Bruchsteinwände mit  $0.90 \text{ W/m}^2\text{K}$  angegeben. Wie dieser U-Wert berechnet wurde, ist nicht nachvollziehbar. Werden die gemessenen U-Werte aber mit diesem U-Wert verglichen, ist die Abweichung nur noch -23% anstatt 93% beim „normal“ (mit SIA 279 definierten  $\lambda$ -Werten) berechneten U-Wert.

Bei den bereits sanierten (gedämmten) Wänden war die Übereinstimmung zwischen den gemessenen, berechneten und GEAK U-Werten grundsätzlich gut.

Mit diesem Messverfahren können auch dynamische Effekte der Sonneneinstrahlung festgestellt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte der Effekt für wenige Einzelfälle quantifiziert werden. Im Winter einwirkende Sonneneinstrahlung führt nur zu minimalen Reduktionen des Energieverlustes. Das Messverfahren zeigt wohl einen reduzierten Wärmetransport, wenn die Aussenwand durch Sonne erwärmt wird, gleichzeitig erhöht sich aber die Innentemperatur (dank Wärmeeinstrahlung durch die Fenster) und somit steigt auch der Wärmefluss nach Aussen wieder an. Insgesamt erachten die Autoren das Messverfahren als zu ungenau um damit dynamische Effekte zu quantifizieren.

### Fazit

Das Hauptziel dieser Untersuchung, die im Berechnungstool des GEAK hinterlegten U-Werte durch Messungen zu überprüfen, konnte mit den über 100 U-Wert-Messungen im Rahmen dieser Untersuchung erreicht werden.

Die gemäss Messungen realistischen U-Werte der untersuchten Wände unterscheiden sich zu dem im GEAK-Tool verwendeten U-Werten teilweise massiv. Infolge dieser grossen Abweichungen zwischen GEAK U-Werten und gemessenen U-Werten kommen die Autoren zum Schluss, dass **die GEAK-U-Werte auf  $1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$**  (für Wände mit Baujahr vor 1976) neu festgelegt werden sollten (statt 1.4). Bei Wänden mit Baujahr zwischen 1976-1985 ist es zudem angezeigt **die GEAK U-Werte für schwere und leichte Wände beide auf je  $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$**  zu setzen.

Die Gründe für Abweichungen zwischen Messungen und berechneten U-Werten sind oft nicht eindeutig zu ergründen.

Das Messen mit einem U-Wert-Messset erwies sich als anspruchsvoller als erwartet. Einzelne Messungen wurden als (nach SIA 9869) ungültig qualifiziert, weil die Randbedingungen Aussen oder Innen zu grosse Schwankungen aufwiesen. Drei Ausfälle von Messgeräten traten auf. Daher folgende Hinweise zum Messverfahren:

1. Stabile Randbedingungen (Temperaturen) während der Messdauer von 72h sind wichtig und führen zu den zuverlässigsten Messresultaten
2. Es empfiehlt sich pro Messung mindestens zwei Messgeräte einzusetzen (Redundanz)
3. Anwendung nur durch geschulte Personen (z.B. Thermographen, Bauphysiker, Energieberater), da die Resultate nicht selten von den Erwartungen abweichen und deshalb interpretiert werden müssen. Man kann das Vorgehen mit jenem für Thermografie-Aufnahmen vergleichen.

### Ausblick

Um statistische Aussagen zur Genauigkeit des U-Wert-Messverfahren machen zu können, müssten deutlich mehr Objekte gemessen werden.



Dieses Messverfahren zeigt grosses Potenzial auch weitere Bauteile hinsichtlich heutiger U-Wert-Abschätzungen zu verifizieren.

Das Messverfahren ist geeignet bei völlig unbekanntem Bauteilen eine Angabe zum Wärmedurchgang zu erhalten und somit die Ausgangslage vor Sanierungen zu kennen.

Längerfristig, wenn die Genauigkeit des Verfahrens noch verbessert werden kann, dann sind U-Wert-Messungen auch für quantitative Ausführungskontrollen einsetzbar.

Vorschläge zur Optimierung des Verfahrens:

Eine Verbesserung wäre ein drahtloser Aussenfühler. Der Hersteller des Messgeräts will künftig auch eine drahtlose Variante entwickeln um die Möglichkeiten des Messgeräts zu erweitern.

Generell soll die Bedienung noch einfacher (und damit kostengünstiger) werden. Zum Beispiel sollte der Datenlogger möglichst eine Meldung absetzen, wenn die Ergebnisse gültig sind. Der Abbau sollte so einfach sein, dass dies durch einen Laien möglich ist. Auch sollte die Verpackung handlicher sein um einen Postversand zu vereinfachen.

Da bessere Messwerte mit dem Einsatz von mehreren Messgeräten/-sensoren erzielt werden, wäre es denkbar, diese in einem Messgerät zu integrieren. Das würde die Zeit für den Ein- und Ausbau erheblich reduzieren.

Die bei den Messungen festgestellte Abhängigkeit von den Innentemperaturen ist weiter zu untersuchen und die Zusammenhänge sind in der Dokumentation besser zu erklären.



## Ausgangslage

Die Wärmedurchgänge (U-Werte) von Bauteilen haben in der energietechnischen Baupraxis eine sehr grosse Bedeutung. Viele Energiegesetze, Verordnungen und Fördergeldvergaben basieren auf U-Werten. Trotz dieser grossen Bedeutung wurden die U-Werte bis heute nicht am Bau gemessen, da entsprechende Messverfahren fehlten. Seit kurzem ist es möglich, auf Basis von ETH-Forschungsarbeiten und dank einer neuen Entwicklung der Firma greenTEG (spin-off der ETH Zürich) U-Werte verschiedener Bauteile direkt an einem Gebäude (in-situ, aber nicht invasiv) zu messen. Das Messverfahren ist konform zu ISO 9869.

Je mehr Gebäude modernisiert werden, desto wichtiger ist es, den Ist-Zustand des vorliegenden Bauteils gut zu kennen. Denn der Ist-Zustand eines Bauteils hat direkte Auswirkungen auf den Sanierungsentscheid und auf die Erfüllung von gesetzlichen Grenzwerten. Es werden auch immer häufiger Bauten mit minimal vorhandener Wärmedämmung energetisch nachgebessert. Häufig sind von älteren Bauten auch keine Plangrundlagen mehr verfügbar. In solchen Fällen kann der Ist-U-Wert nur grob abgeschätzt oder mit Probebohrungen und Materialbestimmungen (invasiv) ermittelt werden.

Die zur Erarbeitung eines Gebäudeenergieausweises der Kantone (GEAK) notwendige Software enthält U-Wert-Angaben, welche grob nach Baujahr und Bauschwere unterschieden werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass viele Anwender des GEAK-Tools diese Ausgangs-U-Werte ohne weitere Prüfung übernehmen.

## Ziel der Arbeit

Ziel dieses Projektes ist unterschiedliche Baukonstruktionen mit dem gSKIN-Messgerät zu messen und die Abweichungen der U-Werte zwischen Messwert, den GEAK-U-Werten und berechneten U-Werten zu erkennen und zu dokumentieren. Ferner sollen Interpretationen und Erkenntnisse in Bezug auf die U-Wert-Bestimmungen zusammen getragen werden.

Damit der Umfang der Untersuchung nicht zu gross wird, wurde entschieden sich in einem ersten Schritt nur auf das Messen von Wandkonstruktionen zu konzentrieren.

Ein weiteres Ziel besteht im Erfassen der Auswirkung von Sonnenbestrahlung (dynamische Effekte).

## Grundlagen

### GEAK U-Werte

Der Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK) stellt den GEAK-Experten ein eigenes Berechnungstool für die GEAK-Bewertungen zur Verfügung. Dieses Tool berechnet die Energieeffizienz der thermischen Gebäudehülle sowie der Gesamtenergie (inkl. Haustechnik und Haushaltsstrom). Als Vereinfachung für bestehende Gebäude ohne ausreichende Unterlagen zu den Bauteilen sind U-Werte nach Baujahr und Typ hinterlegt. Die Abbildung 1 zeigt diese U-Werte für die zwei Wandtypen „leicht“ und „schwer“.

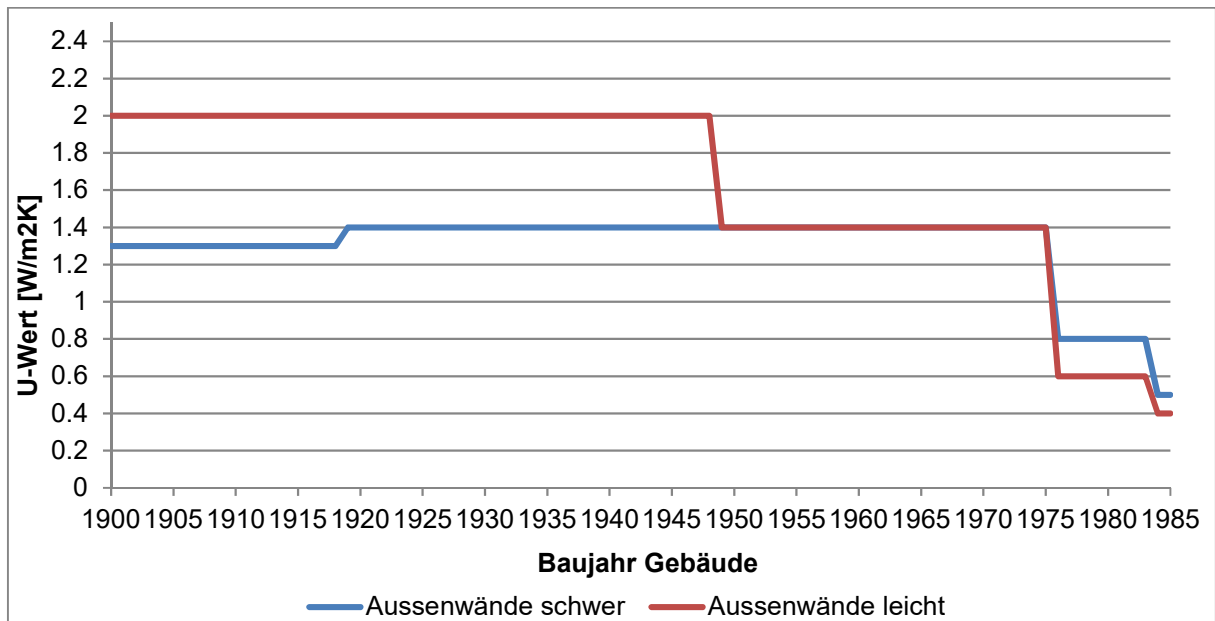


Abbildung 1: Verlauf der im GEAK hinterlegten U-Werte für schwere und leichte Wände von 1900 bis 1985

Obige Abbildung zeigt insbesondere die „Stichjahre“ auf, in denen sich der U-Wert für die Wandtypen verändert. Ca. 1976 traten die ersten Energiegesetze in Kraft. Ab diesem Jahr war es nicht mehr möglich einen Neubau ohne Dämmung an den Wänden zu erstellen. Entsprechend reduzierten sich die U-Werte um rund 50%.

Der GEAK-Experte soll sich nur auf die U-Werte aus der Abbildung 1 abstützen, wenn er selbst keinen U-Wert berechnen kann.

Bei sanierten Gebäudeteilen kann der neue U-Wert mit Angabe der Stärke der zusätzlich angebrachten Dämmung und des Sanierungsjahrs ermittelt werden.

## U-Wert Berechnung

U-Werte werden in der Regel mit folgender Formel berechnet (SIA 180, 2014):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{se} + \sum_1^i \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{si}}$$

mit

$U$ : Wärmedurchgangskoeffizient [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

$R_T$ : Wärmedurchgangswiderstand [ $(m^2 \cdot K)/W$ ]

$R_{se}$ : äusserer Wärmeübergangswiderstand [ $(m^2 \cdot K)/W$ ]

$d_i$ : Schichtdicke der Schicht  $i$  [m]

$\lambda_i$ : spezifische Wärmeleitfähigkeit der Schicht  $i$  [ $W/(m \cdot K)$ ]

$R_{si}$ : Wärmeübergangswiderstand innen [ $(m^2 \cdot K)/W$ ]





Die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ -Wert) von Baustoffen wird entweder vom Produkthersteller deklariert oder von anerkannten Listen von typischen Werten abgeleitet (z.B. Baustoffkennwerte-Tabelle der SIA 279).  $\lambda$ -Werte von Produktehersteller werden in der Regel von anerkannten, unabhängigen Prüfinstituten ermittelt (z.B. Empa).

Die Wärmeübergangswiderstände  $R_{se}$  und  $R_{si}$  bilden den Übergang von der Oberflächentemperatur und Aussen- resp. Raumtemperatur. Die Konvektion an der Oberfläche spielt hier eine entscheidende Rolle. Der  $R_{se}$  ist stark vom Wind beeinflusst. Darum ist der  $R_{se}$  jeweils tiefer als der  $R_{si}$ . Die in der Praxis angewendeten Werte für  $R_{si}$  und  $R_{se}$  betragen 0.13 resp. 0.04  $m^2K/W$  (0.00  $m^2K/W$  bei Bauteilen gegen Erdreich oder Bauteilheizung) gemäss SIA 180 (2014).

Mit obiger Formel werden statische U-Werte berechnet. Mit U-Wert Messungen können die Einflüsse von dynamischen Effekten wie Sonneneinstrahlung geprüft werden.

Die berechneten U-Werte wurden anhand vorhandener Unterlagen zum Gebäude und Annahmen der Autoren (basiert auf langjährige Erfahrung als Energieberater und GEAK-Experten) berechnet. Es wurden bei allen Messobjekten die U-Werte mittels der in der Tabelle 1 aufgeführten  $\lambda$ -Werte aus der SIA 279 berechnet.

Baustoff	$\lambda$ -Wert gemäss SIA 279 [W/mK]
Bruchstein, Bollenstein, etc.	2.20
Sandstein	2.30
Kalksandstein	1.00
Modulbackstein	0.440
Sichtbackstein	0.520
Beton (Mittelwert Stahlbeton mit 1% oder 2% Stahl)	2.40
Innenputz	0.470
Aussenputz	0.860
Holz	0.130
Holzwerkstoff	0.130
Gips-Bauplatten	0.230
Luftschicht/Installationsebene	Unterschiedlich je nach Stärke
Wärmeübergang	$R_{si} / R_{se}$ [ $m^2K/W$ ]
Innen	0.130
Aussen	0.040
Hinterlüftet	0.130

**Tabelle 1:**  $\lambda$ -Werte gemäss Baustoffkennwerte-Tabelle SIA 279, für die berechneten U-Werte verwendet



Für die Berechnung der U-Werte wurde ein vom BFE/EnFK zertifiziertes Programm verwendet. Dieses Programm verwendet hinterlegte  $\lambda$ -Werte, die sich auf die Baustoffkennwerte-Tabelle der SIA 279 abstützen.

Bei hinterlüfteten Konstruktionen werden nur die Schichten von innen bis zur Hinterlüftung berücksichtigt. Es wird dann der Wärmeübergangswert  $R_{si}$  wie innen verwendet, da der Windeinfluss (Konvektion) in der Hinterlüftung als minimal angenommen werden kann. Dieses Verfahren wird gemäss Bauteilkatalog vom BFE angewendet.

Bei inhomogenen Konstruktionen wird der U-Wert mit einem handelsüblichen vereinfachten Verfahren (unter anderem gemäss Empfehlung von Lignum) anstatt mit dem Näherungsverfahren gemäss ISO 6946 berechnet. Dieses Verfahren wird gegenüber dem Näherungsverfahren bevorzugt, weil es praxisnäher ist. Die eindimensionalen U-Werte durch die unterschiedlichen Querschnitte werden je separat berechnet und gemäss Flächenanteilen gemittelt, um einen realistischen U-Wert für das Bauteil zu erhalten.

Gewisse Unsicherheits- bzw. Fehlerquellen bei den U-Wert Berechnungen sind unvermeidlich. Obwohl Messobjekte mit möglichst gut dokumentieren Wandaufbauten gewählt wurden, mussten gewisse Annahmen getroffen werden. Bereits die Festlegung der  $\lambda$ -Werte in Tabelle 1 enthalten gewisse Unsicherheiten. Die eingebauten Baustoffe können andere effektive  $\lambda$ -Werte haben. Da keine Probebohrungen gemacht wurden, konnte nicht bestätigt werden, dass die Wände so gebaut wurden wie dokumentiert. Bei sehr alten Gebäuden sind in der Regel keine genauen Unterlagen zu den Wandaufbauten vorhanden. Durch Befragung der Bewohner konnten manchmal weiterführende Informationen zu den Aufbauten ausfindig gemacht werden. Bei inhomogenen Bauteilen wurde in der Regel von einem Holzanteil von 15% bei tragenden Bauteilen und von 10% bei nichttragenden Bauteilen ausgegangen.

Die gemessenen U-Werte stimmten auch an gleichen Wänden und am gleichen Messort nicht immer überein. Es wurden deshalb immer mehrere Messgeräte am selben Ort platziert. Aus den Resultaten der Messungen wurden Mittelwerte pro Wandtyp, Objekt, Wandaufbau und Orientierung ermittelt. Bei den inhomogenen Wänden musste der U-Wert über die verschiedenen Aufbauten gemittelt werden.

Für jede Messung wurde ein Ergebnisblatt mit allen relevanten Informationen zur Berechnung und Messung zusammengestellt. Diese befinden sich im Anhang 4.

## Vorgehen

### Generell

Das generelle Vorgehen ist folgendermassen definiert:

#### 1. Repräsentative Baukonstruktionen auswählen (nur Aussenwände)

Es geht darum Wandkonstruktionen für die Untersuchung zu wählen. Einen ersten Vorschlag hat das Projektteam erarbeitet. Zusammen mit der Begleitgruppe wurde eine Auswahl von 9 Konstruktionen getroffen. Kriterien für die Auswahl:

- Starke Verbreitung in der Schweiz
- grosse Unsicherheit bezüglich des effektiven U-Wertes



Es sollen sowohl gedämmte wie auch ungedämmte Wände gemessen werden.

## **2. Objekte (Gebäude) suchen und auswählen**

Entsprechend dem typologischen Raster (Tabelle 3 in Kapitel 0) und den gewählten repräsentativen Baukonstruktionen sollen Objekte ermittelt werden, welche gemessen werden können/dürfen. Für diese Arbeit konnte auf die Gebäudedatenbank der hässig sustech gmbh und der beteiligten Partnerfirmen zurückgegriffen werden.

## **3. U-Werte messen**

Die Messungen mit gSKIN müssen sorgfältig eingerichtet werden, sind aber relativ schnell installiert und auch deinstalliert. Das grösste Problem ist die lange Wartezeit (Messdauer mindestens 72 Stunden für ISO-Konformität). Zudem soll jede Messung zweifach an unterschiedlich exponierten Wänden unabhängig erfolgen. Entsprechend waren 6 Mess-Sets im Einsatz. Die geplanten 80 Messungen konnten so innerhalb von rund 3 Monaten durchgeführt werden (Mitte Dezember bis Ende März 2016).

Begründung: Die Zweifach-Messungen sind sinnvoll, da damit auch Effekte aufgrund unterschiedlicher Expositionen erfasst werden können. Je nach Stärke der Schwankungen in den Rahmenbedingungen sind immer wieder auch mal ungünstige Messungen möglich, daher wurde mit rund 20% nicht verwertbaren Messungen gerechnet. Der Mindesttemperaturunterschied von 5 Kelvin kann in Wintermonaten relativ gut erreicht werden. Dieses Messverfahren berücksichtigt allfällige dynamische Effekte (z.B. Aufwärmung durch Solarstrahlung). Entsprechend sollen an einzelnen Objekten neben einer Nordexposition zumindest eine gut besonnte Stelle desselben Wandtyps gemessen werden.

## **4. Abweichungen zu den heutigen GEAK- und berechneten U-Werten**

Die ermittelten Abweichungen werden dokumentiert und möglichst mit Erklärungen versehen. Interpretationen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen werden erarbeitet und in diesem Bericht übersichtlich festgehalten. Die Empfehlungen sollen insbesondere auch Hinweise zum generellen Vorgehen bei der U-Wert-Bestimmung enthalten.

# **Messung**

## **Material/Messgerät**

Die Firma greenTEG hat das U-Wert Messgerät entwickelt. Das Produkt gSKIN KIT-2615C enthält alles, was für die U-Wert Messung notwendig ist. Die Abbildung 2 zeigt das gSKIN Kit mit Wärmeflussensor, Aussen- und Innentempersensoren links oben vergrössert.



**Abbildung 2:** gSKIN Kit Zusammensetzung

(Quelle: [http://u-value.greenteg.com/wp-content/uploads/2015/10/gSKIN\\_KIT\\_U-Wert-Datenblatt-v1.5.pdf](http://u-value.greenteg.com/wp-content/uploads/2015/10/gSKIN_KIT_U-Wert-Datenblatt-v1.5.pdf); am 27.11.2015 heruntergeladen)

Das gSKIN misst den Wärmefluss durch die Messfläche. Die beiden Temperatursensoren messen Innen-, resp. Aussentemperatur. Die drei Sensoren sind an einem Datenlogger angeschlossen, der während der Messung in regelmässigen Zeitabständen die Messdaten speichert. Um die Sensoren am Bauteil zu befestigen, wird Klebeband verwendet. Um den Kontakt zwischen Wärmeflussensor und Oberfläche zu verbessern ist eine dünne Kontaktfolie angebracht.

Die Tabelle 2 zeigt alle Bestandteile und Eigenschaften des gSKIN-Messgeräts auf.



Produktname	gSKIN® KIT-2615C
Artikelnummer	A-063479
gSKIN® KIT beinhaltet*	Sensor: gSKIN®-XO 67 7C (30mm x 30mm) Logger: DLOG-4231 inkl. 2 Temperatursensoren Software Klebeband
Wärmefluss Messbereich Min / Max [W/m <sup>2</sup> ]	±200
Wärmefluss Auflösung [W/m <sup>2</sup> ]	<0.22
Min. Sensor Sensitivität <sup>b</sup> (S) [µV/(W/m <sup>2</sup> )]	7
Genauigkeit Temperatursensoren [°C]	±0.5 (-10...+65 °C) ±2.0 (-55...+125 °C)
Logger Abmessung (l x w x h) [mm x mm x mm]	52 x 20 x 15
Messfrequenz	1/Sek. bis 1/Std.
Bit Auflösung [bits]	12
Speicherkapazität [Anzahl Messpunkte]	>2'000'000
Batteriekapazität <sup>c</sup> [Tage]	>30 (aufladbar über USB Kabel)
Computer Schnittstelle	USB
Software	Per email zu beziehen / Download link
Betriebssystem	Windows 2000 / XP / Vista / 7 / 8
Betriebsarten	Live-Anzeige / Speicherung Analysewerte Datenlogger
Temperaturbereich Min/Max [°C]	-40 / 100 (-20 / 65 für Logger)
Kalibrierungsbereich Temperatur Min/Max [°C]	-30 / 70
Kalibrierungsgenauigkeit <sup>b</sup> [±%]	3
Kabellänge Temperatursensor 1 / 2 [m]	5.0 / 1.0
Kabellänge Wärmeflussensor und Logger [m]	1.0 / 0.5 (mit Stecker)

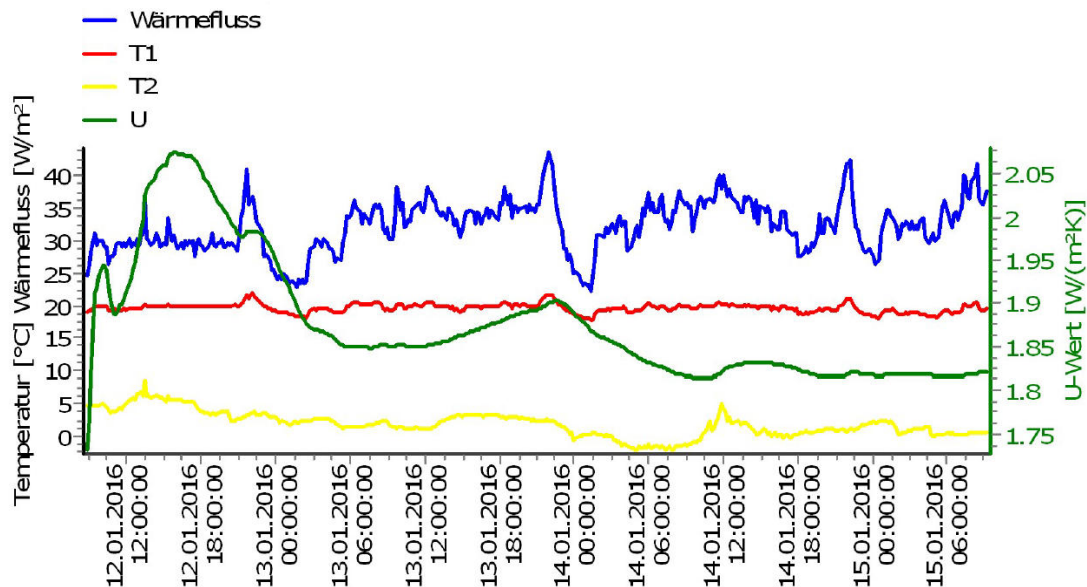
**Tabelle 2:** Bestandteile und Eigenschaften U-Wert Messausrüstung gSKIN Kit

(Quelle: [http://u-value.greenteg.com/wp-content/uploads/2015/10/gSKIN\\_KIT\\_U-Wert-Datenblatt-v1.5.pdf](http://u-value.greenteg.com/wp-content/uploads/2015/10/gSKIN_KIT_U-Wert-Datenblatt-v1.5.pdf); am 27.11.2015 heruntergeladen)

Eine Software zur Datenauswertung ist von greenTEG zum Download erhältlich. Diese kann die auf dem Datenlogger gespeicherten Messdaten auswerten und einen einseitigen pdf-Messbericht erstellen. Im Bericht sind die wichtigsten Parameter der Messung, der resultierende U-Wert sowie eine Information zur Gültigkeit der Messung nach ISO 9869, vorhanden. Es ist auch möglich die Daten in einer csv-Datei aus der Software herunterzuladen. Somit können die Rohdaten weiter bearbeitet werden.



Ebenfalls im Messbericht sind die Messkurven aufgezeigt. Diese zeigen sowohl den Verlauf der Messpunkte über die gesamte Messdauer wie auch den resultierenden, berechneten U-Wert auf.



**Abbildung 3:** Beispiel Messkurve Auswertung Software gSKIN-Messung (T1 = Temperatur innen, T2 = Temperatur aussen)

Die grüne Linie in der Abbildung 3 zeigt den aus den Messdaten berechneten U-Wert auf. Die restlichen Kurven zeigen die Temperatur innen (rot), Temperatur aussen (gelb) und Wärmefluss (blau).

Der U-Wert wird über die gesamte Messdauer mit folgender Formel laufend neu berechnet:

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

mit

U: Wärmedurchgangskoeffizient [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

q: Dichte der Wärmestromrate [ $W/m^2$ ]

T<sub>i</sub>: Innentemperatur [ $^{\circ}C$ ]

T<sub>a</sub>: Aussentemperatur [ $^{\circ}C$ ]

Der Wärmeflussensor misst den Wärmefluss anhand der Spannung und der sensorspezifischen Sensitivität (Kalibrierwert) mit folgender Formel:

$$\varphi = \frac{V}{S}$$

mit

φ: Wärmefluss [ $W/m^2$ ]



V: gemessene Spannung [V]

S: sensorspezifische Sensitivität [ $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ]

Die Kalibrierung hat eine Genauigkeit von  $\pm 3\%$  gemäss greenTEG.

## Vorgehen Messung

### Messverfahren nach Norm ISO 9869

Das Messverfahren basiert auf der ISO 9869-1:2014 „Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance“. Diese Norm definiert die Gültigkeit einer Messung unter folgenden Bedingungen:

- Messdauer mindestens 72 Stunden
- in den letzten 24 Stunden eine U-Wertgenauigkeit  $dU_{24} < 5\%$

Messungen dürfen länger als 72 Stunden dauern; es ist aber von Vorteil, wenn die Messung immer nach einem vollendetem Tag/Nacht-Zyklus abgeschlossen wird.

Laut der ISO 9869 sind Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten U-Werten von  $\pm 20\%$  signifikant. Das heisst, bis zu einer Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem U-Wert von  $\pm 20\%$  kann von einer „Übereinstimmung“ zwischen den beiden U-Werten gesprochen werden.

### Messaufstellung

Vor der Messung wurden die U-Werte anhand von vorhandenen Gebäude-Unterlagen berechnet resp. abgeschätzt, dort wo die Gebäudedokumente unzureichend waren. Zudem wurden anhand der Planunterlagen geeignete Messorte gesucht. Bei der Ankunft am Objekt wurden in Absprache mit dem Bewohner/der Bewohnerin die Messstellen definitiv festgelegt und die Messgeräte installiert. Die Bewohner wurden instruiert die Fenster möglichst wenig zu öffnen, keine grosse Änderungen an der Heizung vorzunehmen und die hässig sustech gmbh zu kontaktieren, falls während der Messung Probleme auftreten sollten (Sensor beschädigt, fällt herunter, etc.).

Jedes Messobjekt erhielt eine eigene Bezeichnung. Diese Bezeichnungen sind folgendermassen aufgebaut: Nummer Wandtyp – Abkürzung Wandtyp – Nummer Messung (Reihenfolge); z.B. 4-BV-02 ist das Messobjekt der Gruppe 4 – Backstein verputzt – das als zweites durchgeführt wurde.

Das richtige Platzieren der Sensoren ist sehr wichtig. Viele Einflussfaktoren können die Messresultate verfälschen. Geeignete Messorte sind solche, die so ungestört wie möglich sind. Innen bedeutet dies, dass die Sensoren weit genug entfernt von Lüftungsein- und -auslässen, Sonneneinstrahlung und Radiatoren platziert werden. In der Abbildung 4 sind drei Messgeräte an einer Innenwand befestigt zu sehen.





**Abbildung 4:** Installation 3 Messsensoren innen (Objekt 7-VH-01)

Um mögliche Randeﬀekte zu vermindern ist der Sensor mindestens 50 cm vom Fenster entfernt zu platzieren. Aussen ist der Temperatursensor von Wind, Sonne und Witterung zu schützen. Da von greenTEG kein Schutz für die Sensoren erhältlich ist, wurde für die Messungen in dieser Untersuchung ein einfacher Sonnenschutz entwickelt. Dieser ist in Abbildung 5 zu sehen.



**Abbildung 5:** Installation Messsensor aussen; Nahansicht mit Sonnenschutz-Deckel (Objekt 6-DM-04)

Für beste Resultate sollte der Aussensensor möglichst in einer Linie zu den Innensensoren platziert werden. In der Abbildung 6 sind die Aussentemperatursensoren mit Deckel an einer Wand installiert.





**Abbildung 6:** Installation Messsensoren aussen (Objekt 3-BW-01)

Bei inhomogenen Wandaufbauten sind die Sensoren, wenn immer möglich, zwischen und auf den Holzständern zu platzieren. Mit einer Thermografiekamera können die Holzständer lokalisiert werden.

Der Datenlogger kann Datenpunkte mit Intervallen zwischen 1 Sekunde und 1 Stunde aufnehmen. GreenTEG empfiehlt mit einem Intervall von 10 Minuten zu messen. Die Messungen wurden immer gleich nach dem Einbau der Sensoren gestartet. Die Messungen sollen gemäss greenTEG bei einem Temperaturunterschied aussen/innen von mindestens 5 K stattfinden. Damit dieses Kriterium während der ganzen Messdauer erfüllt ist, wurde in den Wintermonaten gemessen. Alle Messungen erfolgten zwischen Dezember 2015 und April 2016.

## Messablauf

Während der Messung werden die Daten lokal auf dem Datenlogger gespeichert. Nach den ersten 72 Stunden wurden die Datenlogger zum ersten Mal ausgelesen. Bei ungültigen Messungen wurde, wenn möglich, nochmals 24 Stunden gemessen.

Die Daten wurden nach vollendetem Messdurchgang als pdf sowie als Excel-Datei zur weiteren Analyse gespeichert.

## Messobjekte

Die Messobjekte sollten typische Wohnbauten aus verschiedenen Bauepochen umfassen. Die Wandaufbauten sollten ebenfalls typische Konstruktionen enthalten – sowohl leichte als auch massive Konstruktionen wurden untersucht.

Bei der Wahl der Wandtypen war vor allem die Häufigkeit der verwendeten Konstruktionen massgebend. Dabei wurden die Baujahre vor 1985 betrachtet. Mit dieser Begrenzung auf mindestens 30-jährige Wände wollte man sich auf jene Wände konzentrieren, die nun vor der Erneuerung stehen. Somit stellt sich die Frage, ob wärme gedämmt werden soll oder nicht.

Die Tabelle 3 fasst die gewählten Wandtypologien zusammen. Die ersten sechs Wandtypen sind Massivbauten und die letzten drei Holzkonstruktionen.



	Wandkonstruktion	Geplante Anzahl Objekte	Effektive Anzahl gemessene Objekte	Anzahl Messungen pro Objekt	Anzahl Messungen effektiv
1	Bruchstein-Mauer (BM)	4	4	2-4	11
2	Sandstein-Mauer (SM)*	2			
3	Beton-Wand (BW)	2	2	3	6
4	Backstein verputzt (BV)	8	8	2-4	26
5	Backstein mit Zementfaserplatten oder Holz, hinterlüftet (BH)	2	2	3	6
6	Doppelschalen-Mauerwerk (DM)	6	6	2-4	15
7	Vollholz (VH)	3	3	6	14
8	Holz-Rahmenbau hinterlüftet (HH)	6	6	3-6	20
9	Holz Riegelbau (HR)	1	1	5	5
	Summe	34	32		103

**Tabelle 3:** Übersicht der gewählten Wände und der Anzahl Messungen

\*es konnten keine Messobjekte gefunden werden

Diese Wandtypologien wurden zusammen mit der Begleitgruppe festgelegt. Danach wurden Objekte mit entsprechenden Konstruktionen ausgesucht. Dank einer grossen Datenbank an alten GEAK- und Energieberatungsobjekten konnten die meisten Objekte von der hässig sustech (Projektleitung) vorgeschlagen werden. Die Industriepartner brachten ebenfalls einzelne Objekte in die Untersuchung ein. Nur Objekte mit Sandstein-Wänden konnten in der Messperiode, trotz grosser Bemühungen nicht gefunden und daher nicht gemessen werden. Hinterlüftete Backstein-Wände wurden an einem Objekt und für zwei Orientierungen (Ost/West) gemessen.

## Erfahrung Messungen

### Abweichungen zwischen Messgeräten

Am Anfang des Messprojekts wurde davon ausgegangen, dass das greenTEG Messgerät robuste U-Werte liefern kann. Durch mehrere Test-Messungen (an hochwärmedämmten Wänden) wurde dies jedoch in Frage gestellt. Messungen, die an der gleichen Wand, am gleichen Ort, zur gleichen Zeit gemacht wurden, zeigten Unterschiede von bis zu 50% zwischen den Messgeräten auf. Wenn die Messungen später wiederholt oder an anderen Ausrichtungen der gleichen Wand gemacht wurden, wurden weitere Diskrepanzen festgestellt. Ein Teil dieser Diskrepanzen ist sicherlich auf unterschiedliche Randbedingungen bzw. auf zu sammelnde Erfahrungen mit dem Messaufbau zurückzuführen. Ausserdem stellte sich heraus, dass gSKIN vorgängig nicht an einer Wand mit bekanntem U-Wert unter Laborbedingungenvalidiert worden war.



Durch weitere Messungen an verschiedenen Messobjekten wurde festgestellt, dass unterschiedliche Messgeräte auch unter unterschiedlichen Messbedingungen ähnliche Abweichungen untereinander aufzeigten. Zum Beispiel hat ein Messgerät (hs.mg 45) immer deutlich höhere Wärmeflüsse im Vergleich zu den anderen Messgeräten an unterschiedlichen Objekten gemessen. Dies hat auf ein Problem mit der Kalibrierung der Messgeräte hingedeutet.

Die greenTEG AG hat ihre Kalibrierungsverfahren überprüft und schliesslich alle Messgeräte neu kalibriert. Für die bereits durchgeführten Messungen konnte ein Korrekturfaktor für die Wärmeflüsse und U-Werte angewendet werden. Es fielen zwei Messgeräte während den ersten Messungen aus und wurden mit neuen ersetzt. Die Messwerte dieser Messgeräte konnten nicht nachkorrigiert werden.

Die neue Kalibrierung hat tatsächlich eine verbesserte Übereinstimmung zwischen den Messgeräten gebracht. Als Beispiel wird die Änderung beim U-Wert beim Objekt 6-DM-05 in der Abbildung 7 gezeigt.

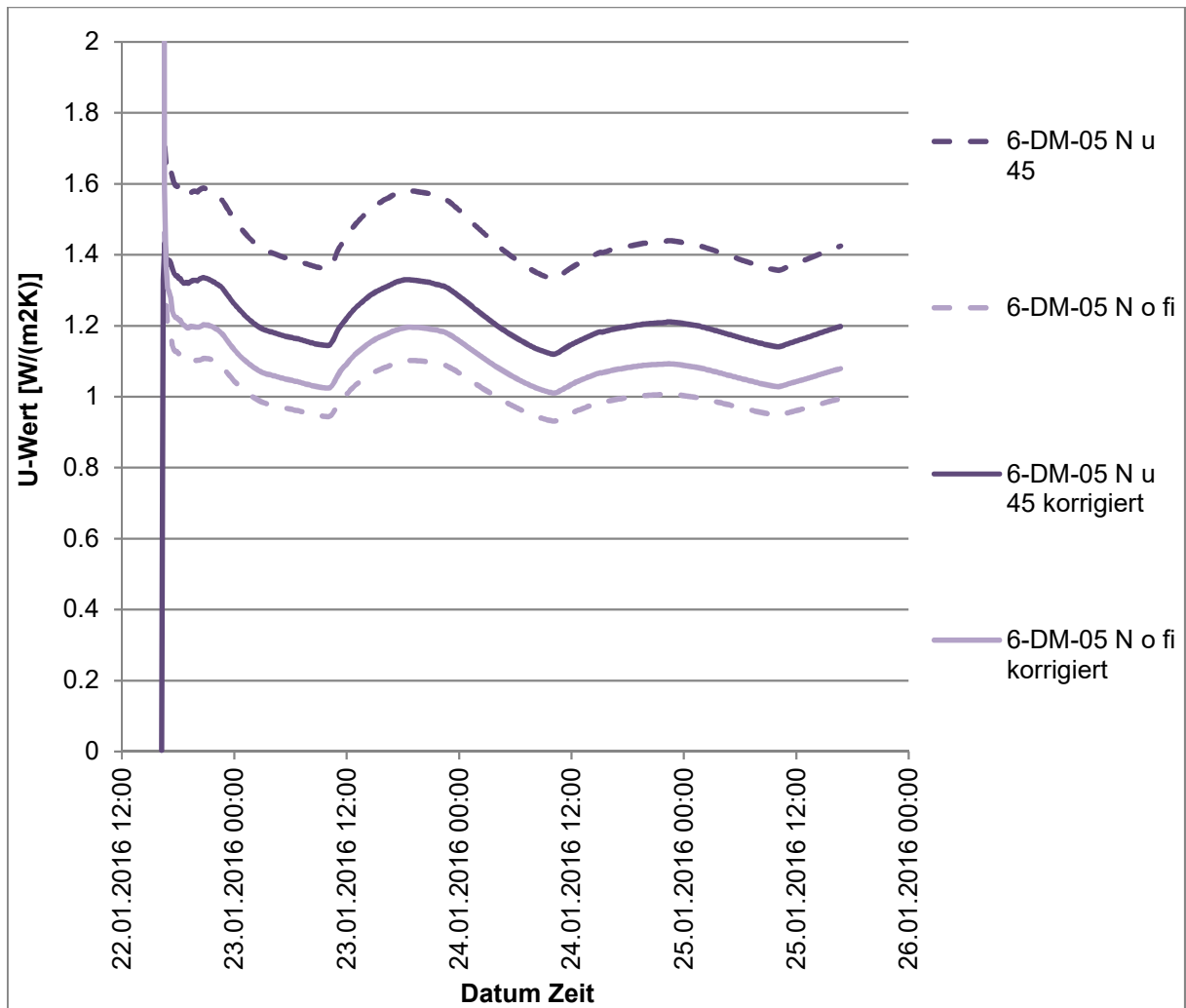


Abbildung 7: Ursprünglich gemessener (gestrichelt) und korrigierter U-Wert für zwei Messgeräte an derselben Wand



Vorher war der Unterschied zwischen den beiden U-Werten ca. 35%. Nach der Korrektur war der Unterschied nur noch bei ca. 10%. Bei anderen Wänden wurden allerdings auch nach der Kalibrierung grössere Abweichungen zwischen den Messgeräten festgestellt. Deswegen wurde für die Untersuchung entschieden, dass immer mehrere Messgeräte an einem Messort installiert werden sollen. Mit dem Mittelwert der Messungen ist es möglich die Unsicherheit zu minimieren.

## Ungültige Messungen (gemäss ISO 9869)

Dank dieses Messprojekts wurden sehr viele Messungen mit dem gSKIN gemacht. Einige Messungen wurden gemäss ISO 9869 als ungültig eingestuft. Das heisst, die Abweichung zwischen gemessenen U-Werten in den letzten 24h waren >5%. Bei insgesamt 10 Objekten wurden ungültige Werte gemessen. Dadurch war es möglich, gewisse Faktoren zu identifizieren, die zu ungültigen Messungen führen können:

- Grosse Innen- und/oder Aussentemperaturschwankungen, vor allem über längere Zeit (mehrere Stunden)
- Negative Wärmeflüsse (Wärmefluss von aussen nach innen infolge hoher Aussentemperaturen), ebenfalls über längere Zeit (mehr als 30 Minuten)
- Tiefe U-Werte (beinahe alle Objekte mit ungültigen Messungen hatten gemessene U-Werte < 1.00 W/(m<sup>2</sup>K))

Das Auftreten einer der obigen Faktoren führte jedoch nicht automatisch zu einer ungültigen Messung. Zum Beispiel wurden manchmal sehr grosse Innentemperaturschwankungen über ganz kurze Zeit (wenige Minuten, z.B. durch Lüften) festgestellt, die nicht zu ungültigen Messungen führten. Normalerweise tragen mehrere Faktoren zu einer ungültigen Messung bei.

Messungen an leichten Konstruktionen waren öfter ungültig als solche an massiven Konstruktionen. Die Gründe dafür werden in späteren Kapiteln erläutert.

Insgesamt haben diese Schwierigkeiten mit den Messgeräten die Untersuchung erheblich erschwert und verzögert. Die Firma greenTEG hat sich aber immer wieder um Problemlösungen bemüht. Trotzdem muss hier festgestellt werden, dass Messungen mit gSKIN einiger Erfahrung und Sorgfalt bedürfen. Selbst dann kann nur mit einer Messgenauigkeit von 20 bis 30% gerechnet werden. Die Autoren dieses Berichts hoffen, dass die Messgeräte im Handling noch verbessert werden.

## Empfehlungen für die Anwendung von gSKIN

Nachfolgend sind einige Empfehlungen für die Nutzer des gSKIN-Messgerätes zusammengefasst.

**Wandkonstruktion:** Allgemein sind leichte Wandkonstruktionen anfälliger auf schwankende Temperaturen als schwere. Schwere Konstruktionen reagieren kaum auf äussere Temperaturschwankungen. Dies führt zu stabileren Wärmeflüssen. Auch werden Räume bei Sonneneinstrahlung weniger stark aufgeheizt, was sich wieder positiv auf die Messstabilität auswirkt. Grundsätzlich heisst dies, dass bei Leichtbauwänden auf die möglichen Temperaturschwankungen besonders zu achten ist. Bei zunehmend gedämmten Wänden ist dieser Effekt gemindert.

**Wetterbedingungen:** Der Messzeitraum soll so ausgewählt werden, wenn das Wetter so stabil wie möglich ist. Das heisst, wenn es keine grossen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht und zwischen den einzelnen Tagen gibt. Zudem soll ein möglichst hoher Temperaturunterschied zwischen innen und aussen herrschen. Wenn immer möglich sollen sonnige Tagen vermieden werden. Muss an sonnigen Tagen gemessen werden, sollten Monate mit den wenigsten Tageslicht-



Stunden (November bis Januar) gewählt werden. Schnee und Regen sollen ebenfalls vermieden werden, da sie die Messung indirekt, z. B. durch das Befeuchten der Bauteile, oder direkt, z.B. durch Befeuchten der Temperatursensoren beeinflussen können.

Der Einfluss von Sonneneinstrahlung und allfälliger Witterung kann durch einen Schutz der Aussentemperatursensoren grösstenteils abgeschirmt werden (z.B. Sonnenschutz wie in Abbildung 5). Wichtig dabei ist, dass der Aussensensor den Deckel nicht berührt, es sich kein Wärmestau bilden kann und der Deckel bei Wind stabil bleibt. Auch mit einem guten Sonnenschutz spürt der Aussentemperatursensor den wärmenden Effekt der Sonne – teilweise durch die wärmere Lufttemperatur und teilweise durch Strahlung von der Wand. Je höher die Aussentemperatur steigt und je leichter die Wandkonstruktion ist, desto eher führt Sonneneinstrahlung zu ungünstigen Messungen. Ebenfalls wird die Messung eher ungünstig, je näher die Sonneneinstrahlung zum Ende des Messzeitraums stattfindet.

Bei ungünstigen Wetterbedingungen besteht die Möglichkeit die Messung weiter laufen zu lassen, bis sich die U-Werte stabilisieren können.

**Innenraum:** Hier sollte ein möglichst gleichmässiges Klima herrschen. Bewohner sind zu instruieren, dass sie die Heizung nicht verstellen und immer eingeschaltet lassen. Temperaturen, die über Nacht wegen der Nachtabenkung der Heizung absinken, sind relativ unproblematisch. Durch den gleitenden Mittelwert wird der U-Wert wenig beeinflusst. Es ist lediglich empfohlen bei starker Nachtabenkung mindestens einen weiteren 24-Stunden Zyklus der 72-Stunden Messdauer anzuknüpfen. Räume, die durch ihre Nutzung stark schwankenden Temperaturen aufzeigen, wie Badzimmer und Küchen, sind zu vermeiden. Praktisch gesehen sollen bei Häusern mit Katzen und Kleinkindern die Messgeräte wegen der vielen langen Kabeln ausser deren Reichweite eingebaut werden. Grundsätzlich ist für eine U-Wert-Messung ein Raum ideal, der selten oder nie benutzt und auf eine konstante Temperatur geheizt wird.

**Lüftungsverhalten:** Korrektes Fensterlüften ist grundsätzlich unproblematisch und daher erlaubt. Grosse Temperaturschwankungen über kurze Zeit, das heisst weniger als 15 Minuten, führen zwar zu stark reduzierten Wärmeflüssen, beeinflussen die Messresultate für den U-Wert aber kaum. Die Messung wird viel mehr beeinflusst durch langzeitiges Lüften mit Kippfenstern (z.B. offene Kippfenster über Nacht in Schlafzimmern). Hier reduziert sich die Innentemperatur in einem Mass, das einen bemerkbaren Einfluss auf die Messung hat. Entsprechend erniedrigt sich der gemessene U-Wert. Entweder müssen die Nutzer instruiert werden, Kippfenster zu schliessen oder es muss ein anderes Zimmer gewählt werden.

**Verdeckte Schwachstellen in der Gebäudehülle:** Es besteht immer die Gefahr bei nicht-destruktiven U-Wert Untersuchungen, dass verdeckte Schwachstellen in der Gebäudehülle anstatt eines „üblichen“ Querschnitts der Wand gemessen werden. Das kann der Fall sein bei inhomogenen Wänden, Wänden mit verdeckten Mängeln (Feuchtigkeit, fehlende oder beschädigte Dämmung, etc.) oder versteckten Leitungen. Diese Schwachstellen sind von aussen her nicht sichtbar, können aber die Messung verfälschen. **Deshalb ist es ratsam, bei Verdacht auf Inhomogenitäten vor dem Platzieren des Messgeräts die Wand mit einer Thermografiekamera zu untersuchen.**

**Messgeräte:** Es ist wichtig, immer mit mehreren Messgeräten am selben Messort zu messen. Diese Redundanz ist nicht nur wegen der Diskrepanzen zwischen den einzelnen Messgeräten wichtig, sondern auch von Vorteil, falls einzelne Messungen aus anderen Gründen nicht brauchbar sind (Ausfall, Beschädigung, etc).



## Ergebnisse und Diskussion Messungen

### Vergleich zwischen Messungen und berechneten bzw. GEAK U-Werten

Die Resultate der Untersuchung sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Sie wurden in drei Gruppen sortiert: (eine weitere Detaillierung der Messwerte findet sich in Anhang 1 und 4)

- „vor 1976“ – Wände vor 1976 erstellt und nicht saniert
- „1976-1985“ – Wände ab 1976 erstellt und nicht saniert
- „saniert“ – sanierte Wände (GEAK U-Wert entsprechend angepasst)

Diese Sortierung entspricht dem wichtigsten „Stichjahr“ des GEAKs und dem Jahr, in dem der Effekt der ersten Energiegesetze bemerkbar wurde (vgl. Abbildung 1). 1976 sind die hinterlegten GEAK-U-Werte für beide Wandtypen um ca. 50% gesunken, weil Aussenwände nicht mehr ohne Dämmung erstellt werden durften.

Zeitperiode	Objekt	Mittelwert gemessener U-Wert pro Wandtyp [W/m <sup>2</sup> K]	Mittelwert Messung U-Wert erstes Objekt [W/m <sup>2</sup> K]	Mittelwert Messung U-Wert zweites Objekt [W/m <sup>2</sup> K]	Mittelwert Messung U-Wert drittes Objekt [W/m <sup>2</sup> K]	Abweichung vom Mittelwert Wandtyp
Vor 1976	Bruchsteinmauerwerk	1.17	1.23	1.06	1.23	-9% bis 5%
	Beton	0.86	0.86	-	-	
	Backstein verputzt	0.68	0.46	0.97	0.62	-32% bis 42%
	Doppelschalenmauerwerk	1.02	0.94	1.21	0.92	-10% bis 18%
	Vollholz	0.65	0.65	-	-	
	Holz hinterlüftet	0.71	0.38	1.04	-	-46% bis 46%
1976-1985	Backstein verputzt	0.43	0.44	0.43	-	-1% bis 1%
	Doppelschalenmauerwerk	0.42	0.31	0.52	-	-25% bis 25%
	Holz hinterlüftet	0.46	0.25	0.66	-	-45% bis 45%



Saniert 1990	Beton	0.56	0.56	-	-	
Saniert 1985	Backstein ver- putzt	0.59	0.59	-	-	
Saniert 1979	Holz-Riegel	0.76	0.76	-	-	

**Tabelle 4:** Messresultate zu den U-Werten (mit gSKIN an verschiedenen Objekten gemessen)

Tabelle 4 zeigt die Mittelwerte der gemessenen U-Werte für die verschiedenen Wandtypen und Kategorien sowie deren Streuung. Es gab nicht bei allen Wandtypen mehrere gültige Messobjekte. Der angeführte Messwert entstand jedoch immer durch mehrere Messungen am jeweiligen Objekt. In der Abbildung 8 werden die Messwerte grafisch zusammen mit dem entsprechenden GEAK U-Werten dargestellt.

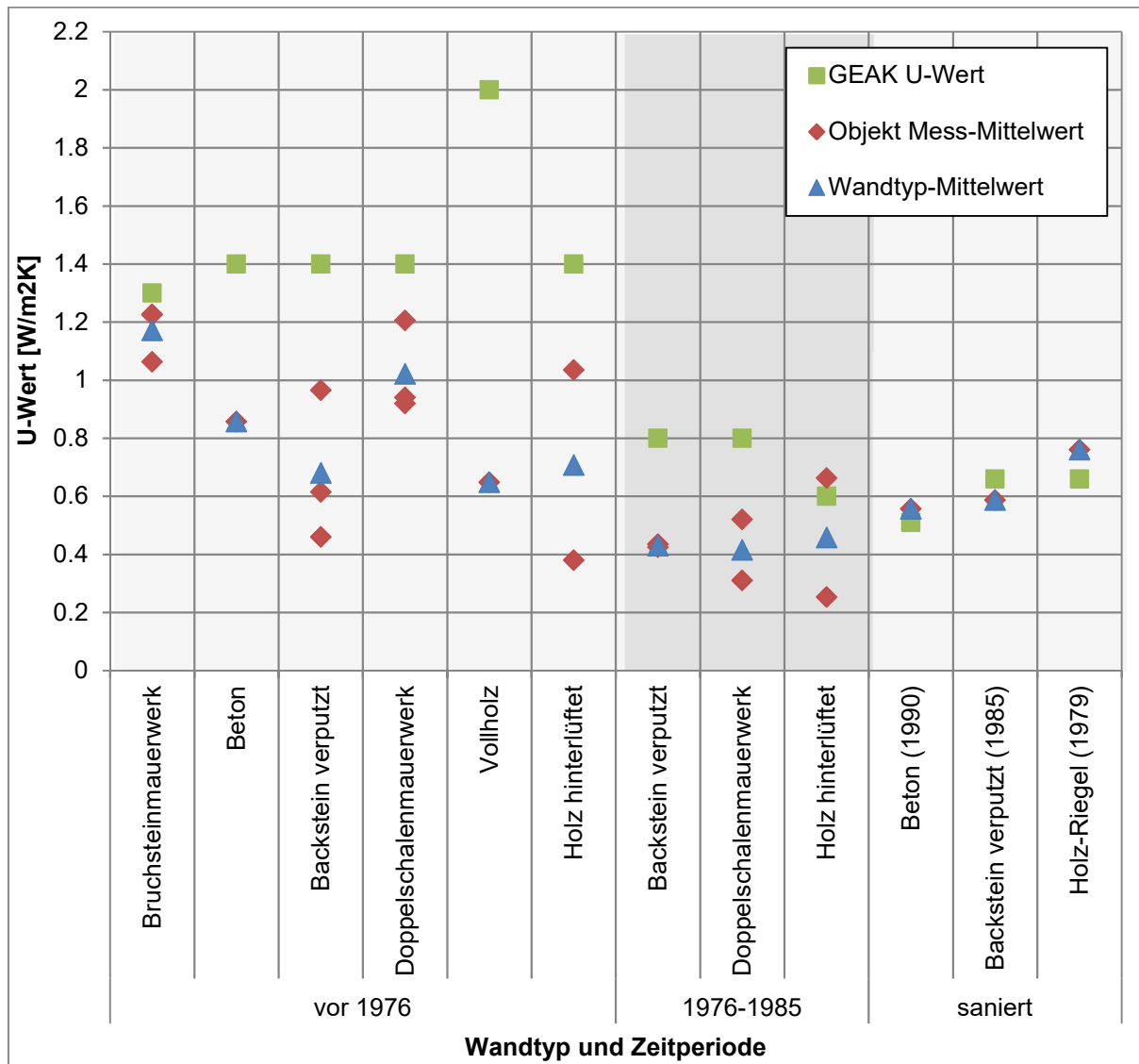


Abbildung 8: Die U-Wert Messungen im Vergleich zu den GEAK U-Werten für verschiedene Wandkonstruktionen

Aus der Abbildung 8 ist ersichtlich, dass die gemessenen Werte der Bauten vor 1985 durchaus tiefer liegen als die GEAK U-Werte. Dies hängt wohl damit zusammen, dass das GEAK-Tool die U-Werte nur wenig differenziert und grundsätzlich eher hohe Werte vorschlägt. (Im Rahmen der GEAK-Erarbeitung soll der Energieberater ohnehin die GEAK-U-Werte hinterfragen, verifizieren und dann entsprechend abändern).

Bei den sanierten Wänden wurde nur ein Objekt gemessen. Der im GEAK-Erfassungs-Tool berechnete U-Wert für die sanierte Wand stimmt gut mit dem gemessenen U-Wert überein.

Die gemessenen U-Werte der verschiedenen Wandtypen wurden ebenfalls mit den berechneten U-Werten verglichen. Die Tabelle 5 zeigt die Resultate für die verschiedenen Wandtypen und Kategorien auf und vergleicht die Abweichungen zwischen den gemessenen und den GEAK- resp. berechneten U-Werten.





Zeit- periode	Objekt	Wandtyp- Mittelwert [W/m <sup>2</sup> K]	GEAK U- Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Abweichung GEAK U- Wert zu Wandtyp- Mittelwert gemessen	berechneter U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Abweichung berechneter U-Wert zu Wandtyp- Mittelwert gemessen
Vor 1976	Bruchstein- mauerwerk	<b>1.17</b>	1.30	+11%	2.26	+93%
	Bruchstein- mauerwerk BFE <sup>1)</sup>	<b>1.17</b>	1.30	+11%	0.90	-23%
	Beton	<b>0.86</b>	1.40	+63%	1.51	+76%
	Backstein verputzt	<b>0.68</b>	1.40	+106%	0.90	+32%
	Doppelschalen- mauerwerk	<b>1.02</b>	1.40	+37%	0.98	-4%
	Vollholz	<b>0.65</b>	2.00	+208%	0.62	-4%
	Holz hinterlüftet	<b>0.71</b>	1.40	+98%	0.72	+1%
1976- 1985	Backstein verputzt	<b>0.43</b>	0.80	+86%	0.44	+1%
	Doppelschalen- mauerwerk	<b>0.42</b>	0.80	+93%	0.35	-17%
	Holz hinterlüftet	<b>0.46</b>	0.60	+31%	0.35	-25%
Saniert 1990	Beton	<b>0.56</b>	0.51	-8%	0.52	-7%
Saniert 1985	Backstein verputzt	<b>0.59</b>	0.66	+13%	0.32	-45%
Saniert 1979	Holz-Riegel	<b>0.76</b>	0.66	-13%	0.59	-23%

**Tabelle 5:** Vergleich der Messresultate zu berechneten und GEAK U-Werten

1) U-Wert Vorschlag für Bruchsteinmauerwerk-Wände vom Bauteilkatalog vom BFE anstatt mit SIA 279 λ-Werte

Allgemein stimmen die berechneten U-Werte wie erwartet besser mit den gemessenen überein als mit den GEAK U-Werten. Die Abweichungen sind zusätzlich in Abbildung dargestellt. Die 0%-Achse bildet den gemessenen U-Wert ab.

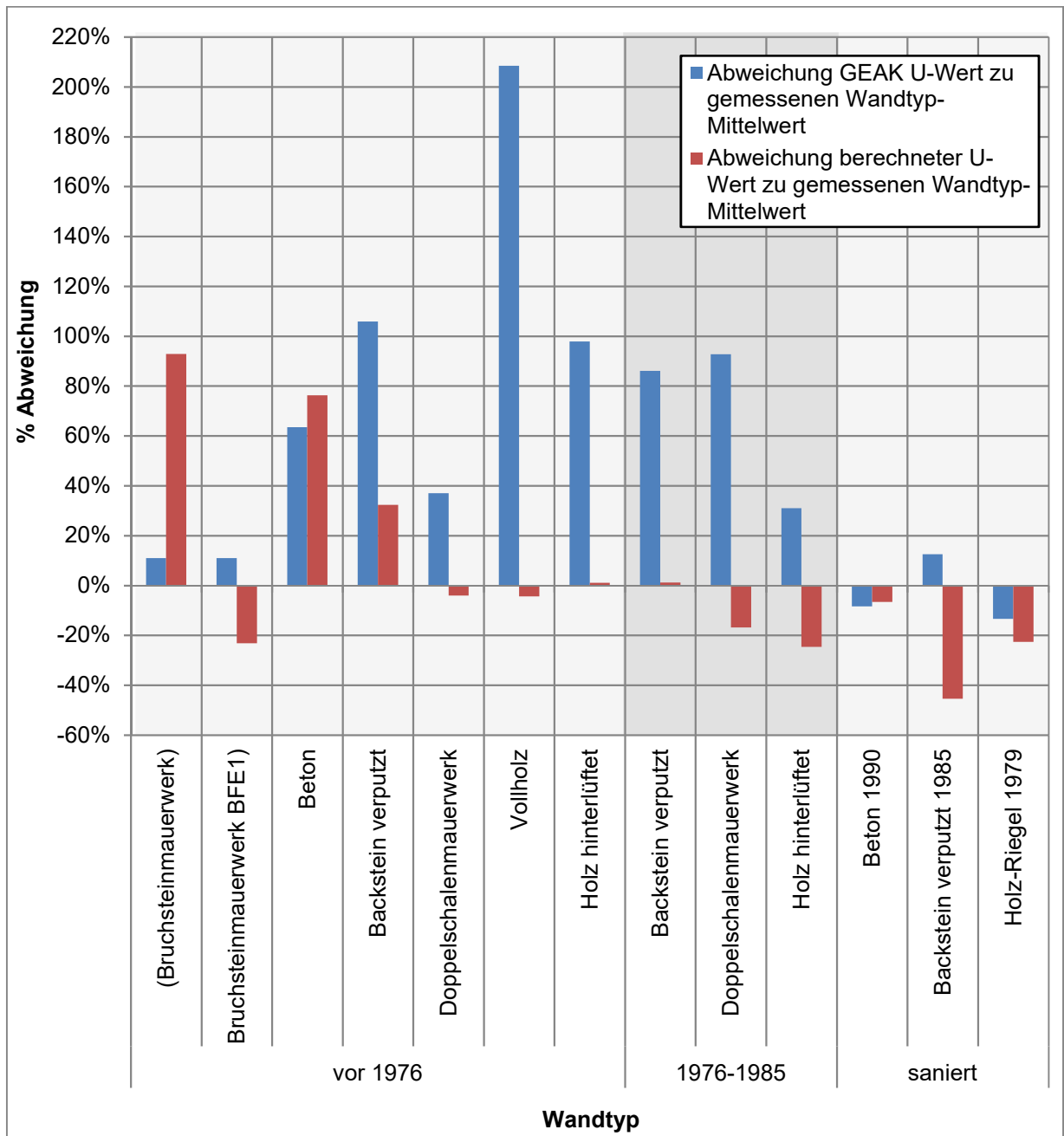


Abbildung 9 Prozentuale Abweichung von GEAK- bzw. berechneten U-Werten zu gemessenen U-Werten

Hier ist nochmals deutlich zu sehen, wie die berechneten U-Werte eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen U-Werten als die GEAK U-Werte haben.



## Abweichungen und mögliche Erklärungen

Was in Tabelle 5 als erstes auffällt, sind einige sehr hohe Abweichungen zum gemessenen U-Wert. Das gilt sowohl beim Vergleich zwischen berechnetem und gemessenem U-Wert wie auch zwischen GEAK- und gemessenem U-Wert. Allerdings ist die Abweichung der berechneten zu den gemessenen U-Werten allgemein geringer als die Abweichung zu den GEAK-U-Werten. Bei vielen Wandtypen liegt die Abweichung deutlich innerhalb des  $\pm 20\%$  Bereichs, der gemäss ISO 9869 als Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem U-Wert gilt. (Die ISO Norm geht davon aus, dass Schwankungen lediglich wetterbedingt sind).

Nur sehr wenige berechnete U-Werte liegen im Vergleich zum gemessenen U-Wert innerhalb des Genauigkeitsbereichs des Sensors von  $\pm 3\%$  (Angabe Hersteller). Dies liegt wohl daran, dass dieser Genauigkeitsbereich für Labormessungen gilt und auch Toleranzbereiche anderer Komponenten dazu kommen. Es gibt von greenTEG keine Information zur Genauigkeit von in-situ Messungen.

Die GEAK U-Werte sind sehr grob geschätzte U-Werte, die den spezifischen Wandaufbau nicht berücksichtigen. In der Regel sind die GEAK U-Werte auch deutlich höher als die gemessenen U-Werte. Die Autoren können aus ihrer Erfahrung mit dem Erfassen von vielen GEAKs bestätigen, dass der vom GEAK berechnete  $Q_h$  in der Regel deutlich höher ausfällt als der mittlere, effektiv gemessene Jahresenergieverbrauch. Das kann viele Gründe haben. Die Resultate dieser Untersuchung lassen vermuten, dass die gemäss GEAK zu hoch eingesetzten U-Werte ein Grund für die hohen Energieverbräuche sein könnten.

Einzig bei den Bruchstein- und Beton-Wänden stimmte der gemessene U-Wert besser mit dem GEAK U-Wert überein als mit dem berechneten. Grund dafür ist, dass diese Wände in die GEAK-Kategorie „schwer“ fallen und somit den gleichen U-Wert wie einschalige oder doppelschalige Mauerwerkskonstruktionen erhalten. Der  $\lambda$ -Wert für Bruchstein und Beton (3.0-2.3 W/(mK)) ist aber deutlich höher als der für Mauerwerksprodukte (1.0-0.45 W/(mK)). Der resultierende U-Wert im GEAK befindet sich offenbar irgendwo dazwischen und führt so zu dieser Diskrepanz. Es wäre also von Vorteil, wenn „schwere“ Wandkonstruktionen weiter in Mauerwerk und Beton/Naturstein unterschieden würden. Die grösste Diskrepanz zwischen gemessenem und GEAK U-Wert war bei der Vollholz-Wand. Dies liegt daran, dass der hinterlegte GEAK U-Wert sehr hoch ist (2.00 W/(m<sup>2</sup>K)). Unter den anderen Wandtypen waren Wände mit Dämmung dabei. Diese Wände reduzieren den Mittelwert der gemessenen U-Werte und führen so zu hohen Abweichungen zum GEAK U-Wert, der wohl ohne Dämmung bestimmt wurde.

Die Diskrepanzen zwischen gemessenen und GEAK U-Werten waren bei den Wänden mit Baujahr zwischen 1976-1985 besonders hoch. Die GEAK-U-Werte dieser Baujahre entsprechen in etwa den U-Werten, welche in den ersten Energiegesetzen verlangt wurden. Somit wäre zu erwarten, dass diese relativ gut mit den gemessenen U-Werten übereinstimmen würden. Dies ist nicht der Fall. Ein Grund könnte sein, dass Bauherren die geforderten U-Werte mit ein wenig Sicherheit einhalten wollten und daher mehr Dämmung eingebaut hatten als gefordert. Die Tatsache, dass die berechneten und gemessenen U-Werte sehr gut übereinstimmen, unterstützt die These, dass die U-Werte effektiv deutlich besser (d.h. tiefer) als die GEAK-Werte sind. Um genauere Schlüsse ziehen zu können, wären aber gerade in dieser Kategorie deutlich mehr Messungen erforderlich.

Die grösste Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten sowie GEAK U-Werten wäre bei den sanierten Wänden zu erwarten gewesen. Für die Berechnung waren nämlich meistens gute Unterlagen vorhanden. Beim GEAK wurde der U-Wert im Online GEAK-Tool mit der eingebauten Dämmstärke neu gerechnet. Bei der sanierten Beton-Wand und der Holz-Riegel-Wand war die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten sowie GEAK U-Werten relativ gut. Bei der



Backsteinwand war die Übereinstimmung beim berechneten U-Wert weniger gut (-40%). Da die nachträglich angebrachte Dämmung den grössten Einfluss auf den U-Wert hat, ist es gut möglich, dass die Abweichungen auf Diskrepanzen in den  $\lambda$ -Werten der Dämmungen zurückzuführen sind (evtl. Alterungseffekte?).

Grundsätzlich war die Übereinstimmung vom berechneten U-Wert zum gemessenen besser bei den Bauten zwischen 1976 und 1985 als bei den Bauten vor 1976.

Allgemein wurde deutlich, dass ein berechneter U-Wert näher an den gemessenen U-Wert herankommt als der GEAK-U-Wert. Das ist den GEAK-Entwicklern auch bewusst. Deshalb empfehlen sie ihren GEAK-Experten, wenn immer möglich, den U-Wert im Einzelfall zu berechnen und den GEAK-U-Wert nur zu verwenden, wenn sonst keine Unterlagen vorhanden sind.

## Vergleich detailliert pro Wandtyp

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Messergebnisse pro Wandtyp genauer beurteilt. Obwohl nicht verlangt (keine Energievorschriften), haben Bauherren auch vor dem Jahr 1976 ihre Wände gedämmt. Solche Wände wurden in dieser Untersuchung auch gemessen. In den nachfolgenden Tabellen sind gedämmte Wände mit Baujahr vor 1976 mit einem \*\* gekennzeichnet.

### Bruchstein-Mauerwerk

Es wurden insgesamt vier Bruchstein-Mauerwerk-Wände gemessen. Eine davon konnte nicht genutzt werden. Die gemessenen, berechneten und GEAK-U-Werte sind in der Abbildung 10 dargestellt.

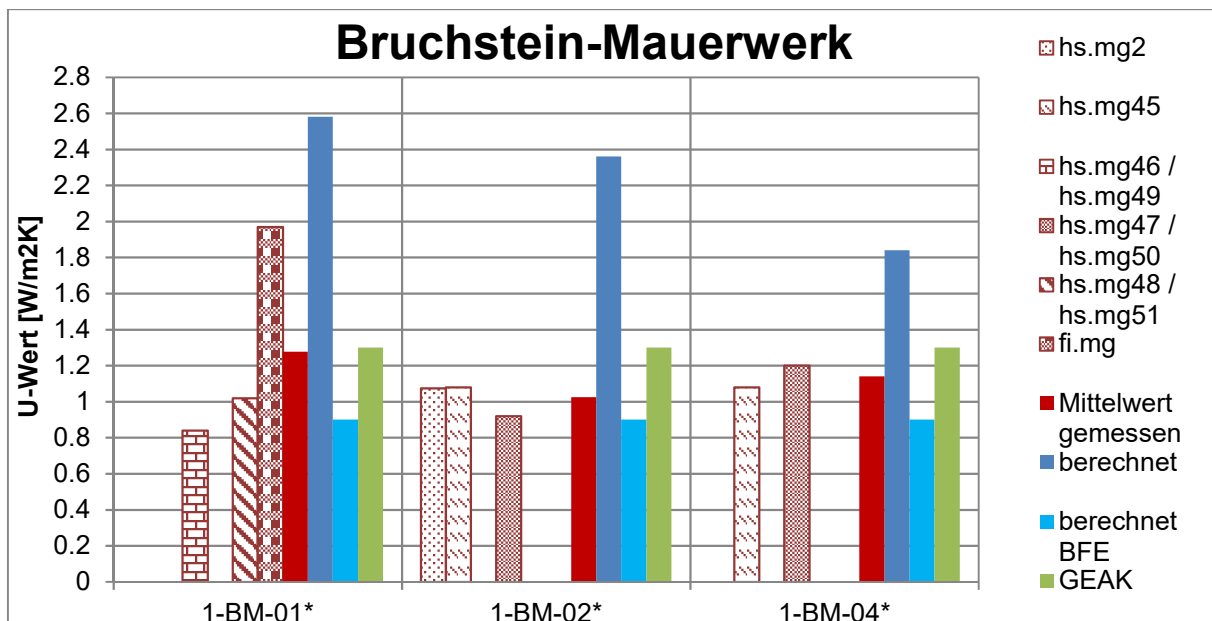


Abbildung 10: Vergleich U-Werte von einzelnen Messgeräten, gemessener mittlerer U-Wert, berechneter U-Wert und GEAK-hinterlegter U-Wert für Bruchstein-Mauerwerk-Wände (\*=vor 1976)



Auffallend in der Abbildung 10 ist, dass der berechnete U-Wert in allen Fällen nicht nur höher als der gemessene U-Wert liegt, sondern ebenfalls höher als der GEAK-U-Wert. Teilweise ist dieser U-Wert massiv höher als der gemessene U-Wert.

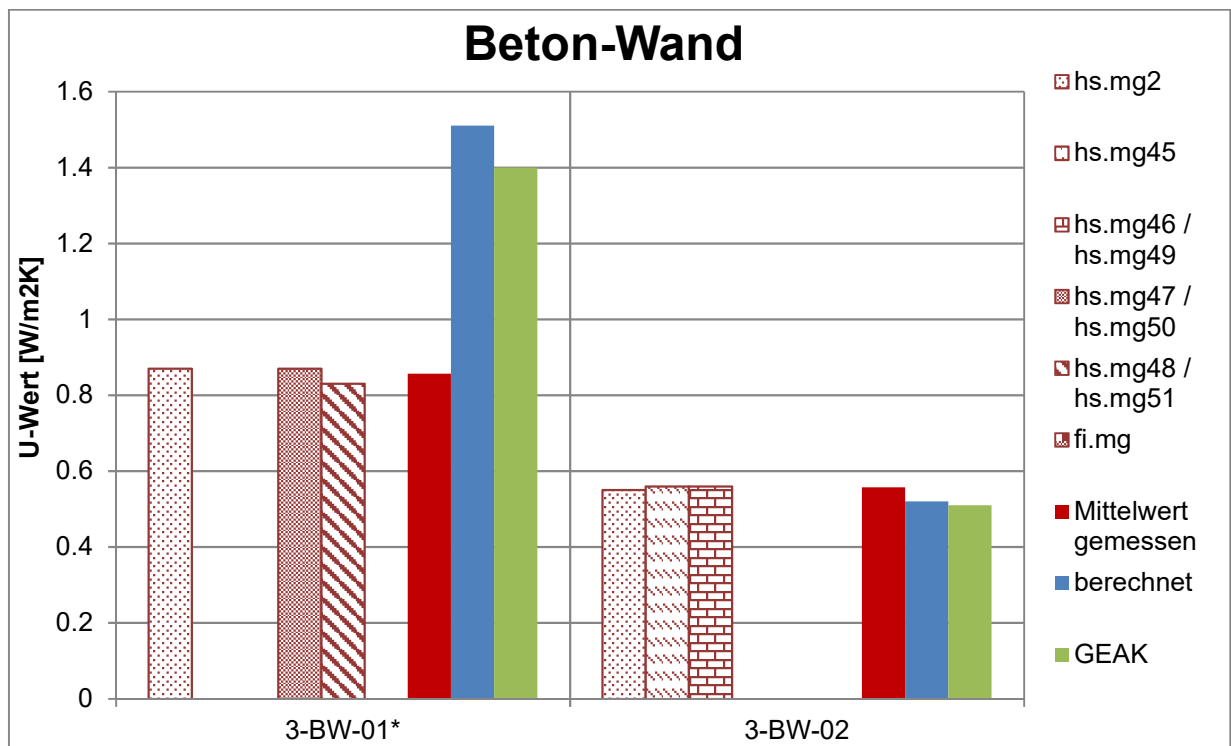
Ein derart grosser und bei mehreren verschiedenen Wänden vorkommender Unterschied deutet auf etwas mehr als nur eine nicht exakte Messung der Wandstärke oder falsche Einschätzung des Verputz-Anteils hin. Viel eher deutet es auf einen zu hohen  $\lambda$ -Wert für Bruchstein hin. Diese Vermutung wird auch durch den Bauteilkatalog des BFE nahegelegt, in dem ein U-Wert für eine ungedämmte Bruchsteinwand angegeben wird, der mit dem SIA-deklarierten  $\lambda$ -Wert nicht erreichbar ist. Weitere Details dazu sind im Anhang 2 zu finden.

## Sandstein-Mauerwerk

Leider konnte dieser Wandtyp nicht gemessen werden, da keine Anfragen zu Messobjekten beantwortet oder zugesagt wurden.

## Betonwände

Insgesamt wurden zwei Beton-Wände gemessen. Eine war noch im ursprünglichen, ungedämmten Zustand (gemäss Planunterlagen) und die andere wurde Mitte 90er Jahre saniert. Die Abbildung 11 zeigt die einzelnen Messpunkte, den Mittelwert daraus sowie den berechneten und GEAK-U-Wert zum Vergleich.



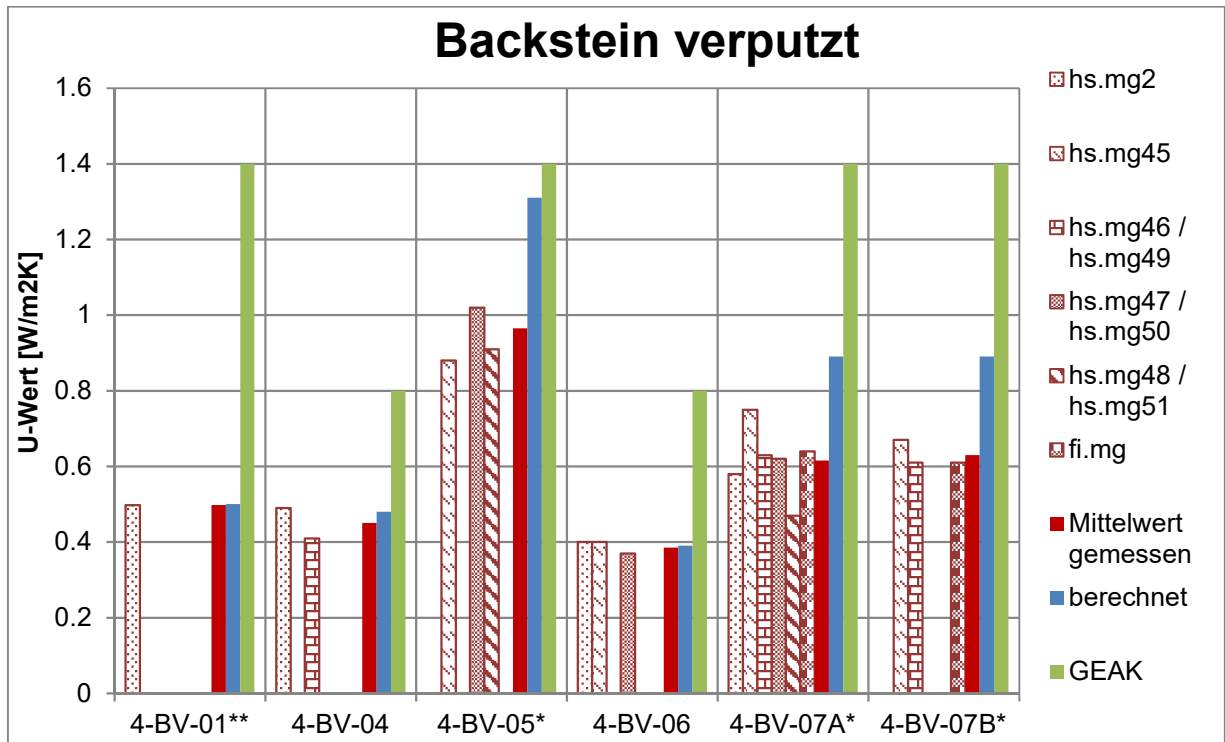
**Abbildung 11:** Vergleich U-Werte von einzelnen Messgeräten, gemessener mittlerer U-Wert, berechneter U-Wert und GEAK-hinterlegter U-Wert für Beton-Wände (\*=vor 1976)

Die Wand 3-BW-01 war gemäss Plänen ungedämmt. Aufgrund der grossen Diskrepanz zwischen dem berechneten und gemessenen U-Wert wurde dies allerdings bezweifelt. Diese Wand besteht gemäss Plänen aus 20 cm Beton mit einer Vormauerung innen von 9 cm. Die inneren und äusseren Oberflächen waren verputzt. Eine Nachmessung der Wandstärke vor Ort und Anklopfen auf beiden Seiten hat auf keine zusätzlich angebrachte Dämmung hingedeutet. Die einzige mögliche Erklärung wäre eine ca. 2 cm starke Dämmschicht zwischen der Wand und der Vormauerung, die nicht in den Plänen eingezeichnet wurde. Mit diesen 2 cm Dämmung zwischen den Schichten stimmt der berechnete U-Wert, mit 0.98 W/m<sup>2</sup>K, viel besser mit dem gemessenen mittleren U-Wert von 0.86 W/m<sup>2</sup>K überein.

Die Wand 3-BW-02 hat überall eine gute Übereinstimmung gezeigt, weil die Bewohner die Sanierungsmassnahmen ziemlich genau beschreiben konnten, da sie erst 20 Jahre zurücklagen.

## Backstein verputzt

Es wurden acht verschiedene, verputzte Backstein-Wände gemessen. Eine der Wände wurde an zwei verschiedenen Zeitpunkten gemessen (4-BV-07A und -B). Eine Messung konnte nicht genutzt werden, weil sie ungültig war. Bei einer Messung hatte der Eigentümer Mitte 80er Jahre innen eine minimale Dämmung angebracht. Die Dämmstärke konnte nicht genau belegt werden. Bei einer dritten Messung wurde während der Trocknung eines neu angebrachten Verputzes gemessen, was einen deutlichen Einfluss auf die Messung hatte. Die Abbildung 12 zeigt die einzelnen Messpunkte sowie den Mittelwert daraus und den berechneten und GEAK-U-Wert zum Vergleich.



**Abbildung 12:** Vergleich U-Werte von einzelnen Messgeräten, gemessener mittlerer U-Wert, berechneter U-Wert und GEAK-hinterlegter U-Wert für Backstein-Wände (\*=vor 1976; \*\*=vor 1976 und gedämmt)

Bei den Backsteinwänden waren die GEAK-U-Werte alle höher als die gemessenen und berechneten U-Werte.

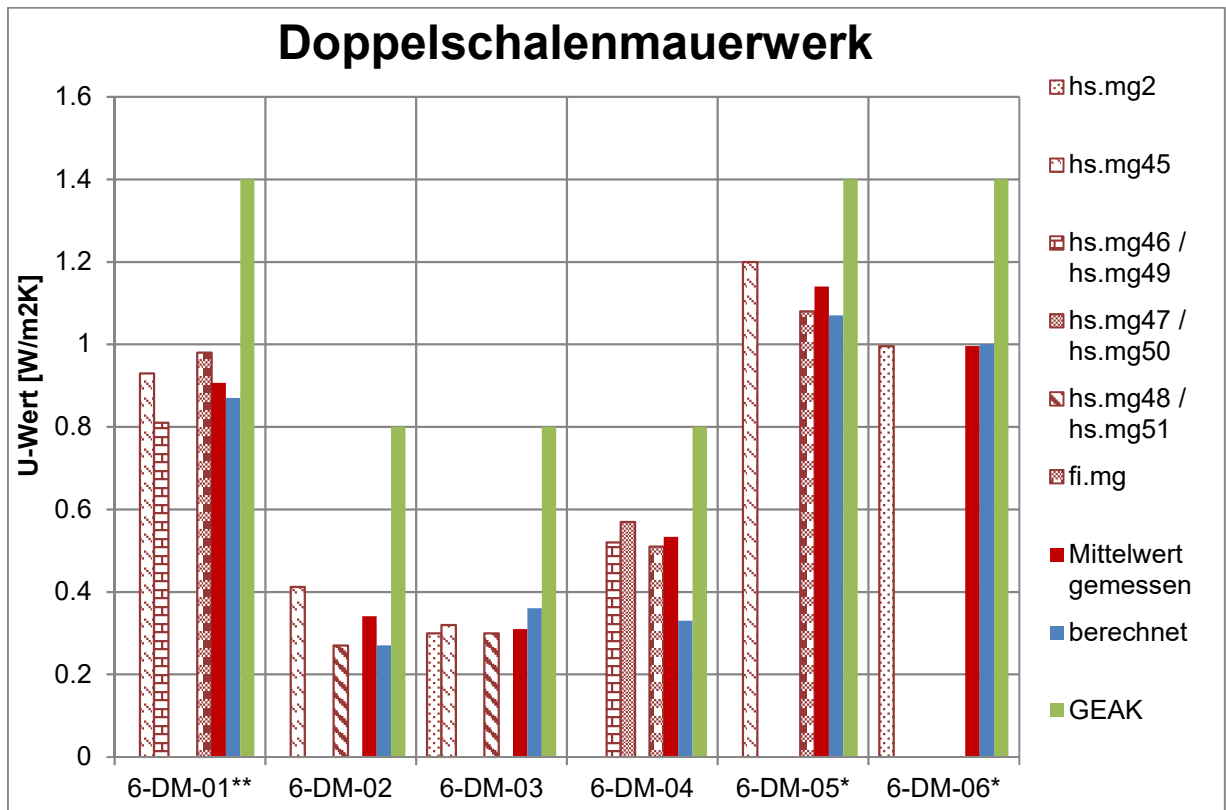
Hier zeigte sich allgemein eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen U-Werten. Bei allen Objekten war der gemessene U-Wert tiefer als der berechnete – am deutlichsten war dies aber bei den ungedämmten Wänden der Fall. Das deutet erneut, wie bei den Bruchstein-Wänden, auf einen möglicherweise zu hohen  $\lambda$ -Wert bei Backstein-Wänden hin.

## Backstein hinterlüftet

Da beide Messungen der hinterlüfteten Backstein-Wände (wetterbedingt) ungültig waren, können hier keine Resultate aufgeführt werden.

## Doppelschalen-Mauerwerk

Es wurden sechs Doppelschalen-Mauerwerkswände gemessen. Davon konnte nur eine nicht verwendet werden, da sie ungültig war. Die Abbildung 13 zeigt die einzelnen Messpunkte sowie den Mittelwert daraus und den berechneten und GEAK-U-Wert zum Vergleich.



**Abbildung 13:** Vergleich U-Werte von einzelnen Messgeräten, gemessener mittlerer U-Wert, berechneter U-Wert und GEAK-hinterlegter U-Wert für Doppelschalen-Mauerwerks-Wände (\*=vor 1976; \*\*=vor 1976 und gedämmt)

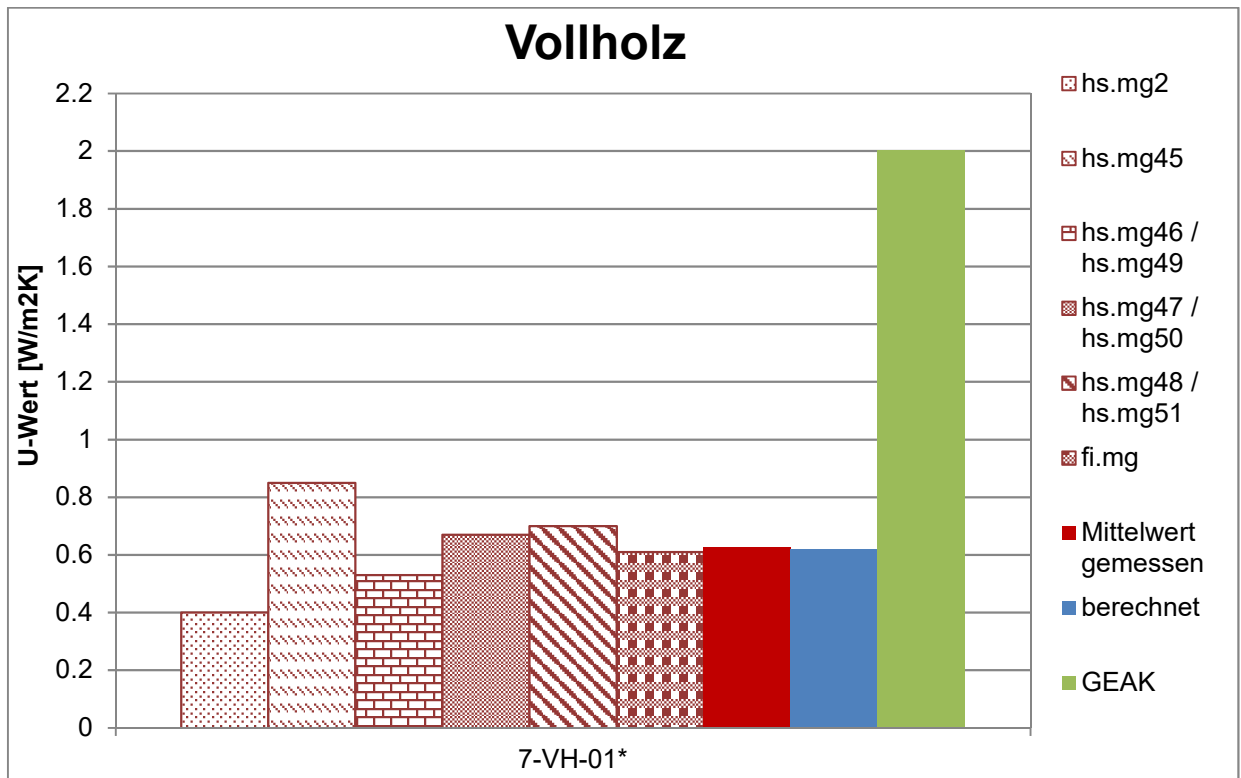
Bei allen Objekten war der GEAK-U-Wert auch hier höher als der berechnete und gemessene U-Wert.

Die Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem U-Wert war bei allen Objekten relativ gut. Einzig beim Objekt 6-DM-04 war der gemessene U-Wert deutlich höher als der berechnete U-Wert. Es gibt verschiedene mögliche Erklärungen: die Dämmung hatte einen deutlich schlechteren  $\lambda$ -Wert als angenommen, wurde lückenhaft verlegt, zeigt nun Alterserscheinungen oder wurde beschädigt.

## Vollholzwand

Insgesamt wurden drei Vollholz-Wände (Strickbauten) gemessen. Zwei der Messungen konnten nicht verwendet werden. Eine war ungültig und bei der anderen war die Wand undicht und daher die Messung verfälscht. Die Abbildung 14 zeigt die einzelnen Messpunkte sowie den Mittelwert sowie den berechneten und den GEAK-U-Wert zum Vergleich.





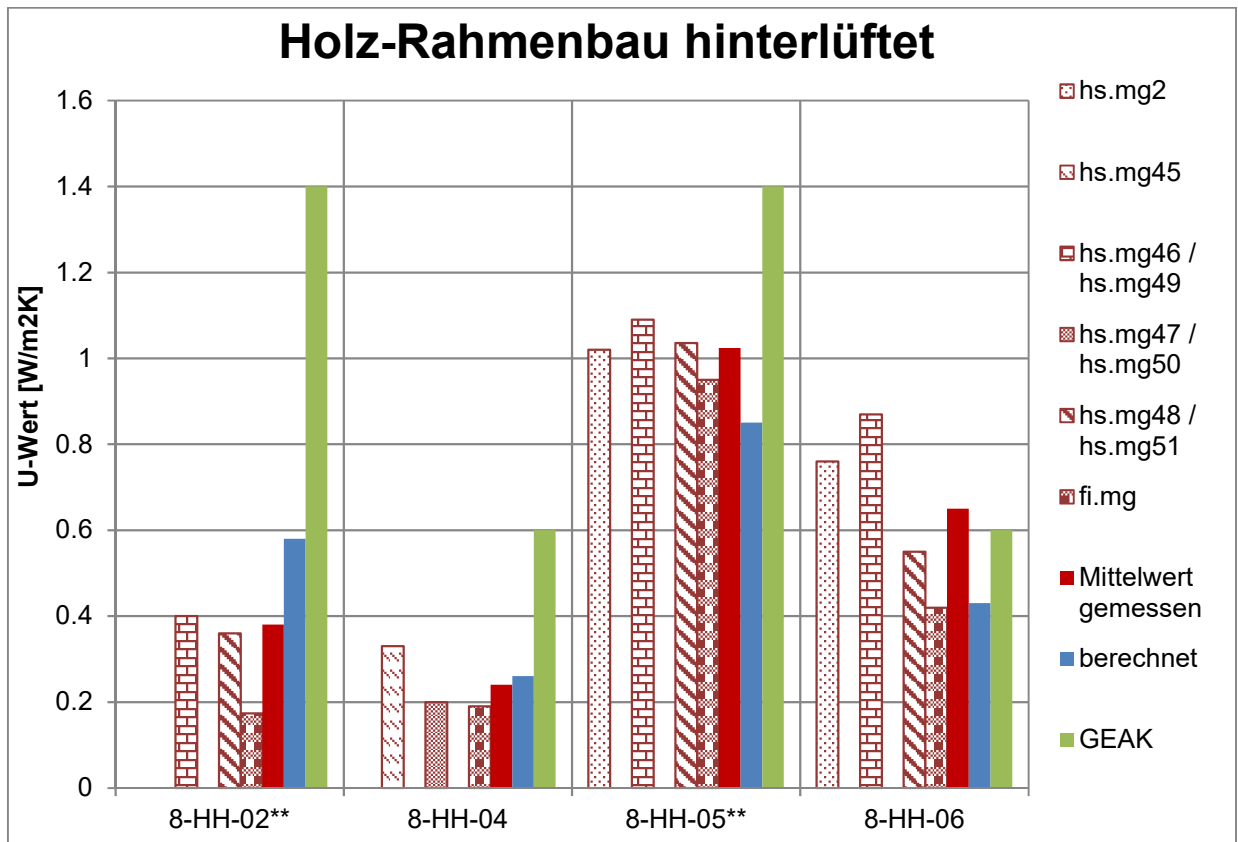
**Abbildung 14:** Vergleich U-Werte von einzelnen Messgeräten, gemessener mittlerer U-Wert, berechneter U-Wert und GEAK-hinterlegter U-Wert für Vollholz-Wände (\*=vor 1976)

Der GEAK-U-Wert ist in diesem Fall viel höher als der berechnete und gemessene U-Wert.

Der Mittelwert der gemessenen U-Werte stimmt sehr gut mit dem berechneten U-Wert überein.

## Holz-Rahmenbau

Insgesamt wurden sechs Holz-Rahmenbau-Wände gemessen. Zwei davon waren ungültig, bei einer weiteren war eines der Messgeräte kurz vor oder während der Messung defekt. Die anderen Messpunkte an der Wand konnten allerdings genutzt werden. Die Abbildung 15 zeigt die einzelnen Messpunkte sowie den Mittelwert daraus und den berechneten und GEAK-U-Wert zum Vergleich.



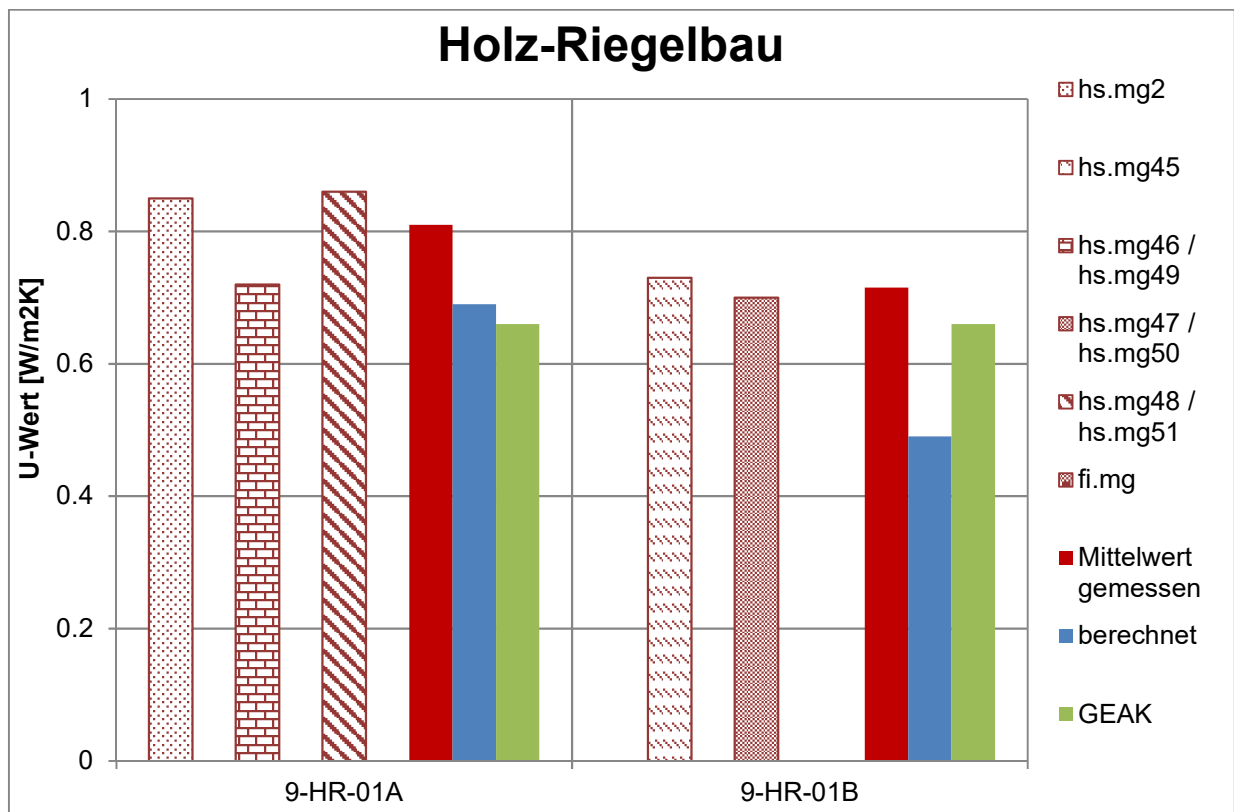
**Abbildung 15:** Vergleich U-Werte von einzelnen Messgeräten, gemessener mittlerer U-Wert, berechneter U-Wert und GEAK-hinterlegter U-Wert für hinterlüftete Holz-Rahmenbau-Wände (\*=vor 1976; \*\*=vor 1976 und gedämmt)

Bei den inhomogenen Wänden war die Übereinstimmung zwischen GEAK-U-Werten und übrigen U-Werte sehr unterschiedlich. Bei einem Objekt war der GEAK-U-Wert sogar näher beim gemessenen U-Wert als beim berechneten.

Die berechneten U-Werte waren mal höher, mal tiefer als der gemessene U-Wert. Hier waren alle Wände gedämmt, aber der Zustand der Dämmung und auch die effektiv umgesetzte Dämmstärke konnten nicht genau untersucht werden. Möglicherweise hat dies zu den Diskrepanzen geführt.

## Riegelbau

Es wurde nur eine Holz-Riegel-Wand gemessen. Zwei Messgeräte wurden am Riegel und drei auf dem Fachwerk platziert. Die Abbildung 16 zeigt die einzelnen Messpunkte sowie den Mittelwert daraus und den berechneten und GEAK-U-Wert zum Vergleich. Die Messung 9-HR-01A war auf dem Fachwerk und die Messung 9-HR-01B auf dem Riegel.



**Abbildung 16:** Vergleich U-Werte von einzelnen Messgeräten, gemessener mittlerer U-Wert, berechneter U-Wert und GEAK-hinterlegter U-Wert für Holz-Riegelbau-Wände

Der Holz-Riegelbau bildet die einzige Ausnahme aller Wände. Hier ist der GEAK-U-Wert tiefer als der gemessene.

Der Riegelbau hat laut Gebäudeeigentümer ein gemauertes Fachwerk. Dieses war unter der dicken Putzschicht aussen und der verkleideten Innendämmung nicht sichtbar. Es scheint jedoch plausibel, dass es sich um Mauerwerk handelt, da der U-Wert beim Fachwerk (9-HR-01A) höher ist als beim Riegel (9-HR-01B). Mauerwerk hat eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Holz, also ist zu erwarten, dass der U-Wert für die gleiche Wandstärke höher wäre; was durch die Messung bestätigt ist.

## Fazit

Die GEAK-U-Werte sind 11 bis 200% höher als die gemessenen U-Werte. Die Autoren kommen daher zum Schluss, dass diese U-Werte reduziert werden sollen. So werden diese besser der Realität entsprechen.

In mehreren Fällen waren die grössten Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten U-Werten bei gedämmten Konstruktionen zu finden. Einzig bei den monolithischen, homogenen Wandtypen war dies nicht der Fall. Wenn ein einziges massives Material (d.h. kein dämmendes Material) die U-Wert-Berechnung dominiert, werden die U-Werte zu hoch eingeschätzt.

Möglicherweise liegt dies an einer konservativen Wahl der  $\lambda$ -Werten bei diesen Materialien in der SIA 279.



## Ergebnisse und Diskussion dynamische Effekte

U-Wert-Messungen mit gSKIN sind grundsätzlich dynamisch, d.h. zeitabhängig, da sich sowohl Aussen- wie Innentemperatur laufend ändern und diese Schwankungen einen Einfluss auf den Wärmefluss haben.

Der U-Wert wird bei gSKIN-Messungen gemäss untenstehender Formel gebildet:

$$U = \frac{\varphi}{T_i - T_a}$$

mit

$U$ : Wärmedurchgangskoeffizient [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

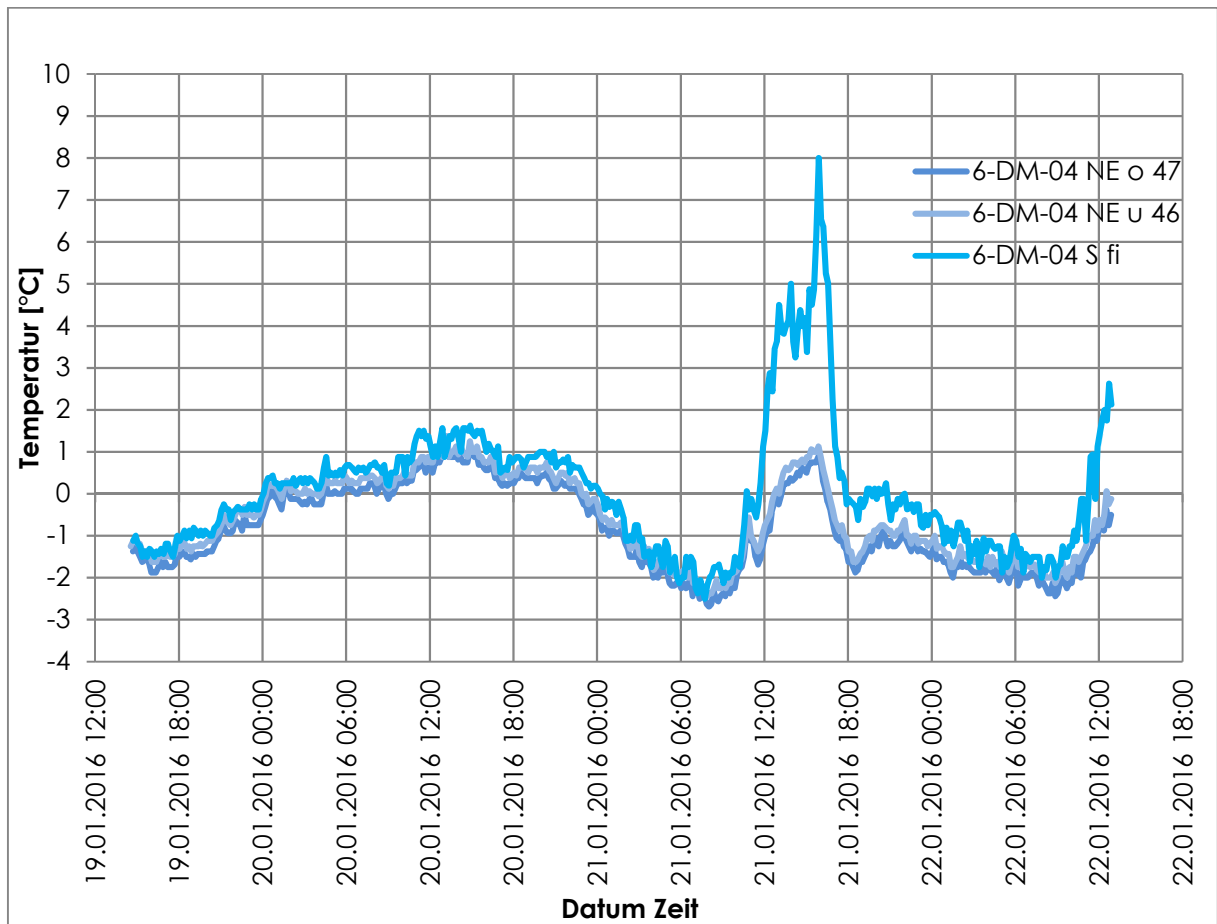
$\varphi$ : Mittelwert aller gemessenen Wärmeflussmesspunkte [ $W/m^2$ ]

$T_i$ : Innentemperatur [ $^{\circ}C$ ]

$T_a$ : Aussentemperatur [ $^{\circ}C$ ]

Die vorliegende Untersuchung soll dazu genutzt werden, um möglichst auch über diese dynamischen Effekte eine Aussage machen zu können. Hierfür werden die Wärmeflusskurven über die gesamte Messdauer betrachtet. Diese Kurven werden aus der von der gSKIN Software generierten Excel-Datei ausgewertet und zeigen den Verlauf aller Messgrössen: Wärmefluss, Innen- und Aussentemperatur.

Um die dynamische Effekte der Sonneneinstrahlung untersuchen zu können, konnten nur Messungen mit Sonneneinstrahlung während der Messung verwendet werden. Das ist an den Aussentemperaturen gut ersichtlich wie im Beispiel in der Abbildung 17 unten.



**Abbildung 17:** Beispiel Aussentemperaturen mit Sonneneinstrahlung an der Südwannd am 21.01.2016 beim Objekt 6-DM-04

Die Aussentemperaturen an der Nordostseite schwanken zwischen  $-2^{\circ}\text{C}$  und  $2^{\circ}\text{C}$  während der ganzen Messperiode, ebenso die Aussentemperaturen an der Südseite am 19.1. und 20.1. Ab ca. 12:00 am 21.1. erhöhen sich die Aussentemperaturen an der Südseite innert kürzester Zeit bis zu  $4^{\circ}\text{C}$  und schliesslich  $8^{\circ}\text{C}$ , während die Temperaturen an der Nordseite nur bis  $1^{\circ}\text{C}$  ansteigen. Ab 18:00 sinken die Temperaturen an der Südseite wieder fast auf das Niveau der Nordostseite-Temperaturen. Dies zeigt eindeutig, dass am 21.1. von ca. 11:00-18:00 die Sonne auf die Südfassade schien. Um die dynamische Effekte dieser Sonneneinstrahlung an der Südwannd zu untersuchen, sind daher die Wärmeflüsse in dieser Zeit von Interesse.

In der Tabelle 6 sind die für die dynamische Untersuchung relevanten Objekte mit Angaben zur Anzahl Messgeräte pro Wandausrichtung aufgeführt.



Objekt	Anzahl Messgeräte pro Wandausrichtung				Dynamisches Verhalten
	N, NE, NW	E	S, SE, SW	W	
5-BH-01		3		3	massiv
6-DM-03	2		1		
6-DM-04	2		1		
7-VH-01	3		3		
8-HH-01			3		leicht
8-HH-03			2		

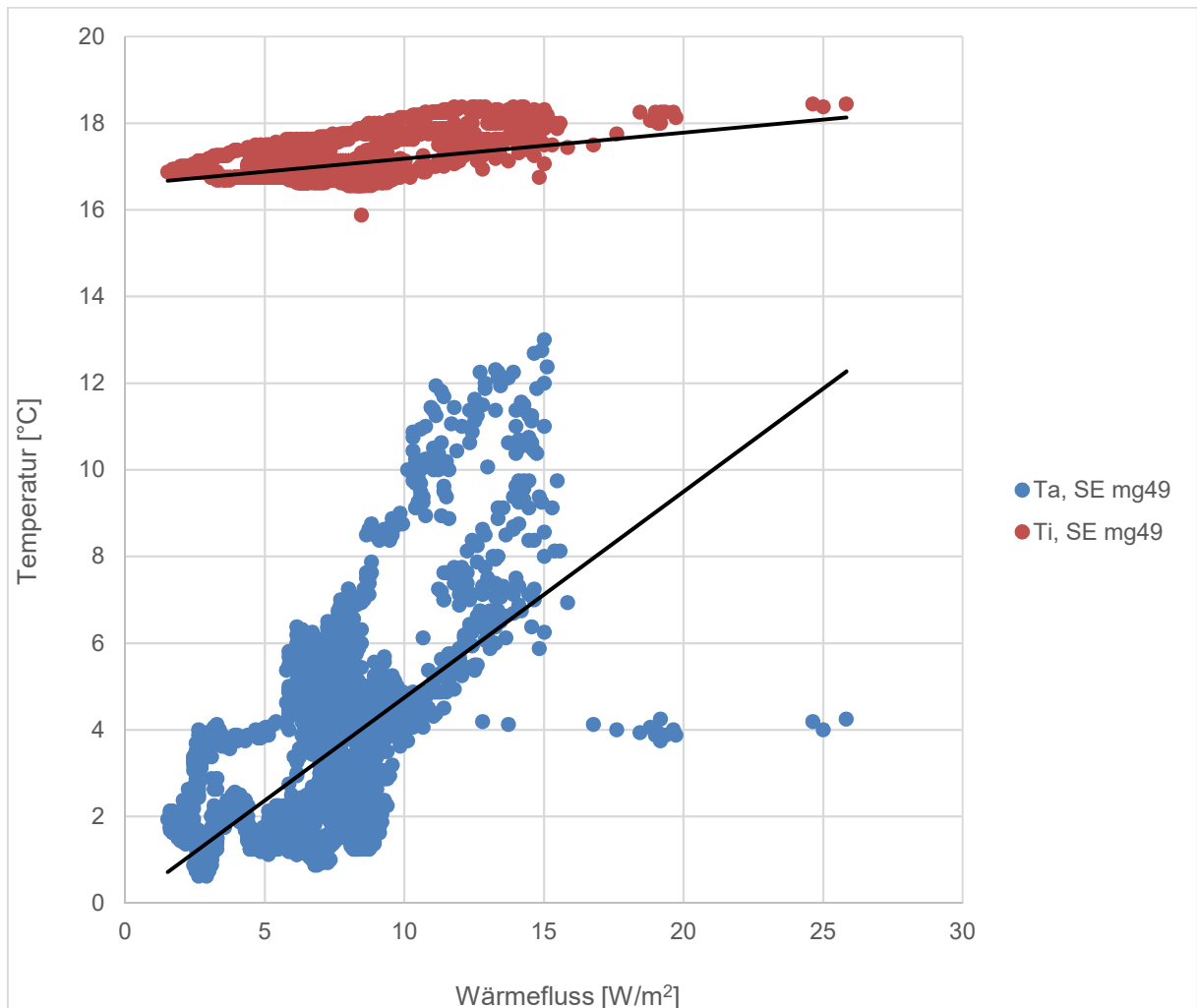
**Tabelle 6:** Messungen mit Sonneneinstrahlung und geeignet für eine dynamische Betrachtung

In der Tabelle 6 sind die Objekte in „massive“ und „leichte“ Wände unterteilt. Massive Wände haben eine hohe Speicherkapazität, die den Effekt der äusseren Sonneneinstrahlung zeitlich verschiebt (Phasenverschiebung). Das bedeutet, dass die Wand zuerst aufgewärmt werden muss, bevor es an der inneren Wandoberfläche zu einer Temperaturerhöhung kommt. Leichte Wände haben eine sehr kleine bis vernachlässigbare Speicherkapazität, die dazu führt, dass die Sonneneinstrahlung die Wand bis innen schnell aufwärmt und sich der Wärmefluss entsprechend reduziert oder sogar die Richtung wechselt (von aussen nach innen anstatt von innen nach aussen).

Da sich massive und leichte Wände bei Sonneneinstrahlung sehr unterschiedlich verhalten, werden sie in diesem Kapitel separat im Detail behandelt.

## Massive Wände

Beim Untersuchen der massiven Wänden ist als erstes aufgefallen, dass vor allem die Innentemperatur erhebliche Effekte auf die gemessenen Wärmeflüsse hat. Das ist gut ersichtlich, wenn die Innen/Aussentemperaturen mit dem Wärmefluss verglichen werden. Die Abbildung 18 zeigt die über alle Messungen an massiven Wänden relativ gute Korrelation zwischen Innentemperatur und dem Wärmefluss. Eine solche Korrelation ist für die Aussentemperatur und den Wärmefluss nicht erkennbar.



**Abbildung 18:** Gute Korrelation zwischen Innentemperatur und Wärmefluss (rot)

Der Wärmefluss wird auf der inneren Oberfläche gemessen. Und der Wärmefluss erhöht sich sobald die innere Raumtemperatur ansteigt. Die Innentemperatur schwankt zwar viel weniger als die Aussentemperatur (im Beispiel der Abbildung 18 zwischen 17-19°C Ti im Vergleich zu 1-14°C Ta), beeinflusst aber den Wärmefluss viel stärker. Daraus kann bereits geschlossen werden, dass die Sonneneinstrahlung an der äusseren Wandoberfläche einen viel kleineren Einfluss auf den Wärmeverlust hat, als der Verlauf der Innentemperatur.

Diese Feststellung ist wohl der Grund, dass sich der Wärmefluss in südorientierten Räumen bei Sonneneinstrahlung an der Fassade entgegen den Erwartungen erhöhte. Denn die Raumtemperatur der südexponierten Räume erhöhte sich markant wegen des Wärmegewinns über die Fenster.

Nun sollen die durch die Sonneneinstrahlung verursachten Wärmeverluste quantifiziert und auf verschiedene Zeitdauer hochgerechnet werden. Das Vorgehen war das folgende:

1. Anhand der Analyse der Aussentemperaturen werden Tage mit Sonneneinstrahlung selektiert.



2. Den Wärmefluss über einen Tag mit Sonnenschein mitteln (ab Start der Sonneneinstrahlung bis 24 Stunden später). Somit wird der Effekt der Wärmespeicherung auf den Wärmefluss nach der Sonneneinstrahlung mitberücksichtigt
3. Zum Vergleich wird der Wärmefluss für einen Zeitraum ohne Sonneneinstrahlung (mindestens 24 Stunden) auf gleiche Weise ermittelt.
4. Anhand der gemittelten Wärmeflüsse, Innen- und Aussentemperaturen werden die U-Werte für beide Fälle (Tag mit Sonne, Tag ohne Sonne) berechnet.
5. Mustergebäude festlegen
6. SIA 380/1 für Mustergebäude rechnen – einmal mit U-Wert bei Sonneneinstrahlung an der Südwand und einmal ohne Sonneneinstrahlung an der Südwand
7. Werte vergleichen für Betrachtungsmonat

Es wurde ein einfaches Mustergebäude für die SIA 380/1 Berechnung erstellt. Dieses war folgendermassen definiert:

- Masse (Länge x Breite x Höhe): 10 x 10 x 2.5 m
- Bauteile Boden, Dach, Nord-, Ost- und West-Wand mit gleichem U-Wert (entspricht U-Wert aus Messdaten ohne Sonneneinstrahlung)
- U-Wert Südwand variiert zwischen U-Wert mit oder ohne Sonneneinstrahlung.
- Keine Fenster, keine Wärmebrücken
- Standort des Hauses: Kanton Zürich

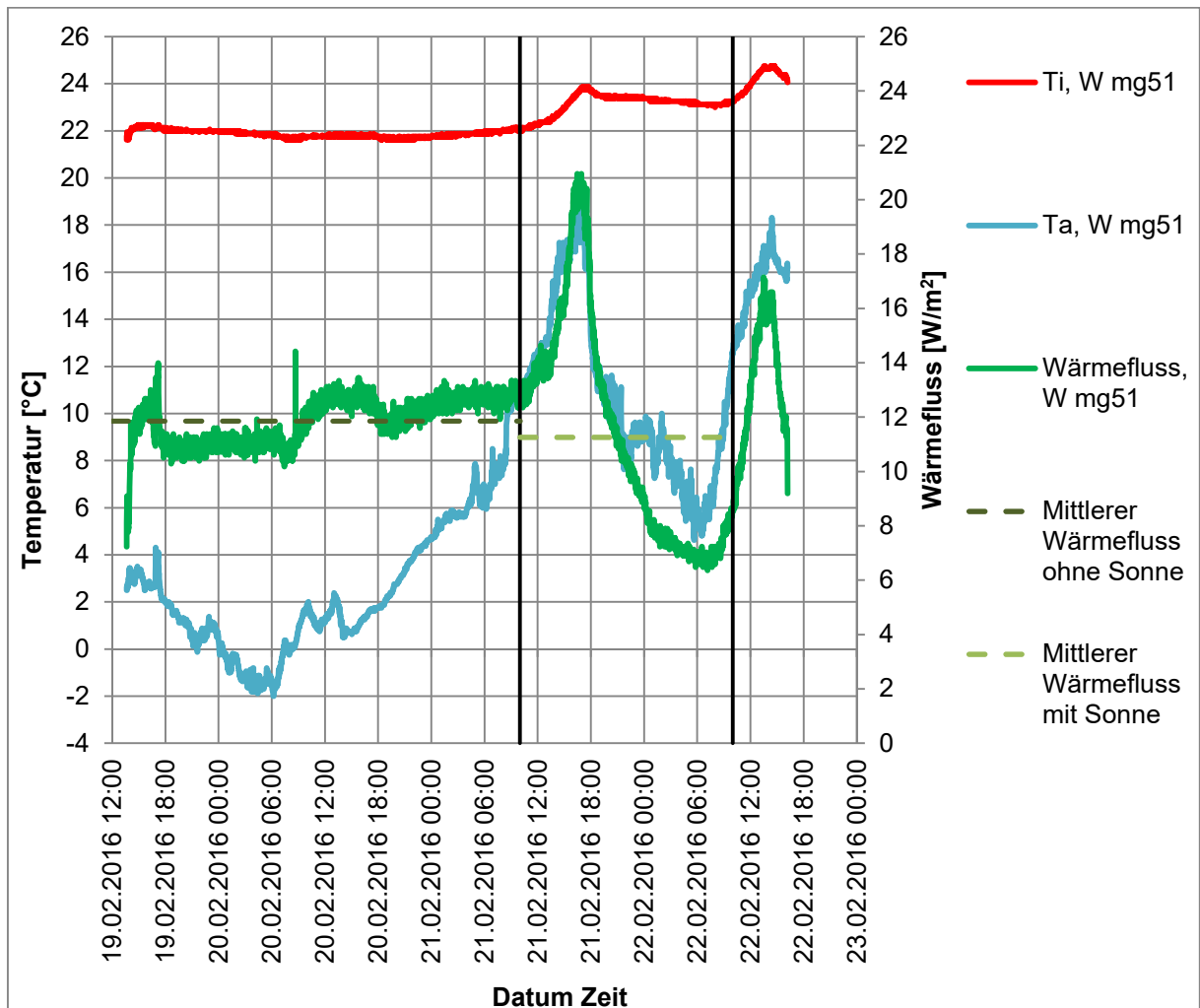
Dieses Vorgehen wurde bei den in der Tabelle 6 aufgeführten Objekten angewandt. Die Resultate sind in den nächsten Abschnitten pro Objekt dargestellt und diskutiert. Eine SIA 380/1 Musterberechnung für das Objekt 5-BH-01 ist in im Anhang 3 aufgezeigt.

## Objekt 5-BH-01 – doppelschalige Backsteinwand, gedämmt, hinterlüftet

Das Objekt 5-BH-01 ist eine hinterlüftete, gedämmte, doppelschalige Backsteinwand. Obwohl in den Plänen ca. 6 cm Dämmung eingezeichnet waren, hat die U-Wert Messung Zweifel an deren Wirkung aufgeworfen. Der mit diesem 6 cm berechneten U-Wert wäre 0.81 W/m<sup>2</sup>K gewesen, aber gemessen wurden 0.95 W/m<sup>2</sup>K. Es ist daher eher mit 2-4 cm wirkungsvoller Dämmstärke zu rechnen.

Während der Messung schien zwei Tage lang keine Sonne und es herrschten sehr stabile, tiefe Aussentemperaturen. Am dritten Tag war das Wetter sehr schön mit höheren Aussentemperaturen und viel Sonne. Gegen Ende der Messung schien die Sonne wieder. Die Messung wurde an der West- und Ostwand mit je drei Messgeräten ausgeführt. Es wird in der Abbildung 19 nur die Westwand ausgewertet, da die Messung an der Ostwand durch ein während der Nacht geöffnetes Fenster die Daten verfälscht hatte.





**Abbildung 19:** Wärmefluss (grün), Innen- (rot) und Aussentemperatur (blau) Objekt 5-BH-01 mit drei Messgeräten gemessen (hier ist nur eines der Übersichtlichkeit halber aufgezeigt da die anderen beiden gleich waren)

In der Abbildung 19 ist die Zeit mit Sonneneinstrahlung durch den Aussentemperaturen (blau) deutlich erkennbar. Ab ca. 11:00 am 21.2.16 steigt die Aussentemperatur sehr schnell sehr hoch und deshalb beginnen ab dieser Zeit die 24 Stunden für den mittleren Wärmefluss bei Sonnenschein (grün gestrichelt). Schon in der Abbildung 19 ist der Speichereffekt der Wand erkennbar. Nachdem die Sonne nicht mehr scheint (ab ca. 18:00), sinkt der Wärmefluss trotzdem weiter ab, obwohl die Innentemperatur höher ist als am Vortag. Auch am nächsten Tag als die Sonne wieder scheint und die Innentemperatur den höchsten Punkt erreicht, steigt der Wärmefluss nicht mehr so hoch an wie am ersten sonnigen Tag.

Gemittelt ist der Unterschied zwischen dem Wärmefluss mit und ohne Sonne nicht sehr gross. Der tiefere Wärmefluss infolge der Wärmespeicherung wird vom erhöhten Wärmefluss infolge der Sonneneinstrahlung und der damit verbundenen Raumtemperaturerhöhung nahezu kompensiert. Eventuell würde der Wärmefluss über mehrere sonnige Tage hintereinander weiter sinken, aber die Messung hat nicht lange genug gedauert um den Effekt zu quantifizieren.



Mit diesen beiden Wärmeflüssen (und dazugehörigen mittleren Innen- und Aussentemperaturen) wurde der entsprechende U-Wert berechnet und in das SIA 380/1 Berechnungstool eingegeben. Die resultierenden Wärmeverluste für die Wände und das ganze Gebäude sind in der Tabelle 7 zusammengefasst.

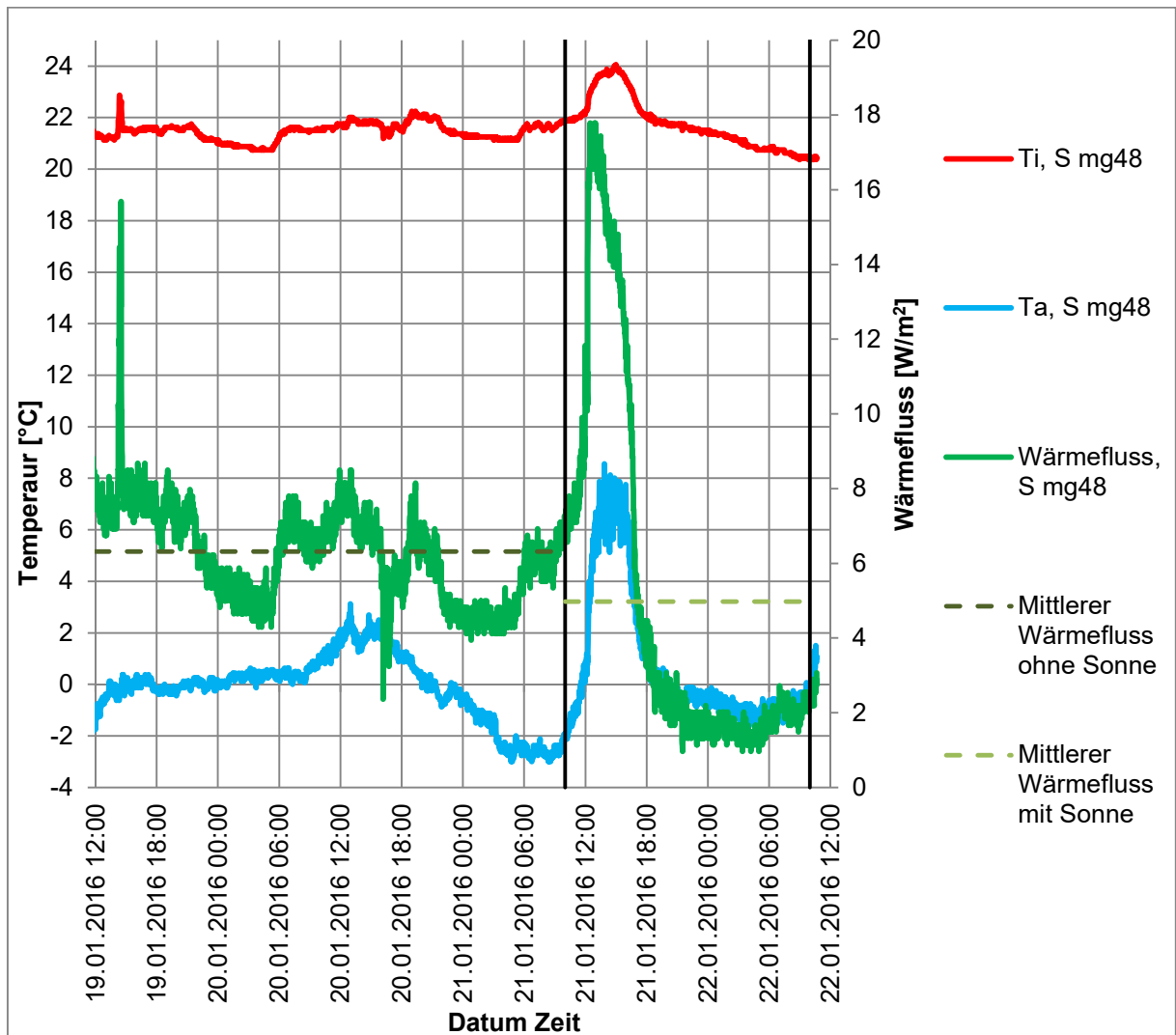
Kenngrosse	mit Sonne	ohne Sonne	% Unterschied
Mittlerer Wärmefluss gemessen [W/m <sup>2</sup> ]	11.26	11.86	-5%
Mittlerer Innentemperatur [°C]	23.1	21.9	
Mittlerer Aussentemperatur [°C]	10.6	2.5	
Temperaturunterschied innen/aussen [°C]	12.5	19.4	-35%
U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	0.90	0.61	47%
Wärmeverlust über alle Wände [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	30.38	27.15	12%
Wärmeverlust ganzes Gebäude [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	84.69	81.46	4%

**Tabelle 7:** Wärmefluss, U-Wert und Wärmeverlust mit und ohne Sonne Objekt 5-BH-01 (im Februar)

Obwohl der Wärmefluss am sonnigen Tag wenig kleiner war als am nicht-sonnigen Tag (-5%) war der U-Wert am sonnigen Tag höher als am nicht-sonnigen (47%). Dies liegt am grossen Temperaturunterschied bei der Situation ohne Sonne. Wegen dem höheren U-Wert mit Sonnenschein (0.90 W/m<sup>2</sup>K) ist der Wärmeverlust über die Wände auch höher als ohne Sonnenschein (12%). Beim Transmissionswärmeverlust über das ganze Gebäude macht allerdings der höhere Wärmeverlust an der Südwand nur noch wenig (4%) aus.

## Objekt 6-DM-03 – doppelschalige Backsteinwand, gedämmt

Das Objekt 6-DM-03 ist eine doppelschalige Backsteinwand mit 8 cm Wärmedämmung. Der berechnete U-Wert betrug 0.36 W/m<sup>2</sup>K und der gemessene (der Mittelwert über alle Messgeräte) lag bei 0.30 W/m<sup>2</sup>K. Während der U-Wert Messung schien die Sonne nur am zweitletzten Messtag, dem 21.1.16, während ca. 5 Stunden. Der Wärmefluss ist während der Sonneneinstrahlung stark gestiegen, wie in der Abbildung 20 ersichtlich.



**Abbildung 20:** Wärmefluss (grün), Innen- (rot) und Aussentemperatur (blau) Objekt 6-DM-03 mit einem Messgerät gemessen (zwei weitere waren gegen N eingesetzt)

In Abbildung 20 ist nach der Sonneneinstrahlung der Speichereffekt der Wand ersichtlich. Die Innentemperatur reduziert sich um 2°C, während sich der Wärmefluss relativ stabil verhält. An den vorherigen Tagen war der Wärmefluss ebenfalls relativ stabil, aber auf einem höheren Niveau bei gleicher Innentemperatur. Der über den Tag gemittelte Wärmefluss ist sichtbar tiefer als der Wärmefluss über die vorherigen, nicht sonnigen Tage. Die Zahlen dazu und der Einfluss auf den Wärmeverlust sind in der Tabelle 8 zusammengefasst.



Kenngrosse	mit Sonne	ohne Sonne	% Unterschied
Mittlerer Wärmefluss gemessen [W/m <sup>2</sup> ]	4.98	6.32	-21%
Mittlerer Innentemperatur [°C]	21.8	21.5	
Mittlerer Aussentemperatur [°C]	0.7	-0.2	
Temperaturunterschied innen/aussen [°C]	21.0	21.7	-3%
U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	0.24	0.29	-19%
Wärmeverlust über alle Wände [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	14.57	15.22	-4%
Wärmeverlust ganzes Gebäude [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	45.02	45.67	-1%

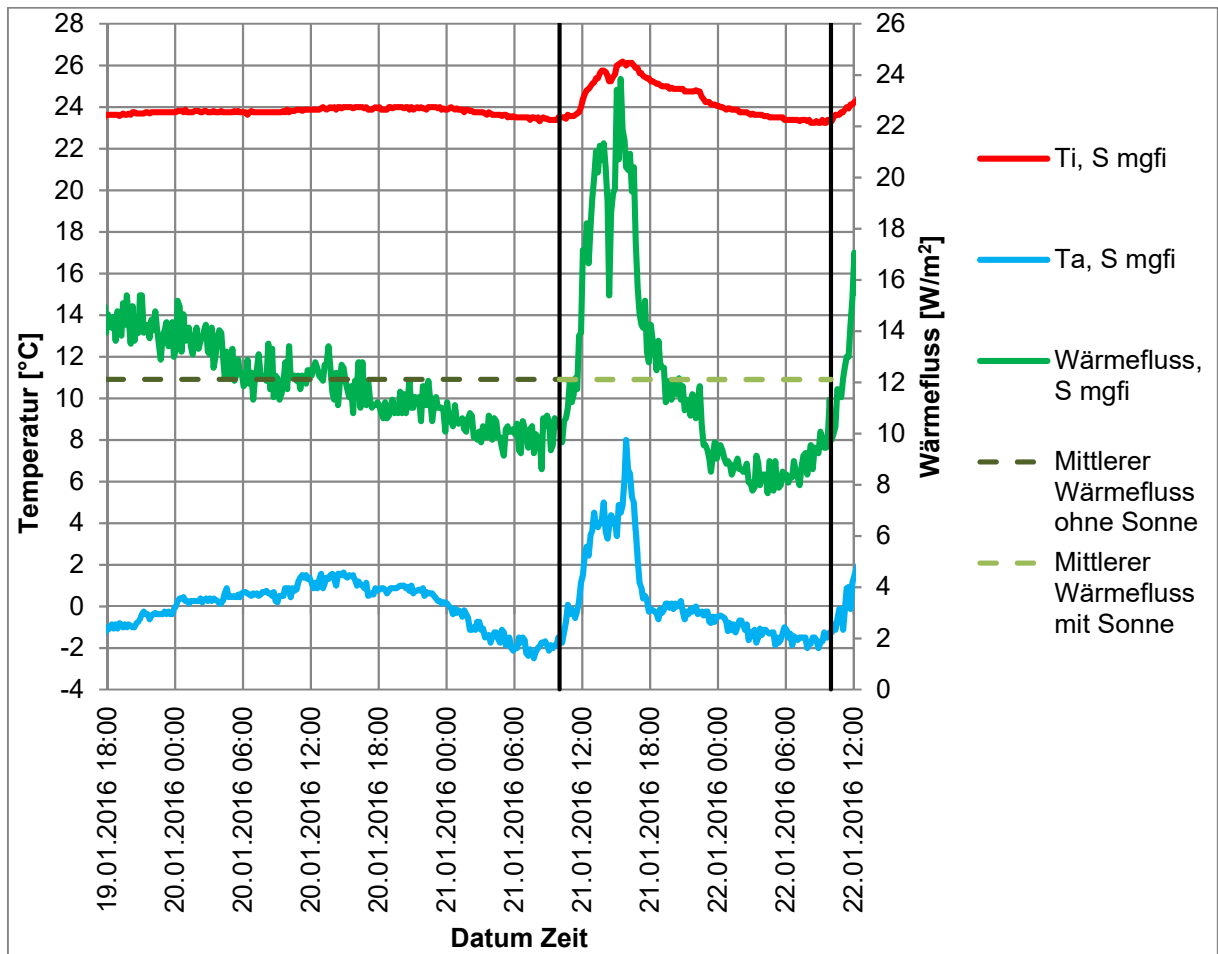
**Tabelle 8:** Wärmefluss, U-Wert und Wärmeverlust mit und ohne Sonne Objekt 6-DM-03 (im Januar)

Über 20% tiefer ist der Wärmefluss am sonnigen Tag über 24h, obwohl er während der Sonneneinstrahlung sehr hoch wird. Da der Temperaturunterschied zwischen sonnig und nicht sonnig relativ ähnlich ist (3%) bleibt der Unterschied beim U-Wert um die 20%. Auf das Mustergebäude macht der Transmissionswärmeverlust-Unterschied dennoch nur 1% aus.

## Objekt 6-DM-04 – doppelschalige Backsteinwand, gedämmt

Das Objekt 6-DM-04 ist dem Objekt 6-DM-03 sehr ähnlich. Nur hat diese Wand ca. 10 cm Dämmung zwischen den Wandschalen anstatt 8 cm. Der berechnete U-Wert war entsprechend tiefer, mit 0.33 W/m<sup>2</sup>K (anstatt 0.36 W/m<sup>2</sup>K). Der gemessene U-Wert war allerdings höher als berechnet, mit 0.53 W/m<sup>2</sup>K (beim Objekt 6-DM-03 war dieser 0.30 W/m<sup>2</sup>K). Dies lässt vermuten, dass die Dämmung zwischen den Wandschalen entweder nicht den Plänen entspricht, oder beschädigt ist.

Dieses Objekt wurde im gleichen Zeitraum gemessen wie das Objekt 6-DM-03, entsprechend ähnlich waren die klimatischen Verhältnisse.



**Abbildung 21:** Wärmefluss (grün), Innen- (rot) und Aussentemperatur (blau) Objekt 6-DM-04 mit einem Messgerät gemessen (zwei weitere waren gegen N eingesetzt)

In Abbildung 21 ist der Wärmefluss (grün), Innen- (rot) und Aussentemperatur (blau) über die Messdauer ersichtlich. Wie beim Objekt 6-DM-03 wurde ein mittlerer Wärmefluss über 24 h ab Anfang Sonneneinstrahlung (ca. um 10:00 am 21.1.16) berechnet und mit dem mittleren Wärmefluss über die vorherige Tage verglichen. In diesem Fall ist ein Speichereffekt weniger gut ersichtlich als im vorherigen Objekt. Ein mögliche Erklärung dafür ist, dass die Wärmespeicherung der inneren Wandschale massgebend ist. Mit einem höheren U-Wert der Wand reduziert sich der Speichereffekt, da ein grösserer Teil der gespeicherte Wärme nach aussen fliesst.

Der entsprechende Wärmeverlust wurde für das Musterhaus berechnet und ist in der Tabelle 9 zusammengefasst.



Kenngrosse	mit Sonne	ohne Sonne	% Unterschied
Mittlerer Wärmefluss gemessen [W/m <sup>2</sup> ]	12.11	12.11	0%
Mittlerer Innentemperatur [°C]	24.4	23.7	
Mittlerer Aussentemperatur [°C]	0.3	-0.1	
Temperaturunterschied innen/aussen [°C]	24.1	23.8	1%
U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	0.50	0.51	-1%
Wärmeverlust über alle Wände [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	26.64	26.77	0%
Wärmeverlust ganzes Gebäude [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	80.19	80.32	0%

**Tabelle 9:** Wärmefluss, U-Wert und Wärmeverlust mit und ohne Sonne Objekt 6-DM-04 (im Januar)

Mit dem kleineren Unterschied beim U-Wert von nur 1% (im Vergleich zu 20% beim Objekt 6-DM-03) mit und ohne Sonne verschwindet der Effekt auf den Wärmeverlust bereits beim Transmissionswärmeverlust nur über die Wände.

Der Vergleich zwischen diesen beiden, relativ ähnlichen Objekten zeigt vor allem auf, dass die Dynamik viele verschiedene Einflüsse hat, die alle einen Effekt auf das Resultat haben. Es ist daher nur schwer möglich allgemein gültige Aussagen über das dynamische Verhalten zu machen.

## Objekt 7-VH-01 – Vollholzwand ohne Dämmung

Das Objekt 7-VH-01 ist ein altes Strickbauhaus noch mit den ursprünglichen Holzschindeln aussen und einer Vollholz-Konstruktion durchgehend bis innen. Der berechnete U-Wert war 0.62 W/m<sup>2</sup>K und der gemessene (der Mittelwert über alle Messgeräte) war 0.63 W/m<sup>2</sup>K. Diese Wand ist unter den massiven Wänden aufgeführt, weil sie sich wie eine Massivwand verhält. Der Wärmefluss steigt nämlich bei Sonneneinstrahlung anstatt sich zu reduzieren.

Anders als bei den anderen hier aufgeführten Objekten, gab es an jedem Messtag Sonnenschein an der Südfassade. Daher wurde das Verfahren ein wenig angepasst: Um den Wärmefluss ohne Sonneneinstrahlung zu ermitteln, wurde der Wärmefluss an der Nordostwand über eine Messdauer von 72 Stunden gemessen und gemittelt. Der Wärmefluss an der Südostwand wurde ebenfalls über die gleiche Messdauer gemittelt für den Wärmefluss mit Sonneneinstrahlung. Die Messgeräte waren alle im gleichen Raum platziert.

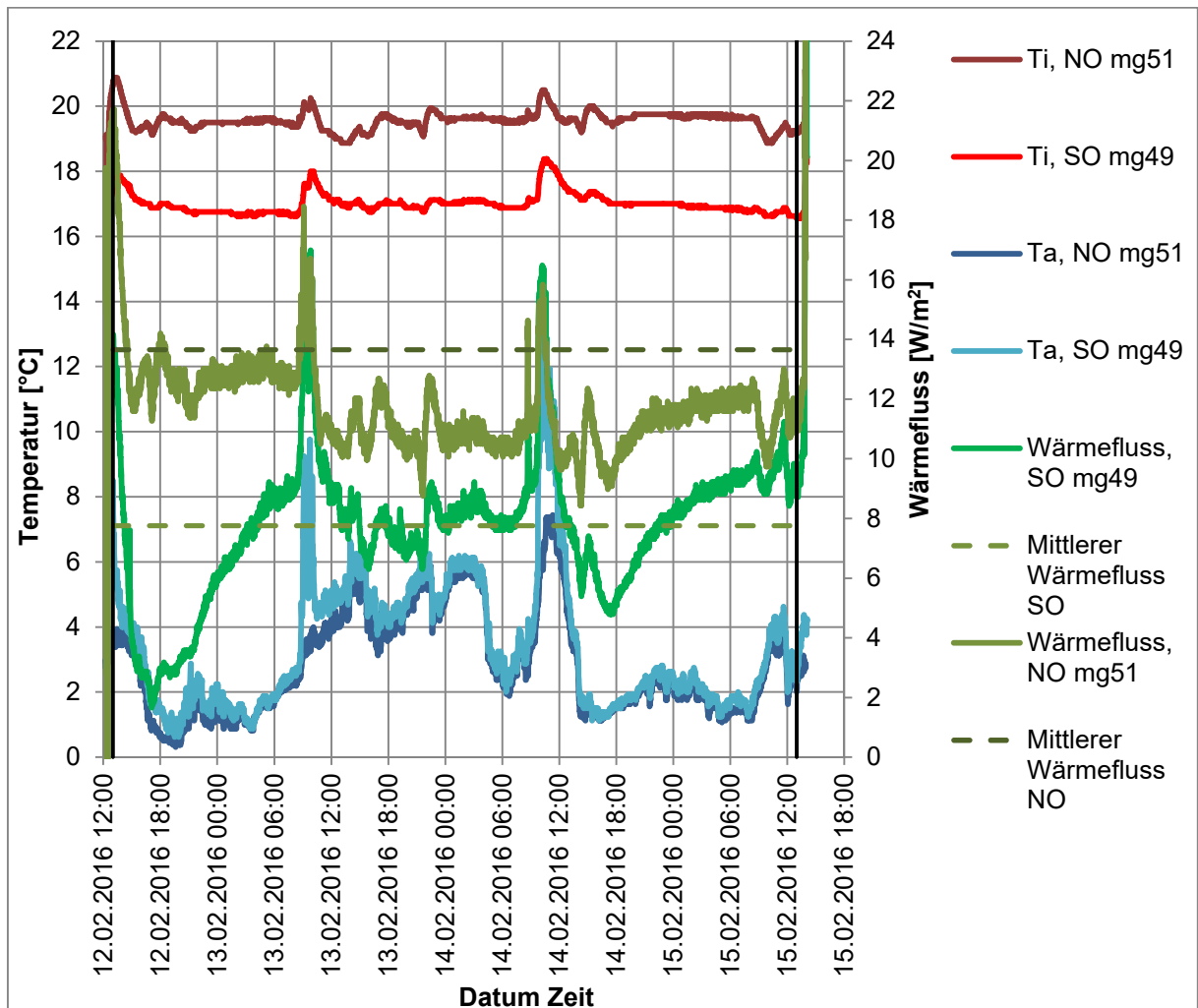


Abbildung 22: Wärmefluss (grün), Innen- (rot) und Aussentemperatur (blau) Objekt 7-VH-01 mit zwei Messgeräten gemessen

Der Wärmefluss an der NO-Wand ist deutlich höher als an der SO-Wand. Allerdings ist die Innentemperatur auch allgemein ca. 2.5°C höher als gegen SO. Diese Differenz hat mit der Einbauhöhe der Messgeräte zu tun: die gegen SO waren knapp über Boden und die gegen NO etwa mittig. Da die Aussentemperaturen auf beiden Fassaden relativ gleich sind, wenn die Sonne nicht scheint, ist der Wärmefluss gegen NO eher zu hoch geschätzt für die SO-Fassade. Die Unterschiede zwischen Wärmefluss, U-Wert und Wärmeverluste in der Tabelle 10 sind daher eher hoch geschätzt.



Kenngrosse	mit Sonne	ohne Sonne	% Unterschied
Mittlerer Wärmefluss gemessen [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	7.11	11.74	-39%
Mittlerer Innentemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	17.0	19.6	
Mittlerer Aussentemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	3.4	2.9	
Temperaturunterschied innen/aussen [ $^{\circ}\text{C}$ ]	13.6	16.7	-18%
U-Wert [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	0.52	0.70	-26%
Wärmeverlust über alle Wände [ $\text{kWh}/\text{m}^2_{\text{EBF}}$ ]	29.16	31.16	-6%
Wärmeverlust ganzes Gebäude [ $\text{kWh}/\text{m}^2_{\text{EBF}}$ ]	91.47	93.48	-2%

**Tabelle 10:** Wärmefluss, U-Wert und Wärmeverlust mit und ohne Sonne Objekt 7-VH-01 (im Februar)

Trotz der etwas zu hoch geschätzten Unterschiede zwischen den Wärmeflüssen in der Tabelle 10 ist der Unterschied beim Transmissionswärmeverlust für das Mustergebäude weiterhin sehr gering mit nur 2%.

## Zusammenfassung Massivwände

Die Resultate der Wärmeflussmessung dieser Untersuchung zeigen, dass der Wärmeverlust während der Sonneneinstrahlung auf eine massive Aussenwand wider Erwartungen höher ist, als wenn die Sonne nicht scheint. Dies hat aber eher mit den erhöhten Raumtemperaturen zu tun, verursacht durch die Wärmegewinne über die Fenster als mit einem Effekt aussen an der Wand. Dieser erhöhte Wärmefluss dauert aber nur solange an, wie die Sonne scheint. Danach war in allen Fällen ein Speichereffekt nachvollziehbar, da sich der Wärmefluss in den Stunden nach der Sonneneinstrahlung gegenüber dem Wärmefluss vor der Sonneneinstrahlung reduziert hatte. Somit war der mittlere Wärmefluss nach 24 Stunden wieder näher beim Wärmefluss vor der Sonneneinstrahlung.

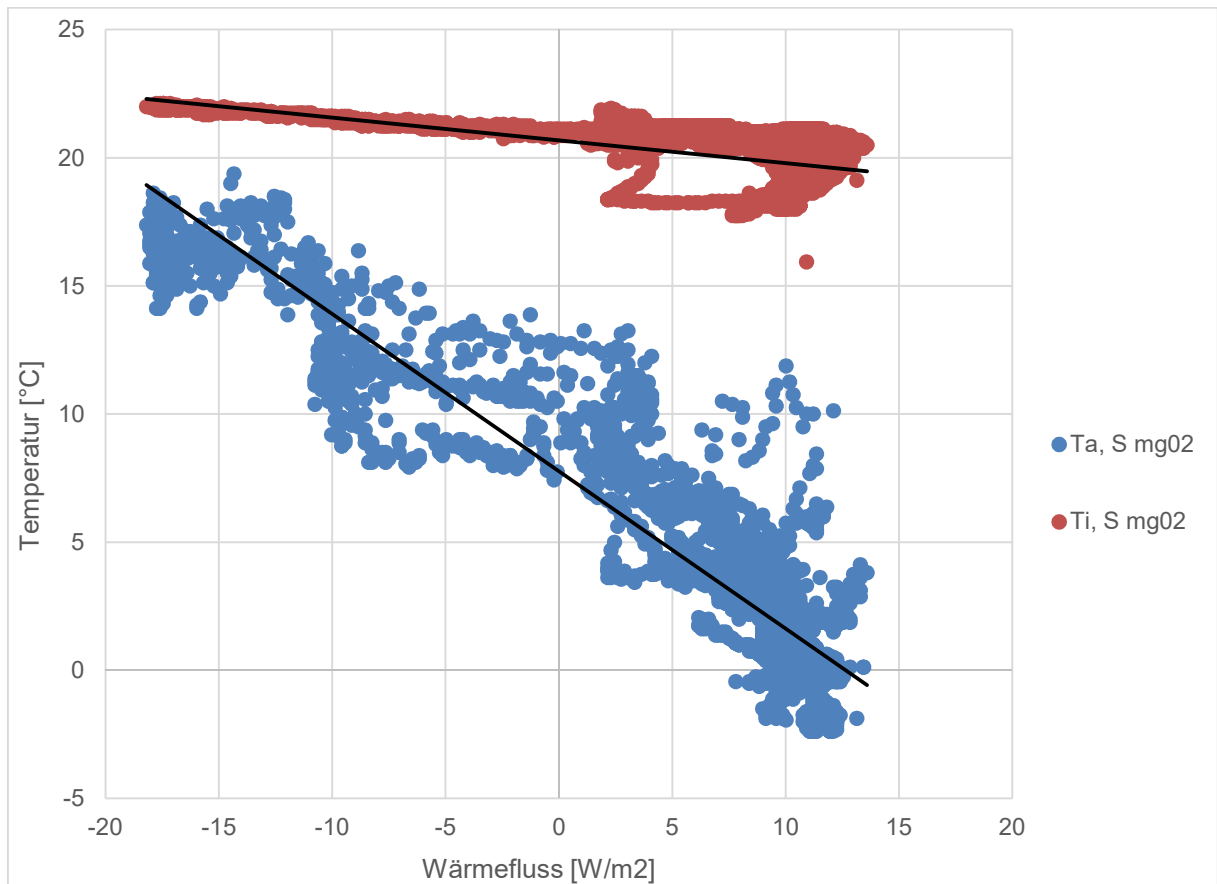
Allgemein gilt bei massiven Wänden: bei Sonneneinstrahlung erhöht sich die Innentemperatur meist deutlich. Dies führt zu einem kurzfristigen Anstieg der Wärmeverluste. Die Wand wird dadurch auch aufgewärmt. Diese Aufwärmung führt zu einem reduzierten Wärmeverlust nachdem die Innentemperatur wieder abkühlt. Beide Effekte zusammen führen zu einer minimalen Veränderung des Wärmeverlusts bei Sonneneinstrahlung im Vergleich zu keiner Sonneneinstrahlung. Je nach weiteren Einflussfaktoren kann der Wärmeverlust kleiner oder grösser sein und bewegt sich in diesen Beispielen zwischen  $\pm 4\%$ .

Die kurze Dauer (3 Tage) und wenige hintereinander folgende sonnige Tage während der Messungen erlauben keine Aussagen über längerfristige dynamische Effekte in Wänden. Mit längeren Messperioden (7 Tagen oder länger) könnten mit diesem Messsystem dynamische Effekte bei ausreichender Sonneneinstrahlungsdauer möglicherweise deutlicher sichtbar werden.

## Leichte Wände

Die Leichtbau-Wände haben sich anders verhalten als die massiven Wände. Es wurde erwartet, dass bei diesen Wänden kein Speichereffekt vorhanden ist, und dies hat sich auch in den Messungen bestätigt. Nur zwei Leichtbau-Wände wurden an der Südfassade gemessen. Die Korrelation zwischen Aussentemperatur und Wärmefluss war ein wenig besser als bei den massiven Wänden, allerdings war die Korrelation zwischen Innentemperatur und Wärmefluss stärker (vgl. Abbildung 23).





**Abbildung 23:** Korrelation zwischen Wärmefluss und Innen- bzw. Aussentemperatur (Objekt 8-HH-03)

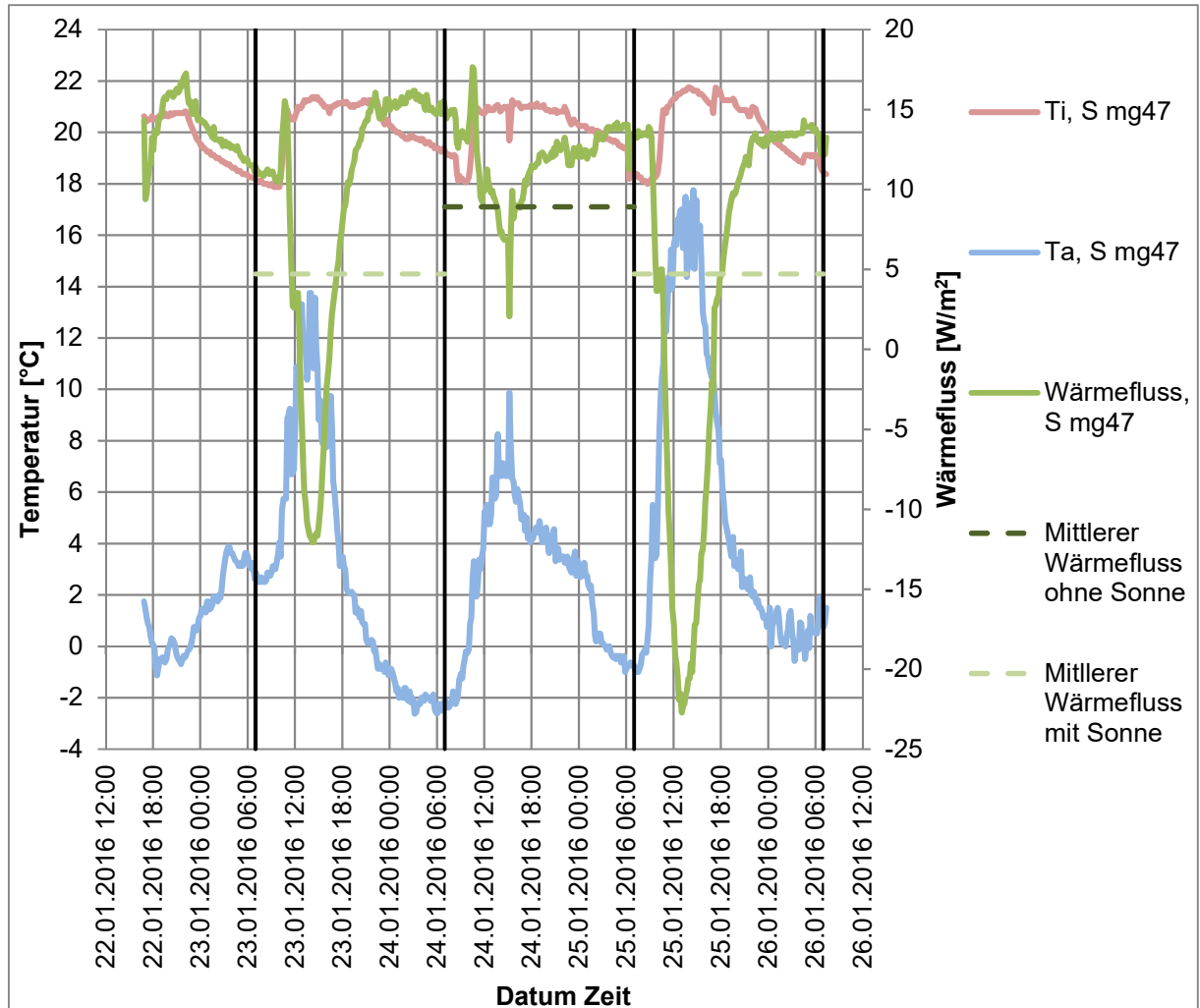
Diese Korrelation haben zwei der untersuchten Wände gezeigt. Beide waren in der Gruppe „Holz-hinterlüftet“ vorhanden. Dass ein Wärmegewinn über die Wand stattgefunden hat, zeigt jedoch, dass die vermeintliche Hinterlüftung nicht richtig funktioniert hat. Bei den anderen Holzwänden wurde entweder keine Messung an einer Südwand gemacht oder es gab zu wenig Sonnenschein während der Messdauer.

Ähnlich wie bei den Massivwänden wurden die Wärmeflüsse an sonnigen und nicht sonnigen Tagen ermittelt um daraus den Wärmeverlust am Musterhaus zu berechnen und zu vergleichen.

## Objekt 8-HH-01 – Holz-Rahmenbau, gedämmt

Das Objekt 8-HH-01 wurde an drei verschiedenen Stellen und unterschiedlichen Ausrichtungen gemessen. Die Messung an der Südwest-Wand hatte den relevantesten Einfluss der Sonneneinstrahlung und wurde deshalb für die Auswertung gewählt. Die Wand besteht aus Holzständern mit ca. 20 cm Dämmung dazwischen, innen und aussen verkleidet und einem berechneten U-Wert von 0.25 W/m<sup>2</sup>K. Der gemessene U-Wert lag bei 0.27 W/m<sup>2</sup>K.

Die Messung wurde im Dezember durchgeführt. An den ersten beiden Tagen war das Wetter kalt und der Himmel bedeckt. Am dritten Tag gab es Sonnenschein während ca. 6 Stunden.



**Abbildung 24:** Wärmefluss (grün), Innen- (rot) und Aussentemperatur (blau) Objekt 8-HH-03 mit zwei Messgeräten gemessen

Aus der Abbildung 24 ist kein deutlicher Speichereffekt ersichtlich. Der Wärmefluss ist praktisch auf dem gleichen Niveau, wenige Stunden nachdem die Sonne verschwunden ist wie an den Tagen zuvor. Ähnlich wie bei den Massivwänden steigt der Wärmefluss sehr stark, wenn der Raum durch die Sonne erwärmt wird. Anders als bei den Massivwänden fällt der Wärmefluss wenige Zeit später bis auf ein Minimum von ca.  $-6 \text{ W/m}^2$ . Negative Wärmeflusswerte stellen in diesen Messungen einen Wärmegewinn von aussen nach innen dar. Das heisst während ca. 1 Stunde gab es einen Wärmegewinn über die Wand von aussen nach innen. Dieser Wärmegewinn hielt nicht lange an und der Wärmefluss hat sich rasch wieder erhöht.

Die Tabelle 12 zeigt den Effekt der Wärmeflüsse mit und ohne Sonne auf den Wärmeverlust.



Kenngrosse	mit Sonne	ohne Sonne	% Unterschied
Mittlerer Wärmefluss gemessen [W/m <sup>2</sup> ]	2.62	3.80	-31%
Mittlerer Innentemperatur [°C]	21.7	19.9	
Mittlerer Aussentemperatur [°C]	8.4	6.9	
Temperaturunterschied innen/aussen [°C]	13.3	13.0	2%
U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	0.20	0.29	-33%
Wärmeverlust über alle Wände [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	13.04	14.14	-8%
Wärmeverlust ganzes Gebäude [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	41.31	42.41	-3%

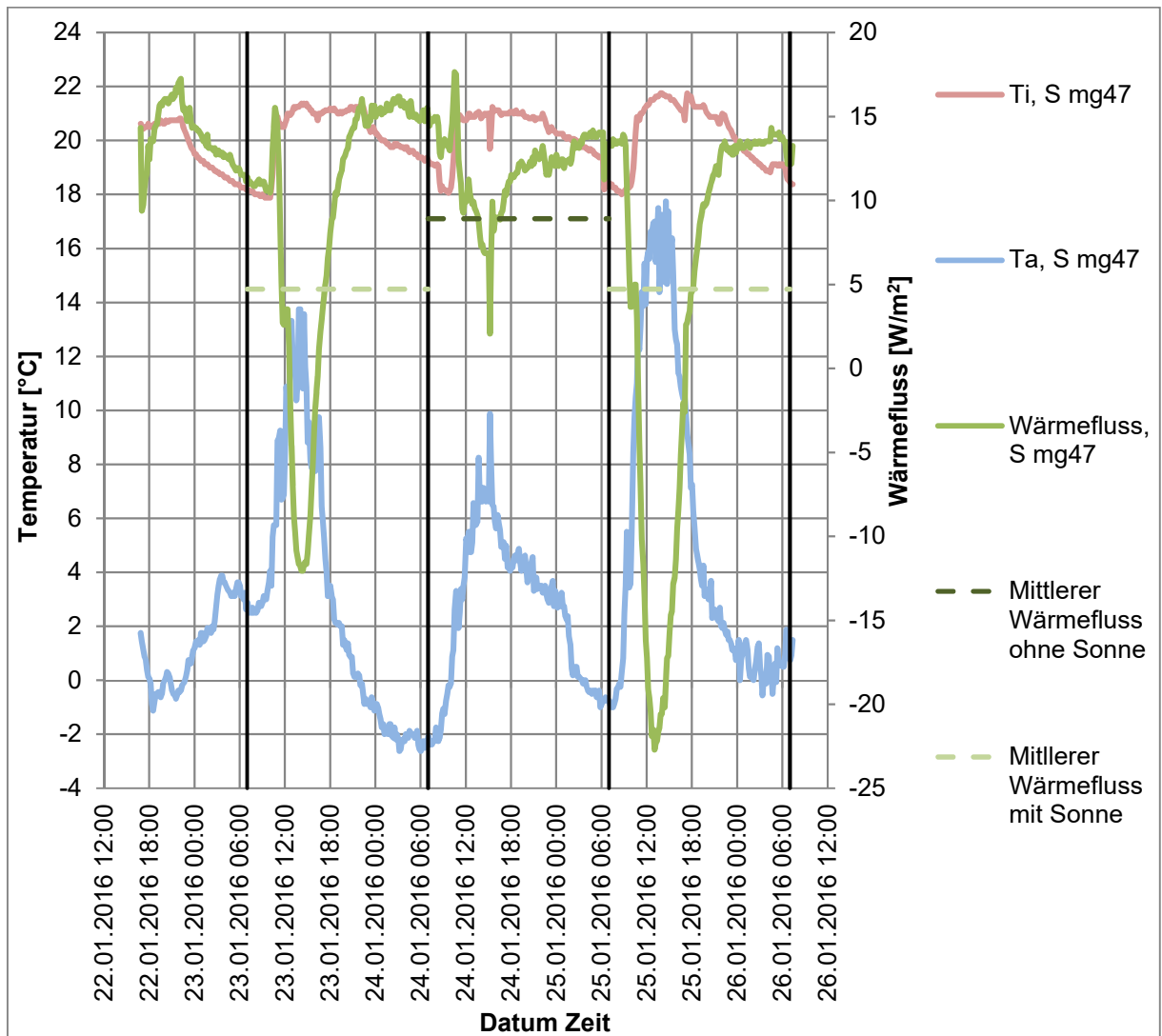
**Tabelle 11** Wärmefluss, U-Wert und Wärmeverlust mit und ohne Sonne Objekt 8-HH-01 (im Dezember)

Trotz dem sehr stark schwankenden Wärmefluss und der zeitweisen Wärmegewinne über die Wände ist der Gesamtwärmeverlust (Transmissionswärme) für das Mustergebäude nur 3% kleiner als ohne Sonne.

### Objekt 8-HH-03 – Holz-Rahmenbau, gedämmt

Das Objekt 8-HH-03 ist ebenfalls ein Holz-Rahmenbau mit ca. 17 cm Dämmung. Der berechnete U-Wert war entsprechend 0.42 W/m<sup>2</sup>K und der gemessene 0.49 W/m<sup>2</sup>K.

Die Sonne schien über längere Zeit am ersten und dritten Tag der Messung. Am zweiten Tag kam sie nur kurz zum Vorschein, und deshalb wurde dieser Tag als „Tag ohne Sonneneinstrahlung“ gewählt. Der mittlere Wärmefluss mit Sonne wurde über die anderen beiden Tage berechnet.



**Abbildung 25:** Wärmefluss (grün), Innen- (rot) und Aussentemperatur (blau) Objekt 8-HH-03 mit zwei Messgeräte gemessen

Aus der Abbildung 25 wird klar, dass ein erheblicher Wärmegewinn über die Wand in den Raum fließt. Dieser Wärmegewinn ist signifikant, da er den Wärmeverlust über die Wände an sonnigen Tagen reduziert. Wiederum ist kein Speichereffekt ersichtlich.

Die Tabelle 12 zeigt den mittleren Wärmefluss, U-Wert und berechneten Wärmeverlust auf.



Kenngrosse	mit Sonne	ohne Sonne	% Unterschied
Mittlerer Wärmefluss gemessen [W/m <sup>2</sup> ]	4.72	8.92	-47%
Mittlerer Innentemperatur [°C]	20.3	20.2	
Mittlerer Aussentemperatur [°C]	4.5	2.8	
Temperaturunterschied innen/aussen [°C]	15.7	17.3	-9%
U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	0.30	0.51	-42%
Wärmeverlust über alle Wände [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	24.02	26.77	-10%
Wärmeverlust ganzes Gebäude [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	77.56	80.32	-3%

**Tabelle 12:** Wärmefluss, U-Wert und Wärmeverlust mit und ohne Sonne Objekt 8-HH-03 (im Januar)

Tabelle 12 zeigt, dass die Sonneneinstrahlung einen grossen Einfluss auf den Wärmefluss hat, selbst wenn die Sonne nur wenige Stunden scheint. Der U-Wert wurde auch stark beeinflusst, mit über 40% Unterschied zwischen mit oder ohne Sonne. Wie bei allen anderen Objekten bisher war dieser Einfluss spätestens beim Gesamt-Transmissionswärmeverlust beim Musterhaus wieder vernachlässigbar, mit nur 3% weniger Wärmeverlust im Vergleich zum Fall ohne Sonne.

## Zusammenfassung Leichtbau-Wände

Bei den Leichtbau-Wänden wird sichtbar, dass der Speichereffekt deutlich kleiner ist als bei massiven Wänden. In diesem Beispiel ist sogar ein Wärmegewinn durch die Wand entstanden. Dieser Wärmegewinn war über kurze Zeit sehr hoch – bis zu 23 W/m<sup>2</sup>. Der Wärmefluss richtete sich allerdings bereits nach kurzer Zeit nach Aussen, nachdem die Sonne nicht mehr auf die entsprechende Wand schien.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass dieser Effekt bei hinterlüfteten Konstruktionen grundsätzlich nicht zu erwarten ist. Die Hinterlüftung verhindert solch grosse Schwankungen beim Wärmefluss normalerweise, indem die Konvektion die Wärme abtransportieren kann. Offenbar funktionierte die Hinterlüftung nicht wie geplant in den beiden untersuchten Gebäuden.

Ähnlich wie bei den Massivwänden war der tiefere Wärmefluss bei Sonnenschein zu klein um einen bedeutenden Einfluss auf den Wärmeverlust des Gebäudes zu haben.



## Schlussfolgerungen und Ausblick

Die wichtigsten Folgerungen beziehen sich auf die Messergebnisse und auf das Messverfahren selbst. Ferner wird ein kurzes Fazit zu den dynamischen Effekten gezogen.

### Folgerungen zu den Messergebnissen

#### Vergleich GEAK-U-Werte

Wie aus Erfahrung mit dem GEAK-Berechnungstool bereits vermutet, sind die hinterlegten U-Werte im GEAK zu hoch. Bei Wänden mit Baujahr vor 1976 sind die Abweichungen zwischen gemessenem U-Wert und GEAK U-Wert sehr hoch. Alle GEAK U-Werte lagen deutlich über dem Streubereich der Messungen.

An dieser Stelle wird vorgeschlagen, die GEAK-U-Werte auf  $1.0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für Wände mit Baujahr vor 1976 zurückzunehmen.

Bei Wänden mit Baujahr 1976-1985 zeigen die GEAK U-Werte ebenfalls eine starke Abweichung zu gemessenen U-Werten (GEAK rechnet mit zu hohen U-Werten). Sowohl gemessene, berechnete wie auch GEAK U-Werte sind insgesamt aber deutlich tiefer als früher. Die Energiegesetze zeigen klar ihre Wirkung.

Auch für diese Bauperiode sollten die GEAK-Werte reduziert werden. In welchem Mass lässt sich aber aufgrund der Heterogenität der Konstruktionen nur schwer sagen. Wir empfehlen in diesem Bereich **die GEAK-U-Werte auf  $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zurückzunehmen** und noch weitere Messungen vorzunehmen.

Bei sanierten Wänden waren die U-Werte des GEAK-Tools durchaus realistisch. Allerdings wurden nur gerade drei sanierte Wände gemessen und verglichen.

Diese Untersuchung zeigt deutlich: Es ist wichtig, dass die GEAK-Experten bei alten Gebäuden in jedem Fall die GEAK-U-Wert-Vorschläge kritisch hinterfragen und nach Möglichkeit diese durch Berechnungen oder Messungen verifizieren.

#### Vergleich Berechnung

Bei den Wänden mit Baujahr vor 1976 lagen die grössten Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem U-Wert bei monolithischen schweren Wandaufbauten. In der Regel waren die berechneten U-Werte höher als die gemessenen. Bei den leichten Wandaufbauten oder solchen mit minimaler Dämmschicht (doppelschalig) war die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung besser (weniger als  $\pm 20\%$ ). Es wird vermutet, dass dies mit konservativen  $\lambda$ -Werten der schweren Baumaterialien zu tun hat.

Bei den Wänden mit Baujahr 1976-1985 waren die gemessenen U-Werte untereinander sehr ähnlich (zwischen  $0.40\text{-}0.50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Diese Homogenität der U-Werte ist wohl den Energievorschriften zu verdanken. Die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen U-Werten hat wahrscheinlich mit unterschiedlichen  $\lambda$ -Werten der eingesetzten Dämmstoffe als den angenommenen  $\lambda$ -Werten ( $0.040 \text{ W}/(\text{mK})$ ) zu tun.



Bei sanierten Wänden waren die Abweichungen zwischen berechnetem und gemessenem U-Wert zum Teil hoch, was aber ebenfalls eher mit unterschiedlichen  $\lambda$ -Werten zu tun hat. Es waren nämlich keine Unterlagen der verwendeten Dämmstoffe mehr vorhanden.

Planer sollten bei gedämmten Wänden jedoch immer aufpassen. Ist die Dämmung unbekannt, können auch bei berechneten U-Werten signifikante Fehler auftreten. In solchen Fällen empfiehlt sich eine U-Wert-Messung ganz besonders.

Da keine destruktiven Untersuchungen möglich waren, konnten nicht alle Gründe für Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten U-Werten untersucht werden. Allenfalls können in einer weiteren Untersuchung bei Wänden mit grossen Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten U-Werten zusätzlich Probebohrungen vorgenommen werden, um danach den Aufbau und die Baustoffe zu überprüfen.

## Messverfahren

Zu Beginn der Messung wurde die Validität der Messwerte in Frage gestellt, da eine inakzeptable Abweichung zwischen Messungen mit verschiedenen Messgeräten am gleichen Ort und zur gleichen Zeit auftrat. Diese Abweichung konnte durch eine verbesserte Kalibrierung der Messgeräte sowie einem verbesserten Aufbau der Messapparatur (und Messungen an Gebäuden mit höheren U-Werten) behoben werden. Durch die vielen Messungen konnten diverse Fehlerquellen evaluiert werden. Zudem wurden mehrere Messungen nach 72 Stunden Messdauer als gemäss ISO ungültig taxiert. Um ungültige Messungen zu vermeiden, werden folgende Empfehlungen für Nutzer gegeben:

1. **Messzeitraum auswählen:** Wenig Sonne, gleichmässige, durchgehend tiefe Temperaturen, – Bei Leichtbauten wichtiger als bei Massivbauten.
2. **Platzierung der Messgeräte/-sensoren:** Möglichst auf Nord ausgerichtete Wände und in unbenutzten oder wenig benutzten Zimmern platzieren. Nicht in Küchen, Bädern oder Schlafzimmern von Bewohnern, die nachts das Fenster öffnen, messen. Aussensensoren vor Sonneneinstrahlung und Witterung schützen. Wenn möglich, den Messort zuerst mit einer Infrarot-Kamera untersuchen um verdeckte Inhomogenitäten zu vermeiden. Möglichst mindestens mit zwei Messgeräten am selben Messort messen.
3. **Bewohner/Nutzer informieren:** Heizung nicht verstellen/abschalten. Messgeräte nicht manipulieren, umplatzieren oder abdecken – Änderungen immer protokollieren. Fenster grundsätzlich geschlossen lassen. Lüften 2-3 Mal am Tag, 5-10 Minuten erlaubt.
4. **Messung überprüfen:** Beim Abholen die Messung zuerst kurz auswerten und anschauen – ist die Messung gültig? Hat sich der U-Wert stabilisiert? Evtl. Messzeit um einen bis mehrere Tag/Nacht-Zyklen verlängern (bei ungültigen Messungen, unvorhergesehene Wetterveränderungen, Schwankungen beim U-Wert, etc.)

Es können nicht immer alle Empfehlungen eingehalten werden, aber je mehr, desto eher erzielen die Messungen gute Ergebnisse.

Die Resultate bedürfen einer Interpretation von einer erfahrenen Fachperson. Daher eignet sich dieses Messverfahren nicht für Laien. Fachpersonen wie Bauphysiker, Energieberater oder andere Fachpersonen, die über ein gutes Verständnis von U-Werten verfügen, können dieses Messgerät verwenden.

Da bessere Messwerte mit dem Einsatz von mehreren Messgeräten/-sensoren erzielt werden, wäre es denkbar, diese in ein Messgerät zu integrieren. Das würde die Zeit für den Ein-/Ausbau erheblich



reduzieren. Ebenfalls wäre es sinnvoll, die Abstandhalter und Sonnen-/Wetterschutzdeckel für die Temperatursensoren mitzuliefern. Die Wärmekontaktfolie sollte ein integraler Bestandteil des Messgeräts sein. (Anmerkung des Herstellers: dies wurde bereits umgesetzt).

Die Abhängigkeit der U-Wert-Messergebnisse von den Innentemperaturen ist verwirrend und sollte vom Hersteller genauer erklärt werden.

## Dynamische Betrachtung

Die Begleitgruppe regte an, dass die vorliegenden Messergebnisse auch auf den Effekt der U-Wert-Reduktion infolge Sonneneinstrahlung genauer ausgewertet werden. Es wurde die Vermutung geäußert, dass der dynamische Effekt der Sonneneinstrahlung bei massiven Wänden grösser ist als bei Leichtbauwänden.

Die Messwerte der gSKIN-Geräte wurden auf solche Effekte speziell untersucht und ausgewertet.

Zusammenfassend hat die dynamische Untersuchung der gemessenen Wände folgendes gezeigt:

- Das Messverfahren zeigt Einflüsse von Sonneneinstrahlung auf eine Wand sehr gut auf. Es gibt einen messbaren Effekt auf den Wärmefluss und den U-Wert – sowohl bei massiven wie auch leichten Wänden. Beispielsweise ist über 24 Stunden der mittlere Wärmefluss nach Ausen bei Sonneneinstrahlung insgesamt kleiner als an einem nicht sonnigen Tag.
- Der Effekt eines tieferen U-Wertes infolge Sonneneinstrahlung ist jedoch klein und vor allem auch sehr unterschiedlich. Eine einfache Hochrechnung der reduzierten Verluste infolge Wärmeeinstrahlung wurde exemplarisch vorgenommen. Der Transmissionswärmeverlust für ein sehr einfaches Mustergebäude hat sich nur um wenige Prozente verändert und ist nicht repräsentativ. Hier wurden schlecht wärmegeämmte Gebäude untersucht. Bei gut gedämmten Gebäuden dürfte der Effekt noch kleiner sein.
- Anhand der untersuchten Beispiele ist klar geworden, dass sehr viele Faktoren einen Einfluss auf Wärmefluss resp. U-Wert einer Wand haben. Die Effekte dieser Einflussfaktoren sind allerdings unklar. Insbesondere ist auch die Temperaturabhängigkeit des Messverfahrens zu wenig bekannt. Auch zwei ähnliche Wände, zur gleichen Zeit gemessen, haben sich messbar voneinander unterschieden. Die Dynamik von Bauteilen hat eine grosse Komplexität, so dass vereinfachte Simulationen und Berechnungen keine gesicherten Erkenntnisse ermöglichen.

Insgesamt ist dieses Messverfahren jedoch interessant um dynamische Vorgänge in Wänden aufzuzeigen. Die grafisch dargestellten Wärmeflüsse über die Messdauer zeigen das dynamische Verhalten des Bauteils sehr schön.

Es wäre spannend das dynamische Verhalten über längere Zeit zu untersuchen. In einzelnen Messungen wurden bereits Hinweise auf eine mehrtägige Wärmespeicherung bei Massivwänden sichtbar.





## Referenzen

- [1] Energie Schweiz. (2001). U-Wert-Berechnung und Bauteilkatalog Sanierungen. Bern: Bundesamt für Energie BFE.
- [2] greenTEG. (2015). greenTEG. Abgerufen 2015 von <http://www.greenteg.com/heat-flux-sensor/>
- [3] Ragonesi, M. (heruntergeladen am 25.02.2016). U-Wert-Berechnung bei inhomogenen Holzbaukonstruktionen. Lignum Holzwirtschaft Schweiz.
- [4] SIA. (2009). SIA 380/1:2009 - Thermische Energie im Hochbau. SN 520 380/1. SIA Zürich.
- [5] SIA. (2011). SIA 279:2011 - Wärmedämmende Baustoffe. SN 556 279. SIA Zürich.
- [6] SIA. (2014). SIA 180:2014 - Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. SN 520 180. SIA Zürich.



## Anhang 1 Tabelle U-Wert Resultate

Gebäude- und Messdaten					hs.mg2			hs.mg45			hs.mg46 / hs.mg49			hs.mg47 / hs.mg50		hs.mg48 / hs.mg51			fi.mg			Auswertung			
Messobjekt	Baujahr	Start Messung	Ende Messung	Wetter	Orientierung	U-Wert [W/m²K]	dU24 %	Orientierung	U-Wert [W/m²K]	dU24	Orientierung	U-Wert [W/m²K]	dU24	Orientierung	U-Wert [W/m²K]	dU24	Orientierung	U-Wert [W/m²K]	dU24	Orientierung	U-Wert [W/m²K]	dU24	Mittelwert gemessen [W/m²K]	Berechnet [W/m²K]	GEAK [W/m²K]
1-BM-01*	1770	12.1. 8:00	15.1. 9:00	Schnee/ Regen, wenig Sonne, Wind, Bewölkt							N	0.84	3.34				N	1.02	2.66	S	1.97	0.22	1.28	2.58	1.30
1-BM-02*		15.1. 13:30	19.1. 8:00	Sonne, Schnee, Bewölkt	W	1.08	1.02	S	1.08	4.24				S	0.92	3.63							1.03	2.36	1.30
1-BM-04*	1710	5.2. 14:00	8.2. 14:00	Sonne, Bewölkt, Regen				E	1.08	2.87				E	1.2	2.74							1.14	1.84	1.30
3-BW-01*	1970	4.3. 13:30	7.3. 15:00	Sonne, Schnee, Bewölkt	NW	0.87	1.3							NW	0.87	0.96	NW	0.83	0.62				0.86	1.51	1.40
3-BW-02	1965	16.3. 13:00	21.3. 11:30	Sonne, warm	SW	0.55	1.96	SW	0.56	2.34	SW	0.56	1.81										0.56	0.52	0.51



4-BV-01**	1960	11.12. 8:30	15.12. 8:30		NE	0.5	2.34															0.50	0.50	1.40	
4-BV-04	1978	4.1. 16:45	11.1. 17:30	3 Tage Sonne/ wechselhaft, 3 Tage Dauerregen	E	0.49	0.78			E	0.41	1.03										0.45	0.48	0.80	
4-BV-05*	1960	8.1. 9:00	11.1. 10:00	Dauerregen				N	0.88	0.4			S	1.02	0.58	S	0.91	0.14				0.97	1.31	1.40	
4-BV-06	1978	12.1. 9:30	15.1. 10:30	Schnee/ Regen, wenig Sonne, Wind, Bewölkt	S*	0.4	11.2	E	0.4	1.19			E	0.37	2.47							0.39	0.39	0.80	
4-BV-07A*	1970	29.2. 16:00	3.3. 17:00	Schnee, Sonne, Regen	NW	0.58	4.8	NW	0.75	4.69	NW	0.63	4.53	NW	0.62	4.47	NW	0.47	5.2	NW	0.64	4.54	0.62	0.89	1.40
4-BV-07B*	1970	4.3. 14:00	7.3. 15:00	Sonne, Schnee, Bewölkt				SO	0.67	1.9	SO	0.61	0.96							SO	0.61	1.8	0.63	0.89	1.40
6-DM-01**	1973	11.12. 17:00	14.12. 17:00					NE	0.93	3.03	SE	0.81	0.56							NE	0.98	2.88	0.91	0.87	1.40
6-DM-02	1983	15.12. 15:00	18.12. 16:00					NE	0.41	16.2										NE	0.27	16.7	0.34	0.27	0.80
6-DM-	1978	19.1. 19:00	22.1. 22:00	Bewölkt,	N	0.3	1.36	N	0.32	1.26										S	0.3	7.08	0.31	0.36	0.80



UFELD: Feldmessungen von U-Werten zur Überprüfung der im Gebäudeenergieausweis (GEAK) hinterlegten U-Werte

03		9:45	10:15	Schnee, Sonne																					
6-DM-04	1980	19.1. 14:15	22.1. 14:30	Bewölkt, Schnee, Sonne						NE	0.52	3.46	NE	0.57	2.37			S	0.51	2.62	0.53	0.33	0.80		
6-DM-05*	1957	22.1. 16:30	25.1. 16:45	Sonne, Nebel			N	1.2	0.62								N	1.08	0.32	1.14	1.07	1.40			
6-DM-06*	1968	26.1. 8:45	29.1. 9:00	Sonne, Bewölkt, Regen	W	1	0.02								<del>W</del>	-	<del>5.15</del>			1.00	1	1.40			
7-VH-01*	1760	12.2. 12:15	15.2. 14:00	Regen/ Schnee, leichte Sonne, Bewölkt	SE	0.4	2.55	NE	0.85	4.37	SE	0.53	2.11	NE	0.67	5.24	NE	0.7	4.86	SE	0.61	2.6	0.63	0.62	2.00
8-HH-02**	1970	15.1. 16:00	18.1. 16:30	Sonne, Schnee, Bewölkt						NE	0.4	0.73				NE	0.36	0.02	SW	0.17	0.62	0.38	0.58	1.40	
8-HH-04	1982	26.1. 10:30	29.1. 10:30	Sonne, Bewölkt, Regen			E	0.33	2.73			E	0.2	4.15			E	0.19	2	0.24	0.26	0.60			
8-HH-05**	1963	5.2. 13:30	8.2. 13:30	Sonne, Bewölkt, Regen	N	1.02	1.96			N	1.09	1.63				N	1.04	2.09	N	0.95	1.51	1.02	0.85	1.40	
8-HH-06	1983	9.2. 9:00	12.2. 9:00	Schnee/ Regen, Wind, Bewölkt, Sonne	N	0.76	1.03			N	0.87	1.89				N	0.55	0.41	N	0.42	1.4	0.65	0.43	0.60	



9-HR-01A	1841	15.3. 9:30	18.3. 11:00	Kühl, bedeckt, Sonne	N	0.85	2.81				N	0.72	2.91				N	0.86	2.47				0.81	0.69	0.66
9-HR-01B	1841	15.3. 9:31	18.3. 11:01	Kühl, bedeckt, Sonne				N	0.73	2.8				N	0.7	2.83							0.72	0.49	0.66

**Erläuterung:** *kursiv: Ungültige Messungen; kursiv und durchgestrichen: Messgerät defekt*

Messungen an sanierten Wänden – nicht Bestandteil der Untersuchung und nicht im Mittelwert einberechnet

\*vor 1976

\*\*vor 1976, gedämmt



## Anhang 2 $\lambda$ -Werte Bruchsteinmauerwerk

Die SIA 279 gibt als tiefsten  $\lambda$ -Wert für Bruchstein mit 2.20 W/(mK) (S. 13) (sonst sind die  $\lambda$ -Werte 3.0 oder höher).

Stoffgruppe oder Anwendung	Rohdichte $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Bemessungs- wärmeleit- fähigkeit $\lambda$ W/(m·K)
<b>Mauerwerk unverputzt</b>		
Modulbackstein Einstein	1100	0.44
Modulbackstein Verband	1100	0.37
Isolierbackstein	1200	0.47
Sichtbackstein	1400	0.52
Kaminstein	1800	0.80
Kalksandstein	1600	0.80
	1800	1.00
	2000	1.10
Zementstein	2000	1.10
Zementblockstein	1200	0.70
Porenbetonstein	300	0.10
	400	0.13
	500	0.16
	600	0.19
<b>Gestein</b>		
Kristalliner Naturstein	2800	3.5
Sediment-Naturstein	2600	2.3
Basalt	2700 - 3000	3.5
Granit	2500 - 2700	2.8
Marmor	2800	3.5
Schiefer	2000 - 2800	2.2
Sandstein (Quarzit)	2600	2.3
<b>Erdreich</b>		
Ton, Schlack oder Schlamm	1200 - 1800	1.5
Sand und Kies	1700 - 2200	2.0
<b>Beton <sup>1</sup></b>		
Mittlere Rohdichte	1800	1.15
	2000	1.35
	2200	1.65
Hohe Rohdichte	2400	2.00
Armirt (mit 1% Stahl)	2300	2.3
Armirt (mit 2% Stahl)	2400	2.5
<b>Putze, Mörtelschichten</b>		
Innenputz für normale Berechnungen	1400	0.70
Aussenputz für normale Berechnungen	1800	0.87
Wärmedämmputz aussen	300	0.08
	450	0.14
Kalkmörtel	1800	0.87
Kalkzementmörtel	1900	1.00
Zementmörtel	2200	1.40
Gipsdämmputz	600	0.18
Gipsputz	1000	0.40
	1300	0.57

Abbildung 26:  $\lambda$ -Werte verschiedene Baustoffe Bauteilkatalog BFE (S. 13)



Dieser  $\lambda$ -Wert wird im Bauteilkatalog für Sanierungen „U-Wert-Berechnung und Bauteilkatalog - Sanierungen“ des BFE wiedergefunden. Der Bauteilkatalog zeigt dann später eine Beispielkonstruktion mit Bruchstein ohne Dämmung auf (S. 32).

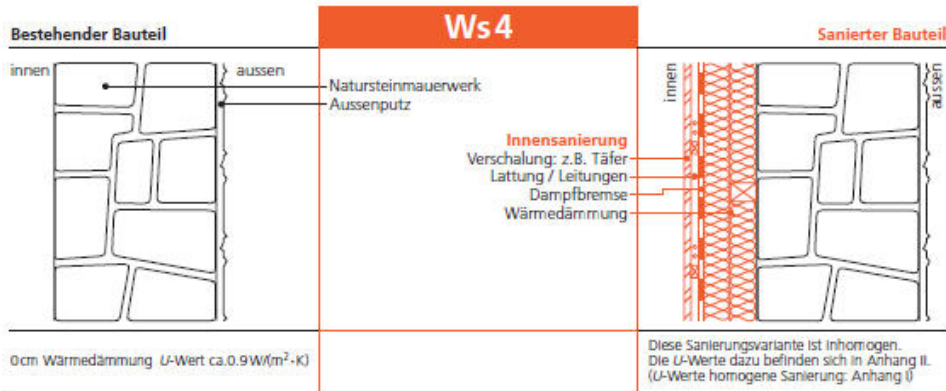


Abbildung 27: Beispielkonstruktion Bruchstein-Mauerwerk (Bauteilkatalog BFE, S. 32)

Der mit 0.9 W/(m<sup>2</sup>K) deklarierte U-Wert für diese Wand lässt sich mit dem oben genannten  $\lambda$ -Wert von 2.2 W/(mK) nur mit einer Wandstärke von 2 m ergeben, was sehr unrealistisch scheint, selbst wenn die Wand als inhomogen inkl. 15% Mörtelschicht ( $\lambda$ -Wert Kalkmörtel gemäss SIA 279 und Bauteilkatalog mit 0.86 resp. 0.87 W/(mK)) gerechnet wird.

No	Bezeichnung:	=b	U-Wert total:	$\theta_{oi}$	
5	BM Bauteilkatalog BFE		0.90 W/m <sup>2</sup> K	16.9 °C	
			d [cm]	$\alpha / \lambda$	R
1	Wärmeübergang innen		8	0.13	
2					
3	Bruchstein nach SIA 279 (Schiefer)	200	2.2	0.91	
4	Aussenputz nach SIA 279	3	0.86	0.03	
5					
6					
7					
8					
9					
10	Wärmeübergang aussen		25	0.04	

No	Bezeichnung:	=b	U-Wert total:	$\theta_{oi}$	
19	BM Bauteilkatalog BFE		0.90 W/m <sup>2</sup> K		
	Oberer Grenzwert $R_{0i} = 1.11$ Unterer Grenzwert $R_{0e} = 1.1$ Wärmedurchgangswiderstand $R_{tot} = 1.11 \text{ m}^2\text{K/W}$				
1. Abschnitt			U-Wert:	$\theta_{oi}$	
Länge des Abschnittes L1 85 %			0.98 W/m <sup>2</sup> K	16.6 °C	
			d [cm]	$\alpha / \lambda$	R
1	Wärmeübergang innen		8	0.13	
2					
3	Bruchstein nach SIA 279 (Schiefer)	180	2.2	0.82	
4	Aussenputz nach SIA 279	3	0.86	0.03	
5					
6					
7					
8					
9					
10	Wärmeübergang aussen		25	0.04	
2. Abschnitt			U-Wert:	$\theta_{oi}$	
Länge des Abschnittes L2 15 %			0.44 W/m <sup>2</sup> K	18.4 °C	
			d [cm]	$\alpha / \lambda$	R
1	Wärmeübergang innen		8	0.13	
2					
3	Kalkmörtel nach SIA 279	180	0.86	2.09	
4	Aussenputz nach SIA 279	3	0.86	0.03	
5					
6					
7					
8					
9					
10	Wärmeübergang aussen		25	0.04	

Abbildung 28: U-Wert-Berechnung Bruchsteinmauerwerk mit U-Wert 0.90 W/(m<sup>2</sup>K)



Typischerweise sind Bruchstein-Wände an der dicksten Stelle ca. 50 cm stark. Deswegen wird vermutet, dass der U-Wert der Bruchsteinwand im Bauteilkatalog mit einem anderen, viel besseren  $\lambda$ -Wert als die angegebenen 2.2-3.0 W/(mK) berechnet wurde. Wenn der  $\lambda$ -Wert von Bruchstein mit einer Wandstärke von 50 cm zum U-Wert von 0.90 W/(m<sup>2</sup>K) aus dem Bauteilkatalog berechnet wird, ergibt dies einen  $\lambda$ -Wert von 0.55 W/(mK).

No	Bezeichnung:	=b	U-Wert total:		$\theta_{ol}$
6	BM Bauteilkatalog BFE		0.90	W/m <sup>2</sup> K	16.9 °C
			d [cm]	$\alpha / \lambda$	R
1	Wärmeübergang innen			8	0.13
2					
3	Bruchstein neu (BTK BFE)		50	0.55	0.91
4	Aussenputz nach SIA 279		3	0.86	0.03
5					
6					
7					
8					
9					
10	Wärmeübergang aussen			25	0.04

**Abbildung 29:** Berechnung vom notwendigen  $\lambda$ -Wert von Bruchstein um einen U-Wert von 0.90 W/(m<sup>2</sup>K) zu erhalten mit einer Wandstärke von 50 cm

Ob der neue  $\lambda$ -Wert für Bruchstein mit 0.55 W/(mK) der Richtige ist, kann noch nicht abschliessend deklariert werden. Die Messungen zeigen allerdings, dass der SIA-deklarierte  $\lambda$ -Wert definitiv zu hoch ist. GEAK-Experten, die einen realistischen U-Wert für Bruchstein-Wände eingeben wollen, sollen lieber den U-Wert aus dem BFE-Katalog nehmen oder allenfalls die Wände mit dem gSKIN-Messgerät genau bestimmen.





## Anhang 3 Musterberechnung Transmissionswärmeverlust mit/ohne Sonnenschein

Aus Abbildung 30 und Tabelle 13 unten sind die U-Werte ohne Sonnenschein (für Boden, Decke, Wände N, O und S und W-Wand an Tagen ohne Sonnenschein eingesetzt) und mit Sonnenschein (für Westwand an sonnigen Tagen eingesetzt) ermittelt und zusammengefasst worden.

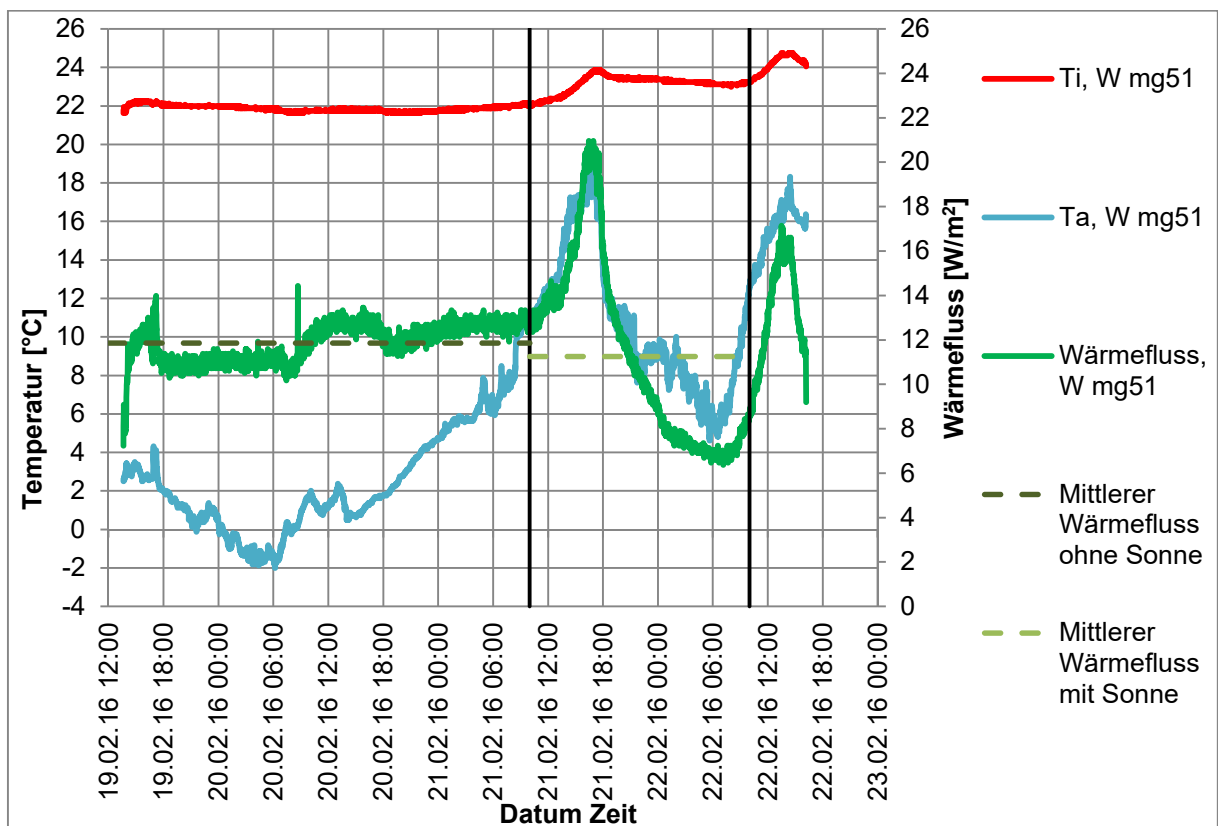


Abbildung 30: Wärmefluss (grün), Innen- (rot) und Aussentemperatur (blau) Objekt 5-BH-01

Kenngrosse	mit Sonne	ohne Sonne	% Unterschied
Mittlerer Wärmefluss gemessen [W/m <sup>2</sup> ]	11.26	11.86	-5%
Mittlerer Innentemperatur [°C]	23.1	21.9	
Mittlerer Aussentemperatur [°C]	10.6	2.5	
Temperaturunterschied innen/aussen [°C]	12.5	19.4	-35%
U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	0.90	0.61	47%

Tabelle 13: Wärmefluss, U-Wert mit und ohne Sonne Objekt 5-BH-01 (im Februar)



Diese U-Werte wurden im SIA 380/1 Berechnungsprogramm entech (V. 5.4) eingesetzt und den daraus resultierenden Wärmeverlust für den Betrachtungsmonat (in diesem Fall Februar) berechnet.

Bauteile und U-Werte ohne Sonne

Bauteilheizung		Nord				Ost					
Wand gegen aussen:		Wand	Fenster	Wand ohne Fenster	Nr.	U-Wert	Wand	Fenster	Wand ohne Fenster	Nr.	U-Wert
<input type="checkbox"/>	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61
<input type="checkbox"/>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>		
<input type="checkbox"/>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>		
<input type="checkbox"/>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>		
<input type="checkbox"/>	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61
Türe gegen aussen:		m <sup>2</sup>		W/m <sup>2</sup> K		m <sup>2</sup>		W/m <sup>2</sup> K			
Total Nordfassade:		25.0 m <sup>2</sup>		0.61 W/m <sup>2</sup> K		25.0 m <sup>2</sup>		0.61 W/m <sup>2</sup> K			
Bauteilheizung		West				Süd					
Wand gegen aussen:		Wand	Fenster	Wand ohne Fenster	Nr.	U-Wert	Wand	Fenster	Wand ohne Fenster	Nr.	U-Wert
<input type="checkbox"/>	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61
<input type="checkbox"/>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>		
<input type="checkbox"/>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>		
<input type="checkbox"/>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>		
<input type="checkbox"/>	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61
Türe gegen aussen:		m <sup>2</sup>		W/m <sup>2</sup> K		m <sup>2</sup>		W/m <sup>2</sup> K			
Total Westfassade:		25.0 m <sup>2</sup>		0.61 W/m <sup>2</sup> K		25.0 m <sup>2</sup>		0.61 W/m <sup>2</sup> K			
Heizung		Wände:			Tiefe im Erdreich	Wanddicke	b-Wert	Unbeheizter Raum oder Erdreich:			
<input type="checkbox"/>	1. Wand gegen Erdreich	Flächen	Nr.	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	m	m	1.00	Methode:	SIA 380 / 1		
<input type="checkbox"/>	2. Wand gegen Erdreich	m <sup>2</sup>			m	m	1.00	Frostriegel:	kein Frostriegel		
<input type="checkbox"/>	1. Wand gegen beheizt	m <sup>2</sup>			Temp Nachb:	°C		Bodenmaterial:	Ton oder Silt		
<input type="checkbox"/>	2. Wand gegen beheizt	m <sup>2</sup>			Temp Nachb:	°C		* H = Höhe, D = Dämmstärke, l = λ-Wert Dämmst.			
<input type="checkbox"/>	1. Wand gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00				
<input type="checkbox"/>	2. Wand gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00				
<input type="checkbox"/>	3. Wand gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00				
<input type="checkbox"/>	Türen gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00				
Heizung		Boden:			Tiefe im Erdreich	Perimeterlänge	b-Wert	Unbeheizter Raum oder Erdreich:			
<input checked="" type="checkbox"/>	1. Boden gegen aussen	Flächen	Nr.	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	m	m	1.00	Methode:	SIA 380 / 1		
<input checked="" type="checkbox"/>	2. Boden gegen aussen	m <sup>2</sup>			m	m	1.00	* B = Breite, D = Dämmstärke, l = λ-Wert Dämmst.	Randstreifen: keine Randstreifendämmung		
<input checked="" type="checkbox"/>	1. Boden gegen Erdreich	100.0 m <sup>2</sup>		0.61	0.61	m	1.00	Bodenmaterial:	Ton oder Silt		
<input checked="" type="checkbox"/>	2. Boden gegen Erdreich	m <sup>2</sup>			m	m	1.00				
<input checked="" type="checkbox"/>	1. Boden gegen unbeheizt:	m <sup>2</sup>					1.00				
<input checked="" type="checkbox"/>	2. Boden gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00				
<input type="checkbox"/>	Treppe / Lift gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00				
<input type="checkbox"/>	1. Boden gegen beheizt	m <sup>2</sup>			Temp Nachb:	°C		(inkl. Regelungszuschlag Δθ <sub>i</sub> des Nachbarraums)			
<input type="checkbox"/>	2. Boden gegen beheizt	m <sup>2</sup>			Temp Nachb:	°C		(inkl. Regelungszuschlag Δθ <sub>i</sub> des Nachbarraums)			
Heizung		Dach:			Temp.		Unbeheizter Raum				
<input type="checkbox"/>	Dachfenster (horizontal)	Flächen	Nr.	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	ben. Raum	b-Wert					
<input type="checkbox"/>	1. Flachdach	100.0 m <sup>2</sup>		0.61	W/m <sup>2</sup> K	1.00					
<input type="checkbox"/>	2. Flachdach	m <sup>2</sup>			W/m <sup>2</sup> K	1.00					
<input type="checkbox"/>	Schrägdach	m <sup>2</sup>			W/m <sup>2</sup> K	1.00					



Wärmeverlust im Februar ohne Sonne

A: Objekt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
<b>B: Klimadaten</b>													
Tage im Monat :	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	Tage
Mitteltemp. Heizperiode Theta <sub>e</sub> :	0.4	1.6	5.5	8.4	13.4	16.2	18.4	18.4	14.0	9.9	4.2	1.8	9.4 °C
Länge der Heizperiode t <sub>c</sub> :	31	28	31	23	16	5	2	3	8	22	29	31	229 Tage
Globalstrahlung horizontal :	104	165	311	417	536	570	595	522	355	214	109	80	3'978 MJ/m <sup>2</sup> a
Globalstrahlung Süd:	177	235	313	290	284	270	297	332	311	254	158	137	3'058 MJ/m <sup>2</sup> a
Globalstrahlung Ost:	67	109	185	233	281	295	311	287	192	112	62	51	2'185 MJ/m <sup>2</sup> a
Globalstrahlung West:	80	123	198	231	287	303	327	295	218	142	75	59	2'338 MJ/m <sup>2</sup> a
Globalstrahlung Nord :	43	63	94	111	150	166	166	134	91	62	39	32	1'151 MJ/m <sup>2</sup> a
<b>F: Transmissionswärmeverlust:</b>													
Decke gegen aussen :	32.0	27.2	23.7	18.3	10.8	6.0	2.6	2.6	9.5	16.5	25.0	29.7	204 MJ/m <sup>2</sup> a
Decke gegen unbeheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Decke gegen beheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Wand gegen aussen :	32.0	27.2	23.7	18.3	10.8	6.0	2.6	2.6	9.5	16.5	25.0	29.7	204 MJ/m <sup>2</sup> a
Wand gegen unbeheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Wand gegen Erdreich :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Wand gegen beheizt:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Boden gegen aussen :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Boden gegen unbeheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Boden gegen Erdreich :	32.0	27.2	23.7	18.3	10.8	6.0	2.6	2.6	9.5	16.5	25.0	29.7	204 MJ/m <sup>2</sup> a
Boden gegen beheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster horizontal :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster Süd :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster Ost :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster West :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster Nord :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Wärmebrücken:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Lucido / TWD:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Transmissionswärmeverlust Q <sub>T</sub> :	96.1	81.5	71.1	55.0	32.3	18.0	7.8	7.8	28.5	49.5	74.9	89.2	612 MJ/m <sup>2</sup> a



Bauteile und U-Werte mit Sonne

Fassaden:											
Bauteilheizung	<b>Nord</b>										
	<b>Wand gegen aussen:</b>										
	Wand	Fenster	Wand ohne Fenster	Nr.	U-Wert						
	mit Fenster										
	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61	0.61 W/m <sup>2</sup> K					
	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			W/m <sup>2</sup> K					
Bauteilheizung	<b>Ost</b>										
	<b>Wand gegen aussen:</b>										
	Wand	Fenster	Wand ohne Fenster	Nr.	U-Wert						
	mit Fenster										
	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61	0.61 W/m <sup>2</sup> K					
	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			W/m <sup>2</sup> K					
Bauteilheizung	<b>West</b>										
	<b>Wand gegen aussen:</b>										
	Wand	Fenster	Wand ohne Fenster	Nr.	U-Wert						
	mit Fenster										
	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.90	0.90 W/m <sup>2</sup> K					
	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			W/m <sup>2</sup> K					
Bauteilheizung	<b>Süd</b>										
	<b>Wand gegen aussen:</b>										
	Wand	Fenster	Wand ohne Fenster	Nr.	U-Wert						
	mit Fenster										
	25.0 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	25.0 m <sup>2</sup>		0.61	0.61 W/m <sup>2</sup> K					
	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>			W/m <sup>2</sup> K					
Heizung	<b>Wände:</b>										
			<b>Flächen</b>	<b>Nr.</b>	<b>U-Wert [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>Tiefe im Erdreich</b>	<b>Wanddicke</b>	<b>b-Wert</b>	<b>Unbeheizter Raum oder Erdreich:</b>		
	<input type="checkbox"/>	1. Wand gegen Erdreich	m <sup>2</sup>			m	m	1.00	Methode:	SIA 380 / 1	
	<input type="checkbox"/>	2. Wand gegen Erdreich	m <sup>2</sup>			m	m	1.00	Frostriegel:	* kein Frostriegel	
	<input type="checkbox"/>	1. Wand gegen beheizt	m <sup>2</sup>			Temp Nachb:	°C		Bodenmaterial:	Ton oder Schluff	
	<input type="checkbox"/>	2. Wand gegen beheizt	m <sup>2</sup>			Temp Nachb:	°C		* H = Höhe, D = Dämmstärke, l = λ-Wert Dämmst.		
	<input type="checkbox"/>	1. Wand gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00			
	<input type="checkbox"/>	2. Wand gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00			
	<input type="checkbox"/>	3. Wand gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00			
	<input type="checkbox"/>	Türen gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00			
Heizung	<b>Boden:</b>										
			<b>Flächen</b>	<b>Nr.</b>	<b>U-Wert [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>Tiefe im Erdreich</b>	<b>Perimeterlänge</b>	<b>b-Wert</b>	<b>Unbeheizter Raum oder Erdreich:</b>		
	<input checked="" type="checkbox"/>	1. Boden gegen aussen	m <sup>2</sup>					1.00	Methode:	SIA 380 / 1	
	<input checked="" type="checkbox"/>	2. Boden gegen aussen	m <sup>2</sup>					1.00	* B = Breite, D = Dämmstärke, l = λ-Wert Dämmst.		
	<input type="checkbox"/>	1. Boden gegen Erdreich	100.0 m <sup>2</sup>		0.61	0.61	m	m	1.00	Randstreifen:	* keine Randstreifendämmung
	<input checked="" type="checkbox"/>	2. Boden gegen Erdreich	m <sup>2</sup>			m	m	1.00	Bodenmaterial:	Ton oder Schluff	
	<input checked="" type="checkbox"/>	1. Boden gegen unbeheizt:	m <sup>2</sup>					1.00			
	<input checked="" type="checkbox"/>	2. Boden gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00			
	<input type="checkbox"/>	Treppe / Lift gegen unbeheizt	m <sup>2</sup>					1.00			
	<input type="checkbox"/>	1. Boden gegen beheizt	m <sup>2</sup>			Temp Nachb:	°C		(inkl. Regelungszuschlag Δ <sub>ei</sub> des Nachbarraums)		
<input type="checkbox"/>	2. Boden gegen beheizt	m <sup>2</sup>			Temp Nachb:	°C		(inkl. Regelungszuschlag Δ <sub>ei</sub> des Nachbarraums)			
Heizung	<b>Dach:</b>										
			<b>Flächen</b>	<b>Nr.</b>	<b>U-Wert [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>Temp. ben. Raum</b>	<b>b-Wert</b>	<b>Unbeheizter Raum</b>			
	<input type="checkbox"/>	Dachfenster (horizontal)	m <sup>2</sup>			W/m <sup>2</sup> K		1.00			
	<input type="checkbox"/>	1. Flachdach	100.0 m <sup>2</sup>		0.61	0.61 W/m <sup>2</sup> K		1.00			
	<input type="checkbox"/>	2. Flachdach	m <sup>2</sup>			W/m <sup>2</sup> K		1.00			
<input type="checkbox"/>	Schrägdach	m <sup>2</sup>			W/m <sup>2</sup> K		1.00				



Wärmeverlust im Februar mit Sonne

A: Objekt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
<b>B: Klimadaten</b>													
Tage im Monat :	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	Tage
Mitteltemp. Heizperiode $\Theta_{he}$ :	0.4	1.6	5.5	8.4	13.4	16.2	18.4	18.4	14.0	9.9	4.2	1.8	9.4 °C
Länge der Heizperiode $t_c$ :	31	28	31	23	16	5	2	3	8	22	29	31	229 Tage
Globalstrahlung horizontal :	104	165	311	417	536	570	595	522	355	214	109	80	3'978 MJ/m <sup>2</sup> a
Globalstrahlung Süd:	177	235	313	290	284	270	297	332	311	254	158	137	3'058 MJ/m <sup>2</sup> a
Globalstrahlung Ost:	67	109	185	233	281	295	311	287	192	112	62	51	2'185 MJ/m <sup>2</sup> a
Globalstrahlung West:	80	123	198	231	287	303	327	295	218	142	75	59	2'338 MJ/m <sup>2</sup> a
Globalstrahlung Nord :	43	63	94	111	150	166	166	134	91	62	39	32	1'151 MJ/m <sup>2</sup> a
<b>F: Transmissionswärmeverlust:</b>													
Decke gegen aussen :	32.0	27.2	23.7	18.3	10.8	6.0	2.6	2.6	9.5	16.5	25.0	29.7	204 MJ/m <sup>2</sup> a
Decke gegen unbeheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Decke gegen beheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Wand gegen aussen :	35.8	30.4	26.5	20.5	12.1	6.7	2.9	2.9	10.6	18.5	28.0	33.3	228 MJ/m <sup>2</sup> a
Wand gegen unbeheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Wand gegen Erdreich :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Wand gegen beheizt:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Boden gegen aussen :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Boden gegen unbeheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Boden gegen Erdreich :	32.0	27.2	23.7	18.3	10.8	6.0	2.6	2.6	9.5	16.5	25.0	29.7	204 MJ/m <sup>2</sup> a
Boden gegen beheizt :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster horizontal :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster Süd :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster Ost :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster West :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Fenster Nord :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Wärmebrücken:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Lucido / TWD:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 MJ/m <sup>2</sup> a
Transmissionswärmeverlust $Q_T$ :	99.9	84.7	73.9	57.2	33.6	18.7	8.2	8.2	29.6	51.5	77.9	92.7	636 MJ/m <sup>2</sup> a

Die Resultate zusammengefasst

Kenngrosse	mit Sonne	ohne Sonne	% Unterschied
Mittlerer Wärmefluss gemessen [W/m <sup>2</sup> ]	11.26	11.86	-5%
Mittlerer Innentemperatur [°C]	23.1	21.9	
Mittlerer Aussentemperatur [°C]	10.6	2.5	
Temperaturunterschied innen/aussen [°C]	12.5	19.4	-35%
U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	0.90	0.61	47%
Wärmeverlust über alle Wände [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	30.38	27.15	12%
Wärmeverlust ganzes Gebäude [kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> ]	84.69	81.46	4%

Tabelle 14: Wärmefluss, U-Wert und Wärmeverlust mit und ohne Sonne Objekt 5-BH-01 (im Februar)



## Anhang 4 Detaillierte Ergebnisblätter aller Messungen

Auf den darauffolgenden Seiten finden sich Ergebnisblätter von allen Messungen, die für dieses Projekt unternommen wurden. Es sind auch solche Messungen hier aufgeführt, die für das Projekt nicht verwendet werden konnten da sie fehlerhaft waren, nicht geeignete Wände gemessen haben, oder Defekte am Messgerät im Nachhinein festgestellt wurden.

Die Blätter weisen bei jedem Objekt folgende Information auf:

- Objektbezeichnung, Ort des Gebäudes (weitere identifizierende Daten über den Standort des Gebäudes ist wegen dem Datenschutz nicht möglich), Baujahr oder ca. Baujahr und Wandtyp
- Zusammenfassung der Resultate: gemessener U-Wert, berechneter U-Wert, %-Abweichung
- Berechnung des U-Werts mit Skizze des Wandaufbaus
- Fotos der Messgeräteplatzierung, allenfalls mit Planunterlagen

Ähnliche Blätter wurden den einzelnen Eigentümern abgegeben.