



**Schlussbericht** 13. März 2012

---

## **Erneuerung Fichtenstrasse 14, Zürich**

Sanierung der Fassade des denkmalgeschützten  
Mehrfamilienhauses aus dem Jahr 1877 mit verputzter  
Aerogel Hochleistungswärmedämmung einschliesslich  
Erfolgskontrolle

---

**Auftraggeber:**

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

**Auftragnehmer:**

Vera Gloor AG  
Krönleinstrasse 27  
CH-8044 Zürich  
[www.veragloor.ch](http://www.veragloor.ch)

**Autoren:**

Martin Wenger, Vera Gloor AG, [wenger@veragloor.ch](mailto:wenger@veragloor.ch)  
Dr. Karim Ghazi Wakili, Empa, [karim.ghaziwakili@empa.ch](mailto:karim.ghaziwakili@empa.ch)  
Bruno Binder, Empa, [bruno.binder@empa.ch](mailto:bruno.binder@empa.ch)  
Christoph Tanner, Bauchek-Tanner, [bct@bauchek-tanner.ch](mailto:bct@bauchek-tanner.ch) (Anhang)

**BFE-Bereichsleiter:** Andreas Eckmanns

**BFE-Programmleiter:** Charles Filleux

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 500533-01 / 500533

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

## Zusammenfassung

Die Energiebilanz des denkmalgeschützten Gebäudes aus dem Jahr 1877 konnte dank der verputzten Aerogel Hochleistungswärmedämmung unter Wahrung des Erscheinungsbildes stark verbessert werden. Aus denkmalpflegerischen Gründen hätten bei der Erneuerung der Fassade nicht einmal die Anforderungen nach Einzelbauteilen erreicht werden müssen. Das Gebäude erfüllt dennoch die Anforderungen nach SIA 380/1 für Sanierungen. Erst dadurch konnte die neue Erdsonden-Wärmepumpe mit Bodenheizung und einer tiefen Vorlauftemperatur und der dadurch möglichen hohen Effizienz realisiert werden. Ein CO<sub>2</sub>-freier Betrieb des Gebäudes ist möglich.

Im Rahmen der Erfolgskontrolle wurde vorgängig mit Hilfe von Prüfkörpern die Wärmeleitfähigkeit der Aerogelmatten ermittelt und der U-Wert der Aussenwandkonstruktion berechnet. Am Objekt wurde der U-Wert mit drei verschiedenen Methoden gemessen. Es konnte eine gute Übereinstimmung der gemessenen U-Werte mit den drei Methoden festgestellt werden, die Abweichungen betragen weniger als 10 %.

Die Wärmebilder des sanierten Gebäudes und des unsanierten Nachbargebäudes zeigen die erheblichen Unterschiede zwischen gedämmten und ungedämmten Konstruktionen. Zudem sind die Fenstereinfassungen aus Sandstein als konstruktiv bedingte Wärmebrücken gut zu erkennen.

## Abstract

The energy balance of a protected old building constructed in 1877 has been improved substantially by means of an aerogel containing fibrous insulation without affecting the external appearance of the construction. Due to special considerations in case of protected buildings the retrofitted façade did not need to comply with the requirements normally expected from single building details. Nevertheless, the retrofitted building fulfills the requirements for retrofitting of the Swiss standard SIA 380/1. This enabled the use of a geothermal heat pump as supply for a floor heating system with a low inlet temperature and high efficiency. Additionally, a CO<sub>2</sub> free operation of the building has been enabled.

As part of the performance check the thermal conductivity of the specimens including Aerogel containing fibrous insulation as well as the theoretical U-value of exterior wall construction was determined previously. The U-value of the walls was measured by the in-situ method and evaluated using three different calculation methods. The results of the theoretical calculations and of the three calculation methods using the in-situ measured values for determining the U-values matched within 10%.

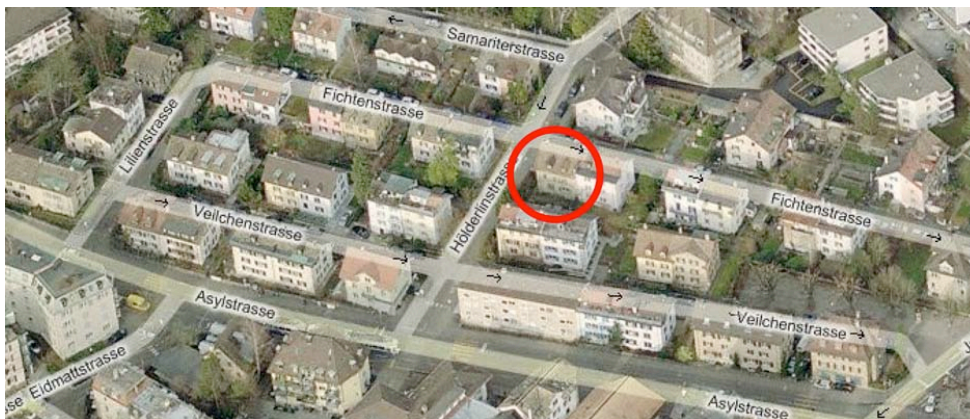
The thermal images of the renovated building and the non-renovated neighboring building, show significant differences between insulated and non-insulated structures. In addition, the window frames made of sandstone as design-related thermal bridges are clearly visible.

# Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage.....	5
2. Zielsetzung .....	5
3. Vorgehen .....	5
3.1. Konstruktion.....	5
3.3. Reduktion der Wärmeverluste .....	7
3.4. Heizsystem .....	7
3.5. Photovoltaikfläche .....	8
3.6. Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	8
4. Vor- Ortmessung des U-Wertes nach ISO 9869 .....	9
4.1. Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit.....	9
4.2. Rechnerische Bestimmung des U-Wertes (Abschätzung) .....	10
4.3. Messinstallationen am Objekt.....	12
4.4. Messdatenanalyse.....	14
4.5 Mittelwertmethode über ganze Periode.....	15
4.6 Mittelwertmethode nach ISO 9869 / prEN 12494 .....	17
4.7 Dynamische Messdatenanalyse nach der Methode ISO 9869 .....	20
4.8 Fehlerabschätzung .....	23
4.9 Zusammenfassung der Resultate.....	25
5. Kontrollmessungen (Aussenluft).....	26
6. Referenzen .....	28
7. Anhang .....	28

# 1. Ausgangslage

Das Gebäude an der Fichtenstrasse 14 wurde 1877 erstellt und ist Teil der von 1873 bis 1889 in vier Etappen erstellten Aktienbausiedlung Sonnenbergquartier; die Siedlung ist städtebaulich und denkmalpflegerisch wertvoll.



**Bild 1:** Luftaufnahme mit Einkreisung des erneuerten Objektes

Daher ist zwingend notwendig, dass das Erscheinungsbild nicht durch Sanierungs-Massnahmen beeinträchtigt wird. Trotzdem sind eine gute Energiebilanz und vor allem die CO<sub>2</sub>-Freiheit im Betrieb des Gebäudes angestrebt. Über «klassisches» Dämmen der Fassade ist dies nicht zu erreichen.

## 2. Zielsetzung

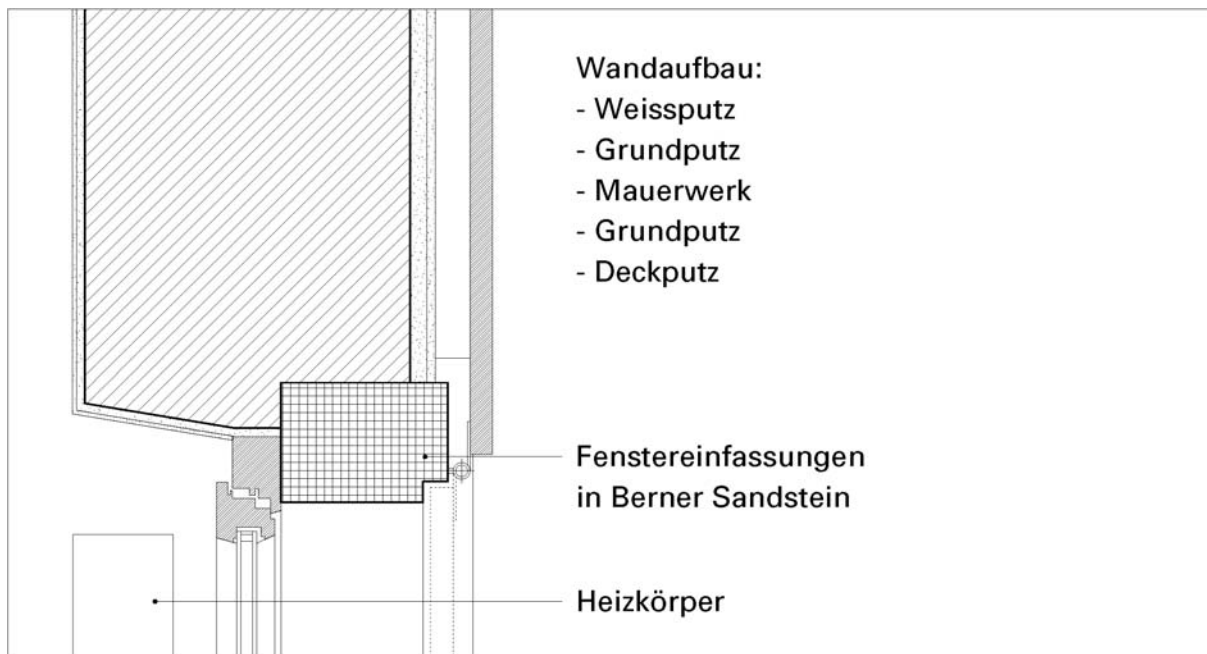
- Starke Verbesserung der Energiebilanz
- CO<sub>2</sub>-Freiheit im Betrieb des Gebäudes
- Wahrung des Erscheinungsbildes
- Erfolgskontrolle

## 3. Vorgehen

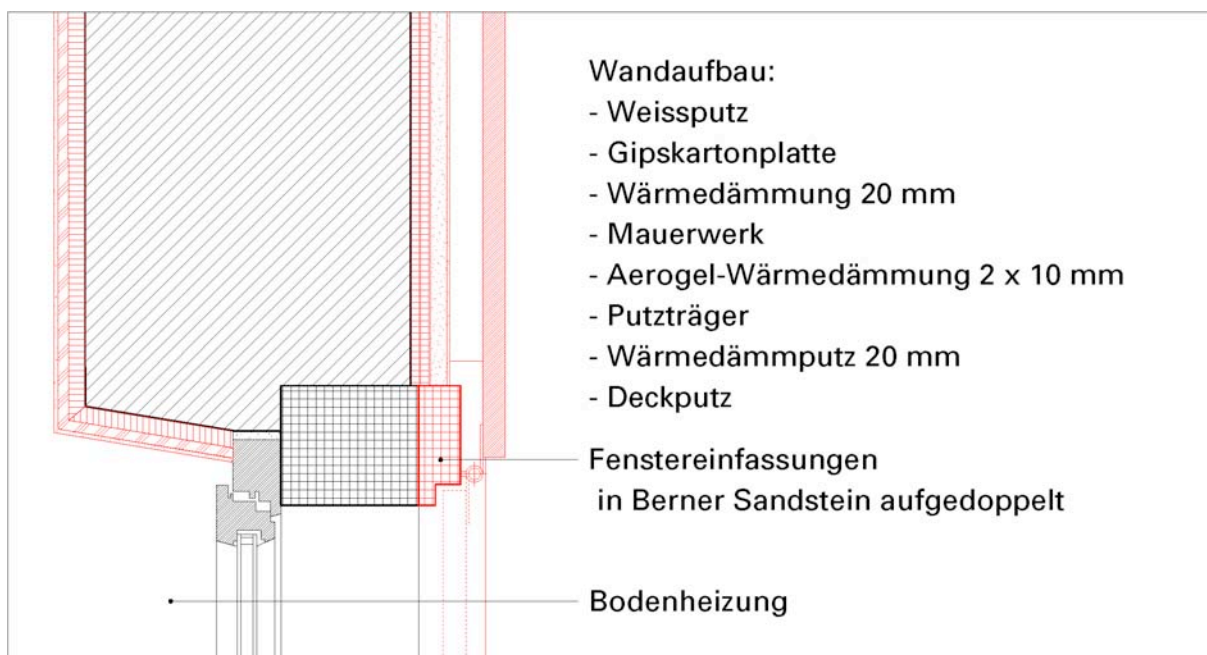
### 3.1. Konstruktion

Das Dach und die Kellerdecke werden optimal auf konventionelle Weise mit Mineralwolle gedämmt. Hingegen kann die Fassade aus denkmalpflegerischen Gründen nicht mit einer gewöhnlichen Aussenwärmedämmung versehen werden. Eine dünne, aber leistungsfähige Dämmung der Aussenhaut mit 2 cm Aerogel-Hochleistungswärmedämmung plus 2 cm Wärmedämmputz ermöglicht die Bewahrung des beste-

henden Erscheinungsbildes bei drastischer Verringerung der Wärmeverluste. Das Gebäude erfüllt dadurch die Anforderungen nach SIA 380/1 für Sanierungen.



**Bild 3.1.1:** Fassadenaufbau vor der Sanierung



**Bild 3.1.2:** Fassadenaufbau nach der Sanierung

### 3.2. Verarbeitung Fassadendämmung

Die erste Lage der Aerogel-Wärmedämmung (10 mm) wurde mit einem Mineralkleber vollflächig auf das bestehende Mauerwerk geklebt, dabei spielte es keine Rolle, dass das Mauerwerk Unebenheiten aufwies. Die zweite Lage (10 mm) wurde mit versetzten Stössen punktuell mit Baukleber fixiert. Das geschweisste Drahtnetz als

Putzträger (Armanet-D, Distanet) wurde mit Dämmplattendübeln befestigt. Danach wurde der Wärmedämmputz (Röfix 888 Zement-Luftkalkgrundputz mit Perlitezuschlag 20mm) aufgetragen. Die Profilierungen der Gebäudeecken und des Gebäudesockels sind auch mit dem Dämmputz ausgebildet worden. Beim Auftragen und Abfilzen des Deckputzes (Röfix Renostar) sind gewisse Unebenheiten in Kauf genommen worden. Die Fassade wurde farblos grundiert (Keim-Fixativ) und zweimal in der Farbe RAL 9010 gestrichen (Keim-Granital).

### **3.3. Reduktion der Wärmeverluste**

Auf diese Weise kann gemäss den Berechnungen des Bauphysikers der Heizwärmebedarf  $Q_h$  von  $475 \text{ MJ/m}^2$  auf  $170 \text{ MJ/m}^2$  oder  $47 \text{ kWh/m}^2$  verringert werden, eine Reduktion um 65%.

Der U-Wert der Aussenwand wird durch die 10+10+20 mm Aussendämmung von  $1,89 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $0,48 \text{ W/m}^2\text{K}$  reduziert. Zusätzlich wurden grösstenteils 2 cm Innendämmung angebracht, was den tatsächlichen U-Wert um einiges reduziert.

Die Behaglichkeit im Inneren wird gegenüber dem ursprünglichen Zustand deutlich gesteigert, lediglich im Bereich der Fensterleibungen werden Temperaturen unter  $15^\circ\text{C}$  auftreten.

### **3.4. Heizsystem**

Die bestehende Ölheizung mit Heizkörpern wurde ersetzt durch eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Bodenheizung.

Wärmeerzeugung:

Sole-Wasser-Wärmepumpe, monovalent Typ Oertli Typ 110 HG mit Heissgasnutzung und Freikühlung, 1-stufig, mit witterungsgeführtem TEM-Regler, die Leistung bei B0 / W 35 beträgt  $9,7 \text{ kW}$ .

Warmwasseraufbereitung:

Wärme- und Kombispeicher 950 Liter mit Elektroheizeinsatz zur Nachheizung mit einer Leistung von 2 bis  $6 \text{ kW}$ . Integralboiler 320 Liter komplett mit Wärmetauscher sowie Solar-Wärmetauscher als Vorsehung. Die Aufheizung erfolgt durch die Sole-Wasser-Wärmepumpe.

Erdsonde:

Sondenbohrung mit versetzen von Duplex-Sonden mit einem von Durchmesser  $40 \text{ mm}$ . Bohrtiefe 185 Meter mit Beton-Fertiggemisch hinterfüllt sowie der Sondenverlängerung bis in das Wohnhaus.

Wärmeverteilung:

Die Wärmeverteilung erfolgt durch Steigzonen vom Keller bis in das Dachgeschoss. Auf jeder Etage sind Fussbodenheizungsverteiler installiert. Die Räume können durch Raumthermostaten nach Temperaturbedarf reguliert werden. Der eng verlegte Leitungsabstand der Fussbodenheizung (Metalplast-Heizsystem) ermöglicht eine tiefe Vorlauftemperatur im System. Die Strahlungswärme der grossflächigen Fussbodenheizung liegt auf Basis einer Vorlauftemperatur von ca. 25°C bis max. 50°C, dadurch werden Fussbodentemperaturen von angenehmen 21°C bis 27°C erreicht. Das eingebaute Wärmepumpen-Freikühlungs-Set ermöglicht im Sommer eine Kühlung der Fussbodenoberfläche. Das folglich aufgeheizte Sole-Wassergemisch wird in den Erdsondenkreislauf eingespeist und dient somit zur Erwärmung und Wirkungsgraderhöhung der Erdsondenumgebung.

### 3.5. Photovoltaikfläche

Der Mehrbedarf an Energie von 11 kWh/m<sup>2</sup> kann bei einem Einsatz einer Wärmepumpe (angenommener, durchschnittlicher COP von 5) mit etwa 2 kWh/m<sup>2</sup> zusätzlich an Strom gedeckt werden, 4/5 der benötigten Energie können aus dem Erdreich gewonnen werden.

Bei einer Energiebezugsfläche von 295 m<sup>2</sup> resultiert dieser in etwa 590 kWh Strom pro Jahr. Diese Strommenge wäre mit einer Photovoltaikfläche von ca. 2-3 m<sup>2</sup> an einem guten Standort zu decken. Die Photovoltaikfläche ist von der Denkmalpflege bewilligt worden, wurde bis heute noch nicht realisiert, könnte jedoch jederzeit nachgerüstet werden.



**Bild 3.5.1:** Aussenansicht vor der Sanierung (links) und nach der Sanierung (rechts)

### 3.6. Energie- und CO<sub>2</sub> -Bilanz

Die energetische Sanierung dieses denkmalgeschützten Gebäudes kann die Anforderungen nach SIA 380/1 erfüllen (Systemnachweis), obschon dies aus denkmalpflegerischen Gründen nicht erforderlich wäre.

Die heutige Gesetzgebung mit der Möglichkeit des Nachweises nach Einzelbauteilen nach SIA 380/1 hat zur Folge, dass bei denkmalgeschützten Gebäuden nur einzelne Bauteile verbessert werden (Fenster, Dach, Kellerdecke), oft jedoch keine Verbesse-



rungen an der Fassade erfolgen. Dadurch können die Anforderungen nach SIA 380/1 nicht erfüllt werden. Erst die Gesamtbetrachtung des Gebäudes und dessen Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz kann weiterführende Verbesserungen erwirken.

## 4. Vor- Ortmessung des U-Wertes nach ISO 9869

Die U-Wert-Messungen am Bau wurden gemäss Norm ISO 9869 durchgeführt. Zur Bestimmung des U-Wertes wurde der Wärmefluss auf der Innenseite, die Lufttemperatur innen und aussen sowie die Oberflächentemperatur innen und aussen über die Periode vom 24. Sept. 2010 bis zum 13. Dez. 2010 gemessen. Dieses Vorhaben beinhaltete folgende Messungen:

- Labormessung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Systems:  
Aerogelmatte + Dämmputz + Deckputz
- U-Wertmessung an der Nordwand, sowie an der Südwand
- IR-Aufnahmen der Fassade (separater Bericht der Firma Baucheck-Tanner in der Beilage)

### 4.1. Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit

Für die Messung wurden Prüfkörper hergestellt. Auf 2 Holzpressplatten der Abmessung 500 x 500 x 25 mm<sup>3</sup> wurden je zwei 10 mm dicke Aerogelmatten angebracht und mit dem Verputz bestehend aus Haltenetz (Putzträger), Dämmputz und Deckputz überdeckt. Die Verputzseite der Proben wurde geschliffen, bis die Oberfläche parallel zur Grundplatte war. Der Wärmewiderstand der Holzplatten alleine wurde in einer zweiten Messung bestimmt.

Materialschicht	Lagendicke (mm)	
	Probe A	Probe B
Deckputz	11.0	5.7
Dämmputz	15	16
Aerogelmatten (2 Lagen)	20.0	20.0
Grundplatte	25.0	25.0
Total	71.0	66.7

**Tabelle 4.1.1:** Schichtdicken der Proben

Materialschicht	Wärmewiderstand R (m <sup>2</sup> K/W) Mittel	Bemerkungen
Aerogel + Dämmputz + Deckputz	1.232	gemessen
Deckputz $\lambda=0.87$ W/(m·K)	0.010	Literaturwert
Wärmedämmputz $\lambda=0.1$ W/(m·K)	0.119	Literaturwert
Aerogel	1.103	

**Tabelle 4.1.2:** Wärmewiderstände der Schichten

Mit der Annahme der Wärmeleitfähigkeiten der beiden Verputze (Literaturwert) ergibt sich eine Wärmeleitfähigkeit für die eingebauten Aerogelmatten (2 x 10 mm) von:  
 $\lambda_{\text{Aerogel}}=0.0187$  W/(m·K)

## 4.2. Rechnerische Bestimmung des U-Wertes (Abschätzung)

Die Schichtdicken und die Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Schichten sind approximativ bestimmt. Anhand der gemessenen Gesamtdicke und der Kenntnis der neuen Schichten wurde die Dicke der Bruchsteinmauer bestimmt. Aus den Abmessungen aller Schichten und den Wärmeleitfähigkeiten, ergibt sich der totale Widerstand der beiden Wände. Die Wärmeübergänge Wandoberfläche/Luft wurden gemäss EN ISO 6946 für die U-Wertberechnung eingesetzt.

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

U-Wert:

R: Wärmedurchlasswiderstand der Wand (Summe alle Schichtwiderstände)

R<sub>si</sub>: Wärmeübergangswiderstand innen 0.13 m<sup>2</sup>K/W

R<sub>se</sub>: Wärmeübergangswiderstand aussen 0.04 m<sup>2</sup>K/W

Material	Dicke mm	Wärmeleitfähigkeit W/mK	Widerstand m <sup>2</sup> K/W
Wärmeübergang innen			0.13
Weissputz	2	0.35	0.006
Gipskartonplatten	12.5	0.21	0.060
Wärmedämmung gopur PS 15SE	20	0.038	0.526
Bruchsteinmauer (l=1.5 – 2.8 W/(mK))	496.5	2.1 ± 0.6	0.236 ± 0.075
Aerogel (l=0.015 – 0.019 W/(mK))	20	0.018	1.111
Wärmedämmputz Röfix 888	20	0.1	0.200
Deckputz	5	0.87	0.006
Wärmeübergang aussen			0.04

Totaler Widerstand	2.337 ± 0.075	m <sup>2</sup> K/W
U-Wert	0.428 ± 0.014	W/(m <sup>2</sup> K)

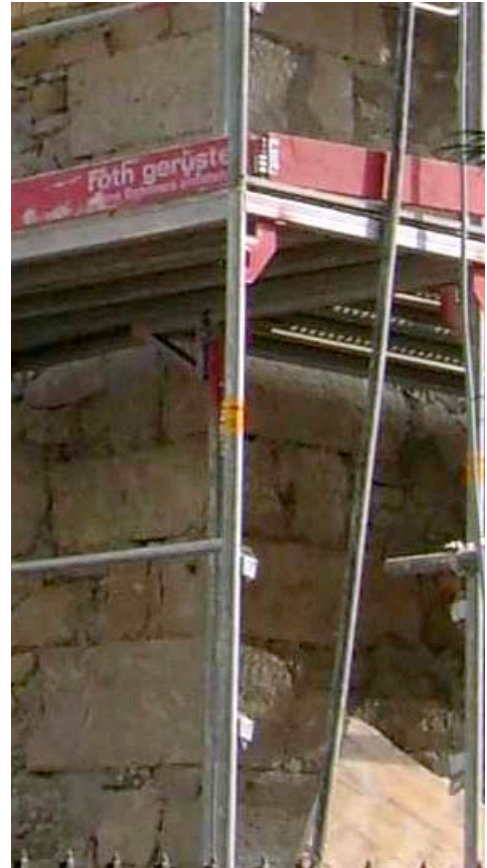
**Tabelle 4.2.1:** Nordwand Schichtaufbau von innen nach aussen

Material	Dicke mm	Wärmeleitfähigkeit W/mK	Widerstand m <sup>2</sup> K/W
Wärmeübergang innen			0.13
Weissputz	2	0.35	0.006
Gipskartonplatten	12.5	0.21	0.060
Wärmedämmung gopur PS 15SE	20	0.038	0.526
Bruchsteinmauer (l=1.5 – 2.8 W/(mK))	486.5	2.1 ± 0.6	0.232 ± 0.072
Aerogel (l=0.015 – 0.019 W/(mK))	20	0.018	1.111
Wärmedämmputz Röfix 888	20	0.09	0.200
Deckputz	5	0.87	0.006
Wärmeübergang aussen			0.04

Totaler Widerstand	2.332 ± 0.072	m <sup>2</sup> K/W
U-Wert	0.429 ± 0.013	W/(m <sup>2</sup> K)

**Tabelle 4.2.2:** Südwand Schichtaufbau von innen nach aussen

Die Wärmeleitfähigkeit der Bruchsteinmauer liegt zwischen 1.5 W/(mK) bei Sandstein und 2.8 W/(mK) bei Granit. Für die Abschätzung wurde 2.1 ± 0.6 W/(mK) eingesetzt. Mit der Variation der Wärmeleitfähigkeit der Bruchsteinmauer variiert der U-Wert zwischen U=0.41 und 0.44 W/(m<sup>2</sup>K). Mit dem Wärmedämmputz wurde die Wand ausgeebnet, darum kann der Dämmputz örtlich dicker als 20 mm sein. Ist der Dämmputz 30 mm anstatt 20 mm, wird der U-Wert 5 % niedriger. Beim Aerogel wurde die Wärmeleitfähigkeit von 0.018 W/(mK) eingesetzt (Tabelle 2.2). Die Werksangaben für die Wärmeleitfähigkeit von Aerogel sind 0.015 W/(mK). Die Dicke der Aerogelmatte ist nicht exakt 10 mm, sie schwankt um 1 bis 2 mm.



**Bild 4.2.3:** Zu erkennen ist das Bruchsteinmauerwerk, welches die Aussenwand im Erdgeschoss und im Kellergeschoss bildet. Die Ecken wurden mit Blocksteinen gebildet. Ab dem ersten Obergeschoss ist die Aussenwand ein Ziegelmauerwerk.

### 4.3. Messinstallationen am Objekt

Die U-Wertmessung am Bau wurde auf der Nordseite in der Küche und auf der Südseite im Wohnzimmer durchgeführt. Die Messstellen sind in den Bildern 4.3.1 und 4.3.2 beschrieben. Zur Wärmeflussmessung wurde an beiden Messstellen ein Wärmeflussensor auf die Wandinnenseite geklebt. Ein auf die Wand geklebt Thermoelement innen und eines aussen haben die Wandoberflächentemperaturen gemessen. Der Datalogger Squirrel hat im Intervall von 1 Minute gemessen und alle 30 Minuten den Mittelwert abgespeichert. Die Messstellen an der Aussenseite sind im Anhang 2 abgebildet.

#### **Wärmeflussensoren:**

Nordwand: HFS PU 22T.0010

Südwand: HFS PU 22T.0013

#### **Lufttemperaturen:**

Die Lufttemperaturen wurden mit drei Messgeräten Ecolog im Aufzeichnungsintervall von 30 Minuten gemessen. An folgenden Stellen wurden diese Messgeräte platziert:

- innen (in der Küche ca. 1.5 m über Boden)
- aussen, auf der Nordseite (siehe Bild 5.3)
- aussen, auf der Südseite (siehe Bild 5.4)



**Bild 4.3.1:** Wärme fluss sensor in der Küche an der Nordwand. Position: ca. 55 cm von der Ecke und ca. 65 cm von der Fensterleibung, 160 cm über dem Boden



**Bild 4.3.2:** Wärme fluss sensor im Wohnzimmer an der Süd wand. Position: Mitte Wand (182 cm), 80 cm über dem Boden

## 4.4. Messdatenanalyse

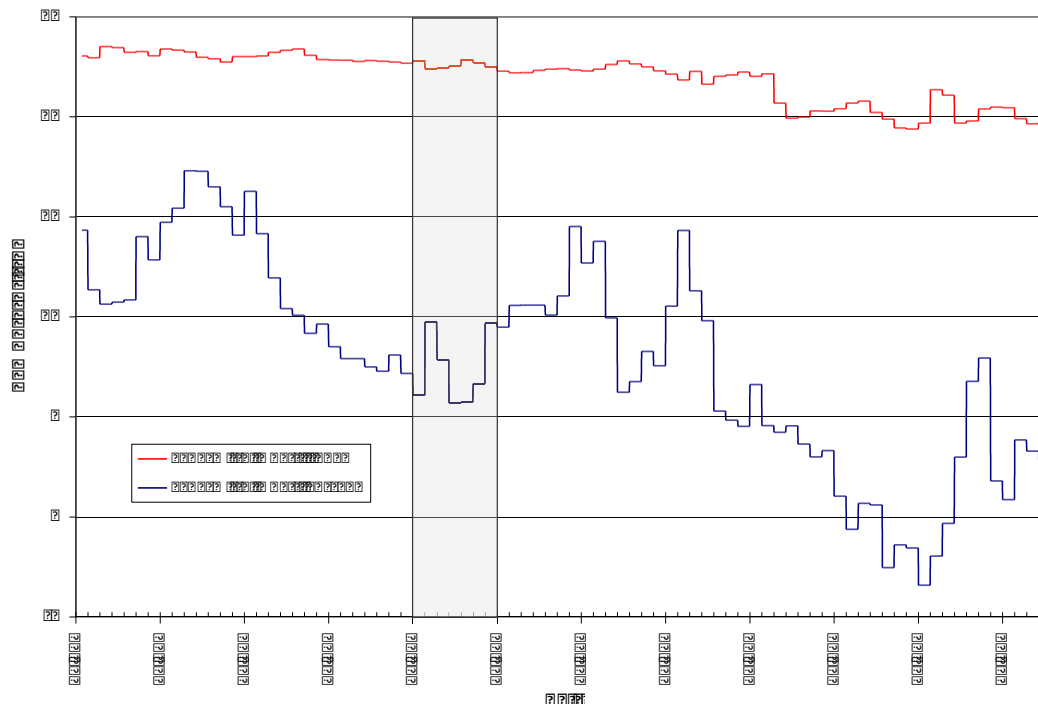
Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) gibt den Wärmestrom an, der im stationären Zustand durch  $1 \text{ m}^2$  eines Bauteils normal zur Oberfläche fliesst, wenn zwischen den beiden angrenzenden Räumen ein Temperaturunterschied von  $1 \text{ K}$  herrscht. Für den horizontalen Wärmestrom beträgt der Wärmeübergangswiderstand raumseitig  $0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$  und aussenseitig  $0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$  (DIN EN ISO 6946).

Für nicht stationäre Randbedingungen gibt es nach ISO 9869/ prEN 12494 die Mittelwertmethode für die Bestimmung des U-Wertes aus der mittleren Oberflächentemperaturdifferenzen und der mittleren Wärmestromdichte. Im Folgenden wird diese Methode einmal auf die ganze Messzeit von 79 Tagen angewendet und einmal auf ein Zeitintervall von 7 Tagen, welches nach Norm genügend lang ist ( $>72$  Stunden). Die dritte Methode ist die Dynamische Messdatenanalyse nach der Methode ISO 9869. Diese Methode berücksichtigt die Wärmekapazität der Wand. Der U-Wert nach dieser Methode wurde für die ganze Messperiode als auch das Intervall von 7 Tagen bestimmt.

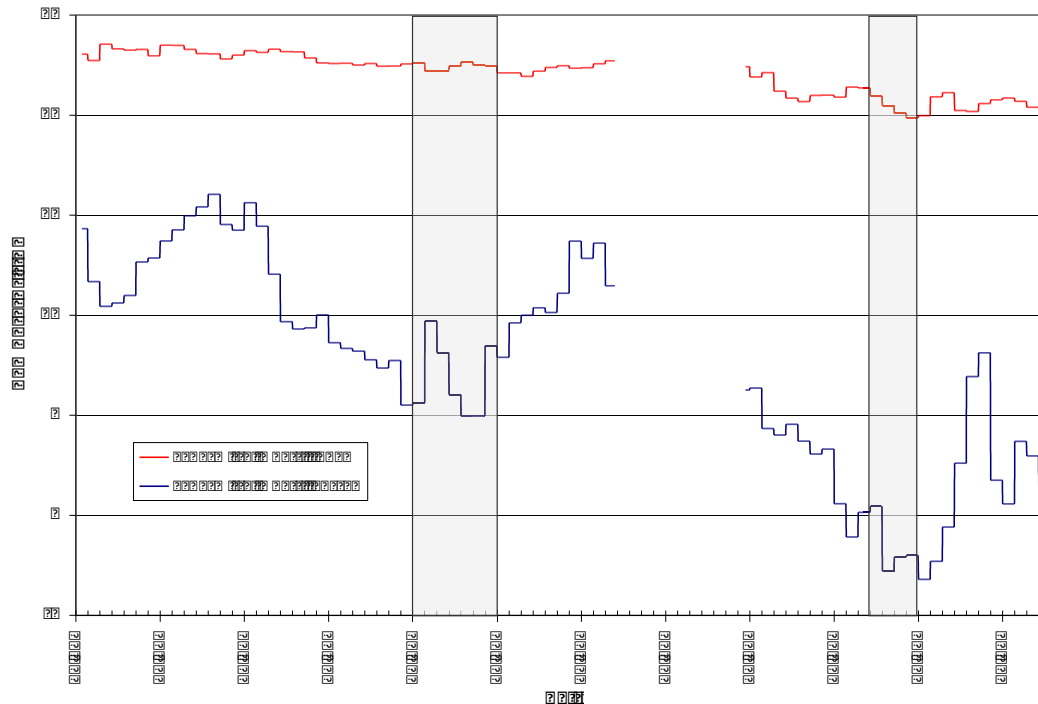
Bedingungen:

- Die interne Energie des Elementes ist am Beginn und am Ende der Messungen gleich (gleiche Tagesmitteltemperatur der mittleren Wandtemperatur).
- Gleiche Feuchtigkeitsverteilung am Beginn und am Ende der Messungen (nicht gemessen).

Die Messdaten wurden vom 24.09.2010 12:00 – 13.12.2010 15:30 erfasst. Die Datenerfassung bei der Nordwand hatte einen Messunterbruch. Die erste Messperiode dauerte vom 27.9.2010 12:00 bis 7.11.2010 18:30 und die zweite vom 18.11.2010 15:00 bis am 13.12.2010 15:30.



**Bild 4.4.1:** Tagesmitteltemperatur der Südwandoberfläche innen (rot) und Tagesmitteltemperatur der Wandoberfläche aussen. Grau markiert: Auswertintervall 22.10.2010 - 29.10.2010



**Bild 4.4.2:** Tagesmitteltemperatur der Nordwandoberfläche innen (rot) und Tagesmitteltemperatur der Wandoberfläche aussen. Grau markiert: Auswertintervall 22.10.2010 - 29.10.2010 und Auswertintervall 30.11.2010 - 3.12.2010.

Das Bild 4.4.1 zeigt die Änderung der mittleren Temperatur vom Anfang der Messung bis am Ende der Messung. Die mittlere Wandtemperatur gemittelt über den Tag ändert sich pro Tag beim 4. Tageintervall der zweiten Messperiode der Nordwand zu stark. Innerhalb der 4 Tage nimmt die mittlere Temperatur um 1.3 K ab.

Wand	Periode	Tage	$T_m$ Beginn	$T_m$ Ende	$DT_m$	$DT_m/\text{Tag}$
Süd	1	79	17.00	11.58	- 5.43	- 0.007
Süd	1	7	14.2	14.13	- 0.15	- 0.021
Nord	1	43	17.03	17.40	0.38	0.009
Nord	2	24	13.28	11.95	- 1.33	-0.055
Nord	1	7	14.20	14.15	- 0.05	-0.007
Nord	2	4	9.65	8.36	- 1.30	- 0.325

**Tabelle 4.4.3:** Mittlere Wandtemperatur gemittelt über den Tag ( $T_m$ ) bei Beginn und Ende der Messungen.  $DT_m$  ist  $T_m$  Beginn minus  $T_m$  Ende.

## 4.5 Mittelwertmethode über ganze Periode

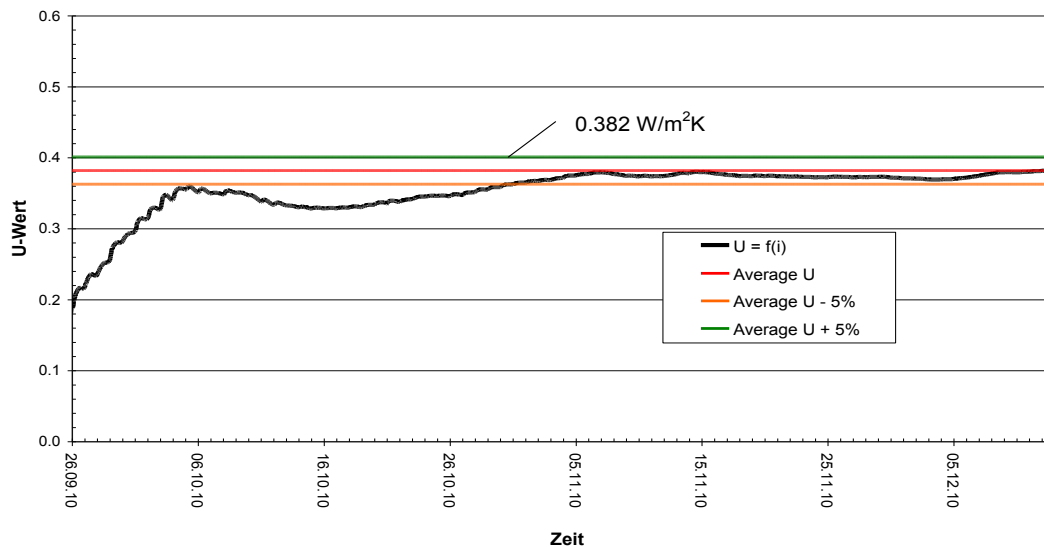
Der U-Wert am Bau wird bei nicht stationären Randbedingungen mit der Messung des Wärmeflusses und der Oberflächentemperaturen innen und aussen bestimmt.

$$U = \frac{1}{\frac{\sum_{j=1}^n T_{oi,j} - T_{oa,j}}{\sum_{j=1}^n q_j} + R_{si} + R_{se} - R_{wf}} \quad (1)$$

- $T_{oi}$  : Oberflächentemperatur der Wand innen zum Zeitpunkt j  
 $T_{oa}$  : Oberflächentemperatur der Wand aussen zum Zeitpunkt j  
 $q$  : Wärmefluss zum Zeitpunkt j  
 $R_{si}$  : Wärmeübergangswiderstand innen 0.13 m<sup>2</sup>·K/W  
 $R_{se}$  : Wärmeübergangswiderstand aussen 0.04 m<sup>2</sup>·K/W  
 $R_{wf}$  : Wärmeübergangswiderstand Wärmeflussensor 0.033 m<sup>2</sup>·K/W

### U-Wert Südwand (gesamte Messperiode)

Der U-Wert der Südwand ermittelt während 79 Messtagen ergibt  $U=0.38 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Der Verlauf des U-Wertes im Bild 4.5.1 zeigt die Wirkung der gespeicherten Wärme im Mauerwerk. Während den letzten 43 Tagen variiert der U-Wert um nicht mehr als 5 %, somit ist die Bedingung zur Auswertung erfüllt.



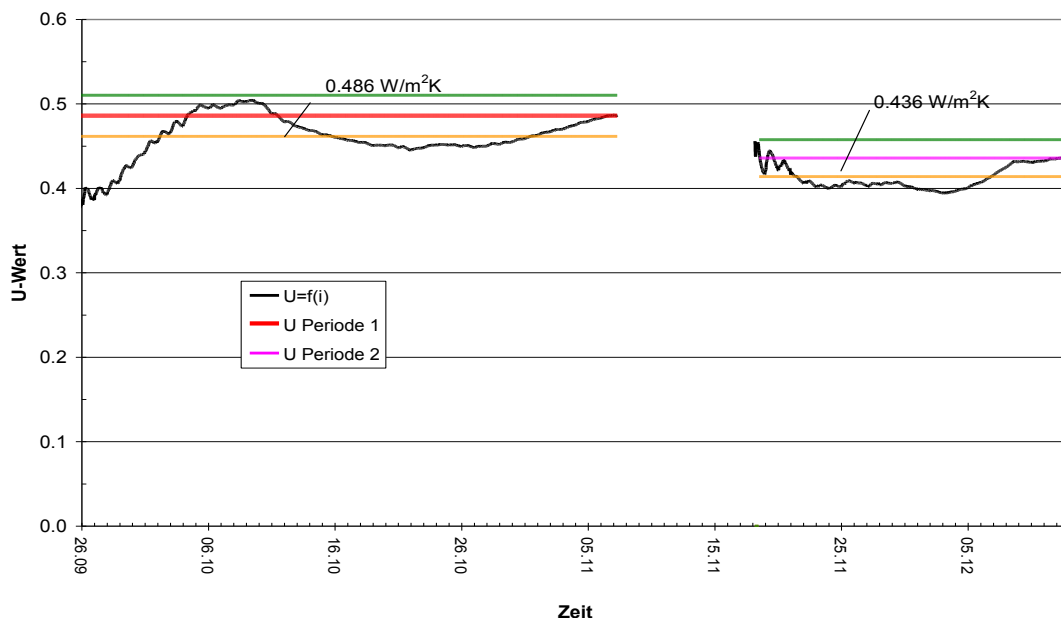
**Bild 4.5.1:** U-Wert der Südwand in Funktion von der Zeit gemäss Formel (1). Am 79. Tag beträgt der U-Wert 0.382 W/m<sup>2</sup>·K. Die letzten 43 Tage schwankt der U-Wert innerhalb des 5 % Bandes.

Die Messperiode muss genügend lang gewählt werden, damit der Einfluss der Wärmekapazität/Masse der Wand berücksichtigt wird.



## U-Wert Nordwand (gesamte Messperiode)

Die Messung bei der Messstelle Nordwand endete am 43. Tag und wurde am 53. Tag aktiviert.



**Bild 4.5.2:** U-Wert der Nordwand in Funktion von der Zeit gemäss Formel (1). Der letzte Wert der Periode 1 beträgt  $U=0.486 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und für die 2. Periode  $U=0.436 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die Forderung, dass der U-Wert innerhalb einer Woche nicht mehr als 5 % schwankt ist bei beiden Perioden nicht erfüllt.

Der U-Wert bei der Messstelle auf der Nordseite ist höher als der auf der Südseite. Wird die Mittelwertmethode bei beiden Messstellen nur bis zum 7.11.2010 18:30 ausgewertet, so ergibt sich für die Südwand einen U-Wert  $U= 0.379 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und die für die Nordwand  $U= 0.486 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Das Bild 4.2.3 zeigt, dass in der Ecke des Hauses breite Steinquaderblöcke platziert sind. Die Messstelle ist nur 55 cm von dieser Ecke entfernt, was eine mögliche Erklärung des höheren Wärmeflusses ist.

## 4.6 Mittelwertmethode nach ISO 9869 / prEN 12494

Messzeit von 24.9.2010 12:00 bis 13.12.2010 16:00.

Der Wärmedurchlasswiderstand der Wand  $R_w$  ergibt sich aus dem Wärmefluss  $q$  und der Differenz der Wandoberflächentemperaturen ( $T_{oi} - T_{oa}$ ) im stationären Zustand:

$$R_w = \frac{T_{oi} - T_{oa}}{q}$$

Gemäss ISO 9869 wird mir der folgenden Mittelwertmethode gerechnet:

$$R_w = \frac{\sum_{j=1}^n T_{oij} - T_{oaj}}{\sum_{j=1}^n q_j}$$

### Bedingungen für das Mittelwertverfahren (prEN 1294:1996)

- Prüfdauer  $\geq 72$  h
- Der am Ende der Prüfung erhaltene Wert  $R_t$  weicht um maximal  $\pm 2$  % von dem Wert ab, der der 24 Stunden zuvor gemessen wurde (prEN 1294:1996)
- Der Wert  $R_w$ , der durch die Analyse der Daten aus der ersten Zeitspanne während  $\text{INT}(2 \times \text{DT}/3)$  Tagen berechnet wurde, weicht um maximal  $\pm 2$  % von den Werten ab, die aus den Daten der letzten Zeitspanne mit derselben Dauer erhalten wurden, DT ist dabei die Dauer der Prüfung in Tagen, INT ist der ganzzahlige Bestandteil.
- Der Wärmestrommesser ist weder Sonnenstrahlungen noch Regen ausgesetzt
- Die Änderung der inneren Energie des Elements beträgt weniger als 2 % der Wärme, die während der Prüfdauer das Element durchströmt. Die Änderung der internen Energie wird als die Differenz zwischen der Durchschnittstemperatur  $(T_{oi} + T_{oa})/2$  des Elements am Beginn und am Ende der Prüfdauer multipliziert mit der Masse des Elements und einer geschätzten spezifischen Wärme von 1200 J/(kgK) abgeschätzt. ISO 9869 setzt jeweils die Bedingung von 5 %, dort wo prEN 1294 2 % setzt.

Der U-Wert ergibt sich nach DIN EN ISO 6946 aus dem Kehrwert des totalen Widerstandes der Wand.

$$U = \frac{1}{(R_{si} + R_w + R_{se})}$$

Für den horizontalen Wärmefluss werden die folgenden Wärmeübergangswiderstände eingesetzt:

$R_{si}$  : Wärmeübergangswiderstand innen 0.13 m<sup>2</sup> K/W

$R_{se}$  : Wärmeübergangswiderstand aussen 0.04 m<sup>2</sup> K/W

### Resultat U-Wert Südwand

Datum von	bis	Intervall (Tag)	m. Temp. Dif. (K)	m. Wärmefluss (W/m <sup>2</sup> )	Widerstand R (m <sup>2</sup> ·K/W)	U W/(m <sup>2</sup> ·K)	Abw. %
22.10.	29.10.	7	15.26	6.56	2.326	0.401	
22.10.	28.10.	6	15.68	6.51	2.407	0.388	-3.1
22.10.	27.10.	5	15.67	6.71	2.337	0.399	-0.4
24.10.	29.10.	5	15.49	6.67	2.322	0.401	0

Die Abweichung des U-Wertes ermittelt im Zeitintervall von 6 Tagen weicht 3.1 % vom 7 Tag Zeitintervall ab. Erfüllt ISO 9869 (< 5 %), nicht aber prEN 12494 (> 2 %).

$$U_{\text{Süd}} = 0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Resultat U-Wert Nordwand Messperiode 1

Datum von	bis	Intervall (Tag)	m. Temp. Dif. (K)	m. Wärmefluss (W/m <sup>2</sup> )	Widerstand R (m <sup>2</sup> K/W)	U W/(m <sup>2</sup> K)	Abw. %
22.10.	29.10.	7	15.60	7.87	1.983	0.465	
22.10.	28.10.	6	15.88	7.79	2.039	0.453	-2.6 %
22.10.	27.10.	5	15.56	7.70	2.020	0.457	- 1.7 %
24.10.	29.10.	5	15.95	8.00	1.992	0.463	- 0.6 %

Die Abweichung des U-Wertes ermittelt im Zeitintervall von 6 Tagen weicht 2.6 % vom 7 Tag Zeitintervall ab. Erfüllt ISO 9869 (< 5 %), nicht aber prEN 12494 (> 2 %).

$$U_{\text{Nord}} = 0.47 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Resultat U-Wert Nordwand Messperiode 2 (30.11.2010 – 4.12.2010)

Datum von	bis	Intervall (Tag)	m. Temp. Dif. (K)	m. Wärmefluss (W/m <sup>2</sup> )	Widerstand R (m <sup>2</sup> K/W)	U W/(m <sup>2</sup> K)	Abw. %
30.11.	04.12.	4	22.63	8.85	2.557	<b>0.367</b>	
30.11.	03.12.	3	22.46	8.65	2.595	0.362	-1.4 %
30.11.	02.12.	2	22.71	8.64	2.630	0.357	- 2.6 %
02.12.	04.12.	2	22.55	9.08	2.484	0.377	2.7 %

Die Abweichung des U-Wertes ermittelt im Zeitintervall von 3 Tagen weicht 2.7 % vom 4 Tag Zeitintervall ab. Erfüllt ISO 9869 (< 5 %), nicht aber prEN 12494 (> 2 %).

$$U_{\text{Nord}} = 0.37 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (Mittelwertmethode ausgewertet 30.11.2010 – 4.12.2010)}$$

## Resultat U-Wert Nordwand Messperiode 2 (29.11.2010 – 6.12.2010)

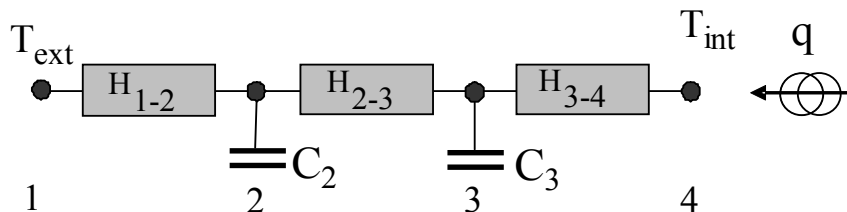
Datum von	bis	Intervall (Tag)	m. Temp. Dif. (K)	m. Wärmefluss ( $W/m^2$ )	Widerstand R ( $m^2 \cdot K/W$ )	U $W/(m^2 \cdot K)$	Abw. %
29.11.	06.12.	7	22.27	9.60	2.319	0.402	
29.11.	05.12.	6	22.39	9.29	2.410	0.388	- 3.5
29.11.	03.12.	4	21.98	8.76	2.509	0.373	- 7.1
02.12.	04.12.	4	22.49	10.22	2.200	0.422	5.0

Die Abweichung des U-Wertes ermittelt im Zeitintervall der ersten 4 Tagen weicht 7.17 % vom 7 Tag Zeitintervall ab. Weder ISO 9869 (< 5 %), noch prEN 12494 (< 2 %).

$U_{\text{Nord}} = 0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Mittelwertmethode ausgewertet 29.11. –6.12.)

### 4.7 Dynamische Messdatenanalyse nach der Methode ISO 9869

Zur Auswertung der dynamischen Messdaten wurde das Parameteridentifikationsprogramm LORD<sup>1</sup> verwendet, das innerhalb der europäischen PASLINK-Gruppe<sup>2</sup> von Forschungsinstituten entwickelt wurde. Das thermische System der Wand wurde als ein einfaches Netzwerk von Leitwerten/Kapazitäten modelliert, welches aus 3 Leitwerten und 2 Kapazitäten besteht. Die Inputdaten sind die beiden gemessenen Wandoberflächentemperaturen und der gemessene Wärmefluss. Die Parameter, Leitwerte und Kapazitäten werden verändert bis die Differenz zwischen gemessenem und gerechnetem Wärmefluss minimal wird.



**Bild 4.7.1:** RC-Netzwerk für die gemessenen Wände. Die gemessenen Daten sind im Knoten 4 der Wärmefluss  $q$  und die Wandinnenoberflächentemperatur  $T_{\text{int}}$  und im Knoten 1 die äussere Wandoberflächentemperatur. Die Kapazitäten  $C_2$  und  $C_3$  bzw. die Leitwerte  $H_{3-4}$  gleich  $H_{1-2}$ . wurden als symmetrisch angenommen.

<sup>1</sup> LORD 2.3, Entwickler O. Gutschker, Technische Universität Cottbus (2003).

<sup>2</sup> PASLINK EEIG of Outdoor Test Centres, <http://www.paslink.org>.

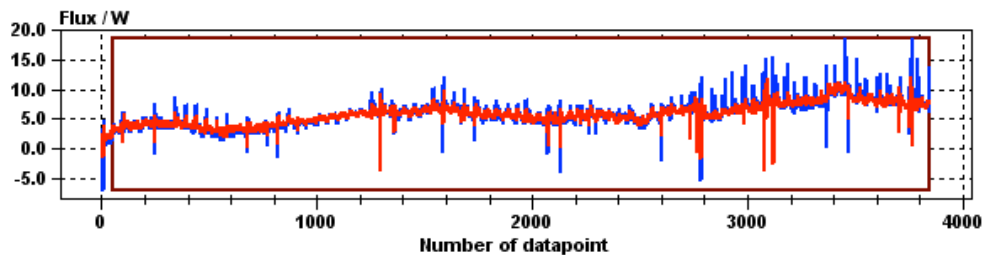
## Lord-Resultate

Wand	Identifikationsbereich		Leitwert Wand <sup>**)</sup> W/m <sup>2</sup> K	U-Wert <sup>*)</sup> W/m <sup>2</sup> K
	von	bis		
Süd	25.09.2010	13.12.2010	0.441 ± 1.4 %	0.410
Süd	22.10.2010	29.10.2010	0.428 ± 1.4 %	0.399
Süd	19.11.2010	13.12.2010	0.459 ± 1.0 %	0.418
Nord	25.09.2010	07.11.2010	0.549 ± 0.6 %	0.502
Nord	22.10.2010	29.10.2010	0.525 ± 3.1 %	0.482
Nord	19.11.2010	13.12.2010	0.498 ± 0.2 %	0.459

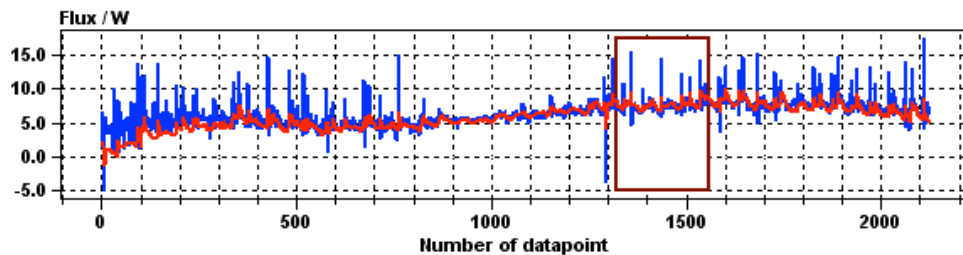
\*) Der Kehrwert des U-Wertes ist der Wärmewiderstand der Wand plus der Normübergangswiderstand von 0.17 m<sup>2</sup>K/W

\*\*\*) Diese angegebene Ungenauigkeit bezieht sich nur auf die Parameteridentifikation, dazu kommt noch ein Messfehler des Wärmeflusses von ca. 5 % und Ein Messfehler der Differenz der Oberflächentemperatur von 0.1 K

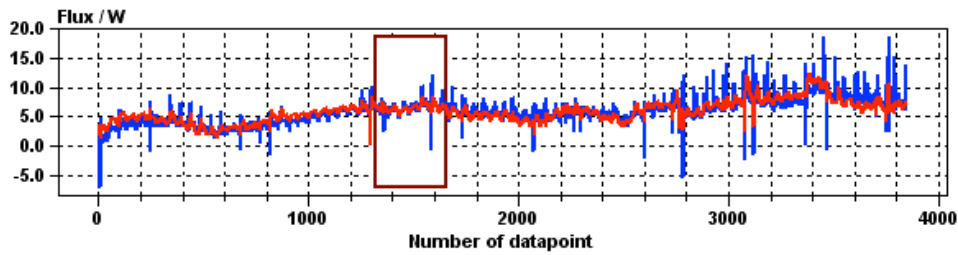
**Tabelle 4.7.2:** U-Werte der Südwand und der Nordwand ermittelt mit dem Programm LORD für verschiedene Auswertebereiche.



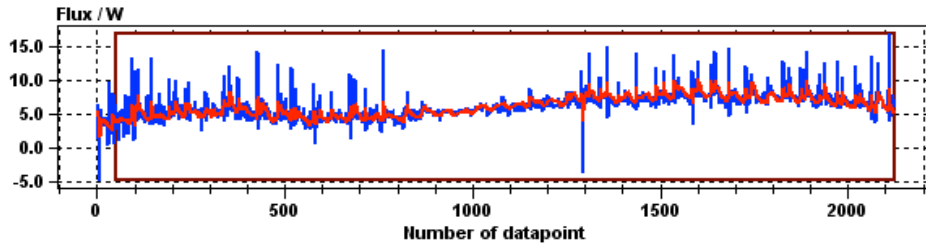
**Tabelle 4.7.3:** Gemessener (blau) und berechneter/simulierter (rot) Wärmefluss durch die Südwand für den Auswertebereich vom 25.09.2010 - 13.12.2010.



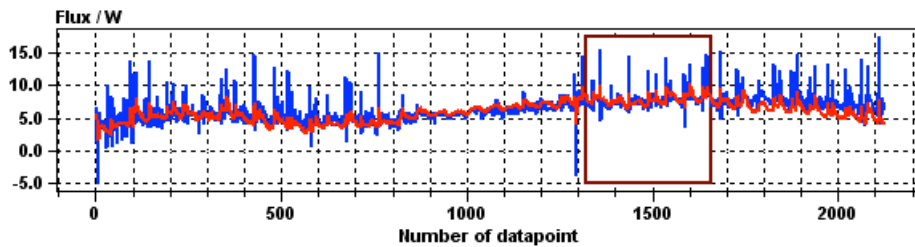
**Tabelle 4.7.4:** Gemessener (blau) und berechneter/simulierter (rot) Wärmefluss durch die Südwand für den Auswertebereich vom 22.10.2010 - 29.10.2010.



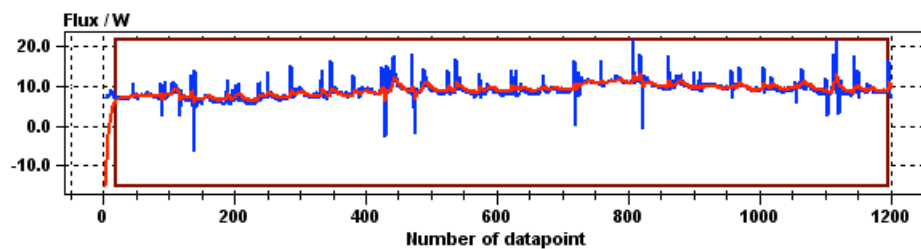
**Bild 4.7.5:** Gemessener (blau) und berechneter/simulierter (rot) Wärmefluss durch die Südwand für den Auswertebereich vom 19.11.2010 - 13.12.2010.



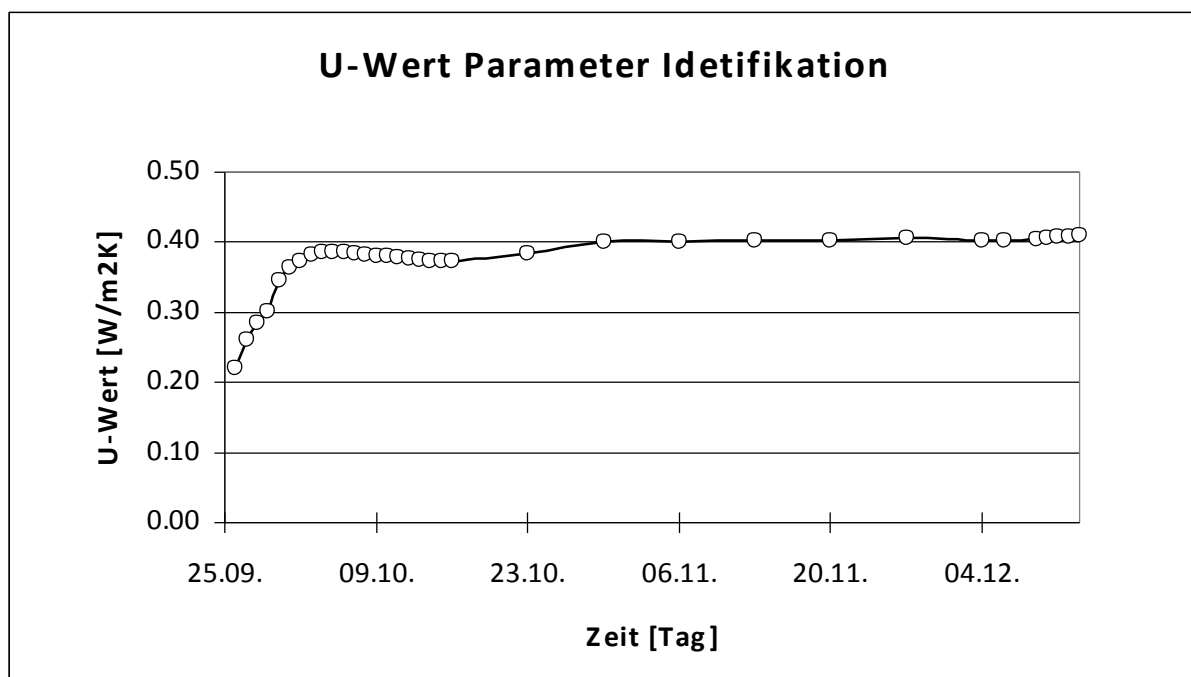
**Bild 4.7.6:** Gemessener (blau) und berechneter/simulierter (rot) Wärmefluss durch die Nordwand für den Auswertebereich vom 25.9.2010 - 7.11.2010 (1. Messperiode).



**Bild 4.7.7:** Gemessener (blau) und berechneter/simulierter (rot) Wärmefluss durch die Nordwand für den Auswertebereich vom 22.10.2010 – 29.10.2010.



**Bild 4.7.8:** Gemessener (blau) und berechneter/simulierter (rot) Wärmefluss durch die Nordwand für den Auswertebereich vom 19.11.2010 – 13.12.2010.



**Bild 4.7.9:** U-Wert-Auswertung der Südwand mit der Parameter Identifikationsmethode mit dem Auswertebereich von 1 Tag bis 79 Tage. Mit dem Auswertebereich der ganzen Messzeit ergibt sich ein U-Wert von  $U=0.410 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

## 4.8 Fehlerabschätzung

Die Messungenauigkeit des Wärmeflusses ist abhängig von der Kalibration des Wärmeflussensors, vom Datenerfassungsgerät und von der Montage. Die Messgenauigkeit der Wärmeflussmessung ist  $\pm 5 \%$ . Die Wandoberflächentemperaturen werden mit einer Genauigkeit von ca. 0.05 K gemessen, somit ist die Messungenauigkeit der Differenz der Oberflächentemperaturen innen/aussen  $\pm 0.1 \text{ K}$ . Der Feuchtigkeitsgehalt und die Inhomogenität der Wand werden in dieser Fehlerabschätzung nicht berücksichtigt.

### Fehler der Mittelwertmethode über ganze Periode

Für die Fehlerabschätzung wurde der U-Wert mit einer Abweichung des Wärmefluss von  $\pm 5 \%$  berechnet und ebenso mit einer Temperaturdifferenz, welche um  $\pm 0.1 \text{ K}$  vom Messwert abweicht. Die maximale Abweichung der Schwankung des U-Wertes während den letzten 7 Tagen vom Endwert ergibt die Größenordnung der Abweichung des U-Wertes, welche von den dynamischen Randbedingungen und der Wärmekapazität hervorgerufen wird.

Die totale Messungenauigkeit im Quadrat ist die Quadratsumme der einzelnen Messungenauigkeiten:

$$\frac{\Delta U}{U} = \left\{ \left( \frac{U(\frac{\Delta q}{q})}{U(q)} \right)^2 + \left( \frac{U((T_{oi} - T_{oa} + \Delta T))}{U(T_{oi} - T_{oa})} \right)^2 + \left( \frac{\max[U(t_{\text{End}-7}, t_{\text{end}})]}{U(t_{\text{End}})} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\Delta q}{q} = 5\%$$

$$- D(T_{oi}-T_{oa})=\pm 0.1 \text{ K} \Rightarrow DU(T_{oi}-T_{oa})= \pm 0.7 \%$$

	U( $\pm\delta q$ ) (%)	U( $\pm\delta T$ ) (%)	$\pm\max(\delta U(t_n, t_{n-7}))$ (%)	$\delta U$ (%)
Süd	4.7	0.7	2.6	5.4
Nord Periode 1	4.7	0.9	5.3*	7.1
Nord Periode 2	4.7	0.5	6.3*	7.9

\*) Messperiode zu kurz, da der U-Wert in den letzten 7 Tage mehr als um 5 % vom Endwert abweicht

### Fehler der Mittelwertmethode (Intervall 7 Tage)

Für die Fehlerabschätzung wurde der U-Wert mit einer Abweichung des Wärmeflusses von  $\pm 5 \%$  berechnet und ebenso mit einer Abweichung der Temperaturdifferenz von  $\pm 0.1 \text{ K}$ .

Für das Auswerteintervall vom 22.10.2010 – 29.10.2010 beträgt die Messunsicherheit der Südwand ohne Berücksichtigung des Speichereffekts 4.7 %

$$\Delta U^2(\Delta q, \Delta T, )=\pm[(4.7)^2+(0.6)^2]=22.5 \text{ d.h. } \Delta U = 4.7 \%$$

### Fehler Dynamische Messdatenanalyse

Für die Fehlerabschätzung wurde der U-Wert mit einer Abweichung des Wärmefluss von  $\pm 5 \%$  mit der Parameteridentifikationsmethode bestimmt und ebenso mit einer Temperaturdifferenz, welche um  $\pm 0.1 \text{ K}$  vom Messwert abweicht. Die Parameteridentifikation berücksichtigt bei der Auswertung die Wärmekapazität der Wand. Bei genügend langer Messzeit verschwindet der Einfluss des Zustandes der Wärmekapazitäten der Wand vor der Messperiode.

Die totale Messungenauigkeit im Quadrat ist die Quadratsumme der einzelnen Messungenauigkeiten:

	U( $\pm\delta q$ ) (%)	U( $\pm\delta T$ ) (%)	U(Fit) (%)	$\delta U$ (%)
Süd	4.8	0.6	1.3	5.0
Nord Periode 1	4.7	0.9	0.6	4.8
Nord Periode 2	4.7	0.4	2.1	5.2



## 4.9 Zusammenfassung der Resultate

### Südwand

Auswertung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	
4.2.1 Mittelwertmethode ganze Periode	0.382 ± 5.4 %	Ganze Periode
4.2.2 Mittelwertmethode Intervall	0.401	22.10.2010- 29.10.2010
4.2.3 LORD	0.410 ± 5 %	Periode ab dem 2. Tag

Mittelwert der 3 Methoden  $U_{\text{Süd}} = 0.41 \text{ W/m}^2\text{K} \pm 5 \%$

### Nordwand Periode 1 (zu kurz)

Auswertung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	
4.2.1 Mittelwertmethode ganze Periode	0.486 ± 7.1 %	Ganze Periode
4.2.2 Mittelwertmethode Intervall	0.465	22.10.2010 – 29.10.2010
4.2.3 LORD	0.490 ± 4.8 %	1. Periode ab dem 2. Tag

Mittelwert 1. Messperioden der 3 Methoden  $U_{\text{Nord}} = 0.48 \text{ W/m}^2\text{K} \pm 5 \%$

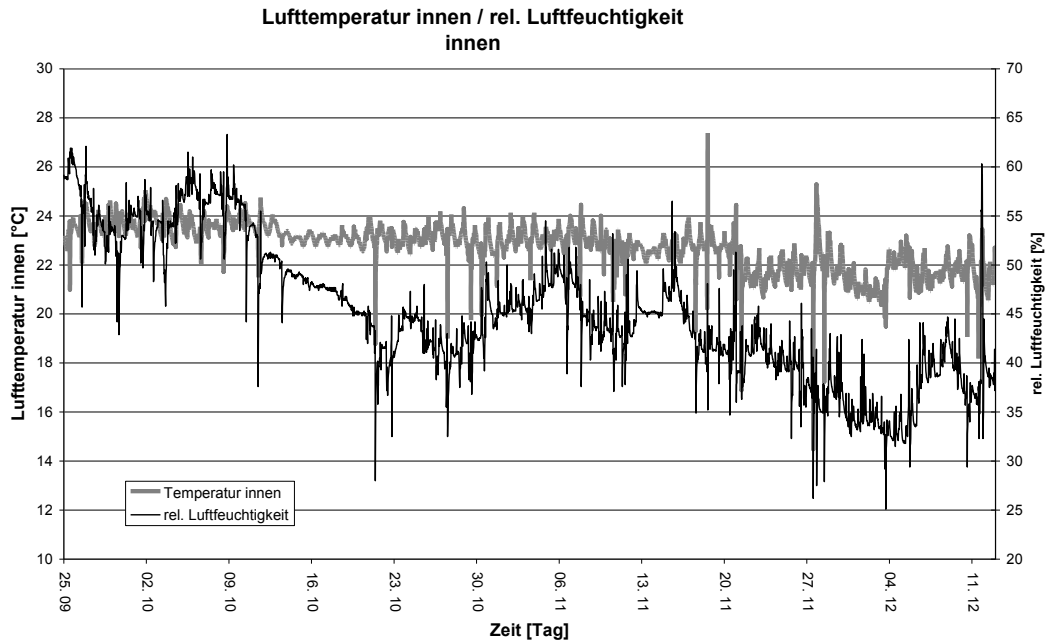
### Nordwand Periode 2 (zu kurz)

Auswertung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	
4.2.1 Mittelwertmethode ganze Periode	0.436 ± 7.9 %	Ganze Periode
4.2.2 Mittelwertmethode Intervall	0.362	30.11.2010 – 01.12.2010
4.2.3 LORD	0.446 ± 5.2 %	2. Periode

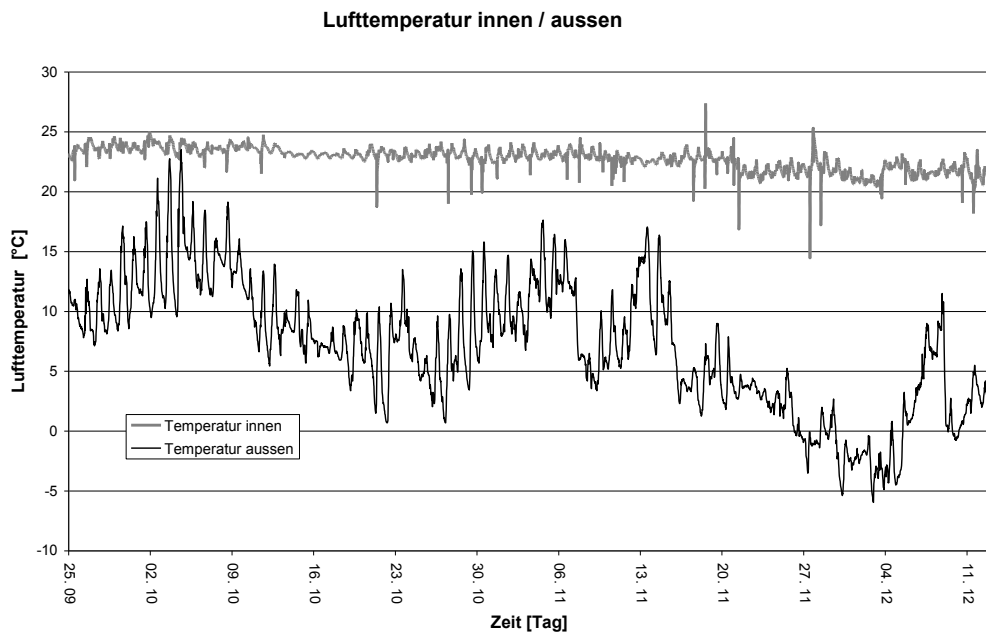
Mittelwert 2. Messperioden der 3 Methoden der  $U_{\text{Nord}} = 0.42 \text{ W/m}^2\text{K} \pm 7 \%$

## 5. Kontrollmessungen (Aussenluft)

Zur Ergänzung der Messresultate und zur Kontrolle der thermischen Effekte sind die gemessene Lufttemperatur innen und die Luftfeuchtigkeit im Bild 5.1 dargestellt. Die Raumlufttemperatur und die Aussenlufttemperatur vor der Südwand sind in Bild 5.2 dargestellt.



**Bild 5.1:** Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit innen



**Bild 5.2:** Lufttemperatur innen und aussen auf der Südseite

## Messstellen der Aussenlufttemperatur



**Bild 5.3:** Ecolog Temperatur- Luftfeuchtigkeitsmessgerät strahlungs- und witterungsgeschützt auf der Nordseite der Liegenschaft



**Bild 5.4:** Ecolog Temperatur-Luftfeuchtigkeitsmessgerät strahlungs- und witterungsgeschützt auf der Südseite der Liegenschaft

## Messstellen der Temperatur an der Wandoberfläche aussen:



**Bild 5.5:** U-Wert Messtelle Nord aussen, Thermoelement aufgeklebt auf der Aussenwand



**Bild 5.6:** U-Wert Messtelle Süd aussen, Thermoelement aufgeklebt auf der Aussenwand

## 6. Referenzen

- [1] P. Baker, U-values and traditional buildings. In situ measurements and their comparison to calculated values, Historic Scotland Technical Paper 10, Edinburgh, 2011.
- [2] European and International Standard EN ISO 6946, Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method, Brussels, 1996.
- [3] O. Gutschker, Parameter identification with the software package LORD, Building and Environment 43 (2008) 2074-2082.
- [4] International Standard ISO 9869, Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, 1994.
- [5] Prenormative European Standard prEN 12494, Building components and elements – In-situ measurement of the surface-to-surface thermal resistance, August 1996.

## 7. Anhang

Die Thermografische Untersuchung wurde als Unterauftrag an Herrn Ch. Tanner von der Baueck-Tanner, delegiert. Der von ihm verfasste Bericht:

«Thermografische Schwachstellenanalyse der Gebäudehülle», Bericht Nr. 11'06 ist als separater Anhang Bestandteil dieses Berichtes.