

# Messtechnische Ermittlung der U-Werte von Altbaufassaden im Vergleich mit Typologiewerten

*T. Hoos, A. Merzkirch, S. Maas, F. Scholzen, D. Waldmann*

## Einleitung

Das Renovieren von Altbauten hat eine Senkung der Energiekosten und eine Erhöhung des Nutzerkomforts zum Zweck. Die Wirtschaftlichkeit von solchen Vorhaben wird neben möglichen Wert- und Mietsteigerungen anhand von rechnerisch ermittelten Energieeinsparungen bewertet. Hierzu wird der rechnerische Energiebedarf des betreffenden Gebäudes vor und nach der Sanierung verglichen. In [1,2] wurde gezeigt, dass der nach luxemburger oder deutscher Vorschrift berechnete Endenergiebedarf alter, unsanierter Gebäude im Mittel um 80 bis 100 % über dem Realverbrauch liegt, was dazu führt, dass die erwarteten Energieeinsparungen in der Praxis häufig nicht erreicht werden. Dies gilt vor allem für Gebäude, die vor den 70er Jahren errichtet wurden. Mit zunehmendem Wärmeschutz der Gebäude nehmen die Abweichungen zwischen Berechnung und Verbrauch ab.

Außenwände wurden bis in die 50er Jahre meist aus Sand- oder Kalkstein errichtet. Die U-Wert Typologie nach DIN 832, auf der auch die luxemburgische Typologie [3] basiert, weist diesen Wandkonstruktionen einen U-Wert von  $1,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu. Der rechnerische U-Wert eines 50cm dicken Mauerwerks berechnet sich anhand der Wärmeleitfähigkeit von Naturstein zu  $2,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Diese Werte werden häufig von Energieberatern als Eingangsparameter zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste gewählt. Ab den 60er Jahren wurden Außenwände zunehmend aus Beton-Hohlblocksteinen konstruiert, für welche in der luxemburgischen Typologie [3] ein U-Wert von  $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angenommen wird. In [1] konnte gezeigt werden, dass sich der Endenergieverbrauch von Altbauten unabhängig vom Baualter einstellt und die erwartete Verbrauchssenkung infolge sinkender U-Werte erst in den späten 70er Jahren zu erkennen ist. Eine Erklärungsmöglichkeit der Ungenauigkeiten bei der Berechnung ist demnach eine unpassende Wahl der Eingangsparameter, wie bspw. dem U-Wert der Außenwände.

In dieser Veröffentlichung werden Ergebnisse aus U-Wert-Messungen an Außenfassaden präsentiert und mit den in Typologien angenommenen Werten verglichen.

## Methodik

Die messtechnische Erfassung von U-Werten eingebauter Bauteile erfolgt über die Messung der Wärmestromdichte  $\dot{q}$ , sowie der Luft- und/oder Oberflächentemperaturen innen und außen (vgl. Abb. 1). Die Messung der Wärmestromdichte  $\dot{q}$  erfolgt durch eine dünne Wärmeflussplatte [4], welche raumseitig montiert wird, um eine Beeinflussung der Messung durch Solarstrahlung gering zu halten. Die Oberflächentemperaturen werden auf der Vorder- und Rückseite gemessen. Da der Wärmedurchgangswiderstand der Platte bekannt ist, kann aus der Temperaturdifferenz die Wärmestromdichte bestimmt werden. Die Platte besitzt einen geringen thermischen Widerstand, um den Wärmefluss möglichst wenig zu beeinflussen.

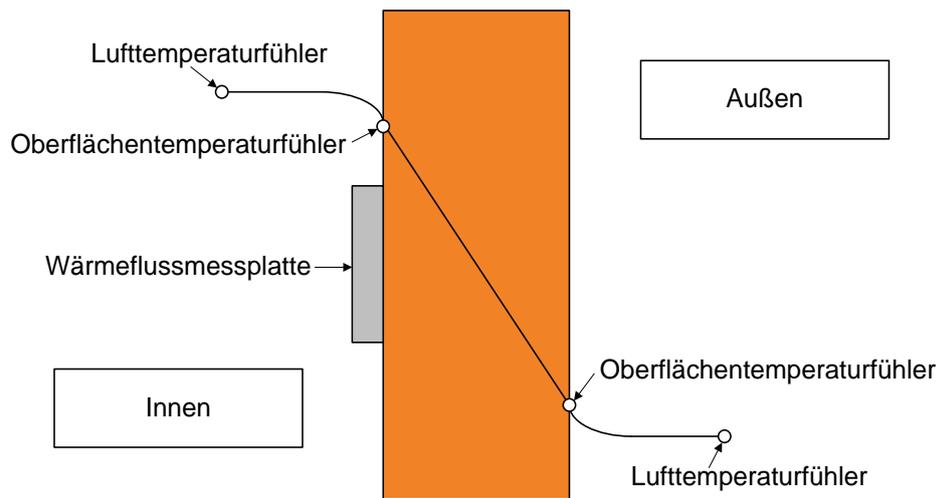


Abbildung 1: Aufbau der Wärmeflussmessung

Der U-Wert von Hüllflächenbauteilen berechnet sich aus [3]:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (1)$$

$$R_T = R_{si} + \sum_{k=1}^n R_k + R_{se} \quad (2)$$

$$R_k = \frac{d}{\lambda} \quad (3)$$

Mit:

$R_T$  Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils

$R_{si}$  innerer Wärmeübergangswiderstand

$R_{se}$  äußerer Wärmeübergangswiderstand

$R_k$  Wärmedurchlasswiderstand der Schicht k

$d_k$  Dicke der Schicht k

$\lambda_k$  Wärmeleitfähigkeit der Schicht k

Sind Wärmestromdichte und Oberflächentemperaturen bekannt, so kann der Bauteilwiderstand ermittelt und der U-Wert unter Berücksichtigung der normierten Übergangswiderstände berechnet werden:

$$R_{Bauteilmessung} = \frac{\sum \vartheta_{s1} - \vartheta_{s2}}{\dot{q}_m} \quad (4)$$

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{Bauteilmessung} + R_{se}} \quad (5)$$

Mit:

$\vartheta_{s1} - \vartheta_{s2}$  Differenz der inneren und äußeren Oberflächentemperatur (gleitendes Mittel)

$\dot{q}_m$  ermittelte Wärmestromdichte (gleitendes Mittel)

Ebenso besteht die Möglichkeit den U-Wert direkt durch die Verwendung der Lufttemperaturen zu ermitteln und die Übergangswiderstände zu berechnen:

$$U = \frac{\sum \dot{q}_m}{\sum (\vartheta_1 - \vartheta_2)} \quad (6)$$

$$R_S = \frac{\sum \vartheta_x - \vartheta_{sx}}{\dot{q}_m} \quad (7)$$

Mit:

$\vartheta_1 - \vartheta_2$  Differenz der Lufttemperatur (gleitendes Mittel)

$\vartheta_x - \vartheta_{sx}$  Differenz von Oberflächen- zu Lufttemperatur (gleitendes Mittel)

Das Verfahren der Mittelwertbildung erfordert eine lange Messperiode von mehreren Tagen, um Einflüsse durch Wettertrends gering zu halten, weil außen praktisch nie stationäre Temperaturverhältnisse herrschen. In Messungen wurde die Genauigkeit dieser Messmethode untersucht, indem die Wärmeleitfähigkeit von drei verschiedenen Baustoffen in einem hochgenauen Plattenprüfgerät gemessen wurde. Die Abweichung zwischen den beiden Methoden zur Ermittlung der Bauteilwiderstände betrug weniger als 5 %. Somit kann bei In-Situ-Messungen mit hinreichender Messdauer von mindestens einer Woche und einem ausreichend großen  $\Delta T$  von einer hohen Genauigkeit ausgegangen werden [5]. Eine weitere Möglichkeit den instationären Wärmetransportvorgang abzubilden ist eine softwarebasierte numerische Modellrechnung, welche dynamische Einflüsse berücksichtigt. Dabei wird das Bauteil nachgebildet, als Randbedingungen jedoch die gemessenen Oberflächentemperaturen angenommen. Durch Variation von Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit wird das Bauteil iterativ angepasst, bis die bestmögliche Übereinstimmung mit der Messung erreicht wird. Basierend auf den ermittelten Bauteilqualitäten erfolgt eine Ermittlung des U-Wertes nach DIN EN ISO 6946. Zur Berechnung wurde das auf der Finiten-Differenzen-Methode basierendes Programm WUFI verwendet. Wenn kein Wettertrend vorliegt und der Auswertungszeitraum ausreichend lang ist, ergeben beide Methoden (Messung und Simulation) annähernd das gleiche Ergebnis [6,7].

## Ergebnisse und Diskussion

Durch Anwendung der genannten Methoden wurden die U-Werte für vier Altbauten mit Fassaden aus Bruchsteinmauerwerk und für zwei Bauten aus den 1960er Jahren mit Fassaden aus Hohlblocksteinen in Messung und Simulation ermittelt (vgl. Tab. 1). Die stündlichen Messungen wurden in einem Zeitraum von neun bis 17 Tagen durchgeführt und gleitende Mittelwerte gebildet. Die Messungen und Simulationen ergeben deutlich niedrigere Werte, als in U-Wert Typologien [2] angenommen.

	U-Wert (Messung) Basis: Lufttemperaturen	U-Wert (Messung) Basis: Oberflächentemperatur	U-Wert (Simulation) Basis: Oberflächentemperatur	U-Wert (nach Typologie)
Bruchstein 1	1,13	1,31	1,27	1,4
Bruchstein 2	0,98	1,16	0,98	1,4
Bruchstein 3	0,92	1,02	1,02	1,4
Bruchstein 4	0,90	1,21	1,07	1,4
Hohlblockstein 1	0,89	1,14	1,15	1,7 -2,1
Hohlblockstein 2	1,12	1,23	1,23	1,7 -2,1

Tabelle 1: U-Werte aus Messung und Simulation [W/(m<sup>2</sup>K)].

Eine exemplarische detaillierte Auswertung der Messung von „Hohlblockstein 1“ ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Punkte zeigen den stündlich ermittelten U-Wert, der aufgrund der klimatischen Bedingungen Schwankungen unterliegt. Der gleitende Mittelwert ist als durchgehende Linie dargestellt. Der quasistationäre U-Wert beträgt 0,89 W/(m<sup>2</sup>K), wenn die Lufttemperaturen als Berechnungsbasis dienen (grün). Basiert die Rechnung auf Oberflächentemperaturen (rot), so ergibt

sich ein mittlerer U-Wert von  $1,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die luxemburgische Gebäudetypologie [2] weist diesem Wandaufbau dagegen einen durchschnittlichen Wert von  $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu. Die Ausführung am Einzelgebäude kann von diesem Wert abweichen.

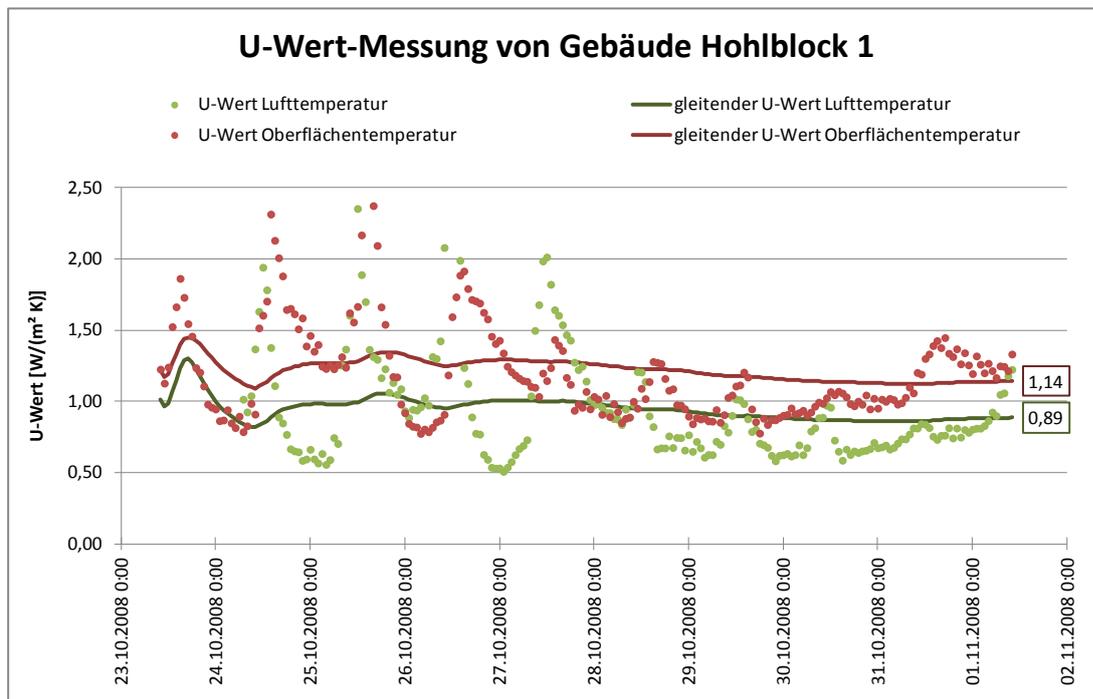


Abbildung 2: U-Wert Messung von Gebäude Hohlblockstein 1.

In Abbildung 3 sind gemessene Wärmeübergangswiderstände des Gebäudes Hohlblockstein 1 abgebildet. Im Innenbereich ist der stündlich ermittelte Wärmeübergangswiderstand nahezu konstant. Der gemessene Mittelwert von  $R_{si}$  (rot) liegt bei  $0,18 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ ,  $R_{se}$  (grün) bei  $0,25 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ . Der äußere Wärmeübergangswiderstand unterliegt Schwankungen. Negative Messwerte entstehen dadurch, dass die Außenluft zur Mittagszeit oft wärmer als die Außenwand ist. Große Übergangswiderstände sind nachts vorhanden, wenn die Wand deutlich wärmer als die Außenluft ist. Beide Mittelwerte liegen deutlich über den normierten Annahmen ( $0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  und  $0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  [8]), was einfach daran liegt, dass diese Werte ursprünglich zur Berechnung der Heizlast entworfenen Normen sehr konservativ angenommen wurden. Sie hängen stark von den Luftbedingungen ab, die wiederum von Raumhöhe und Anströmsituation innen und Windexposition außen beeinflusst sind.

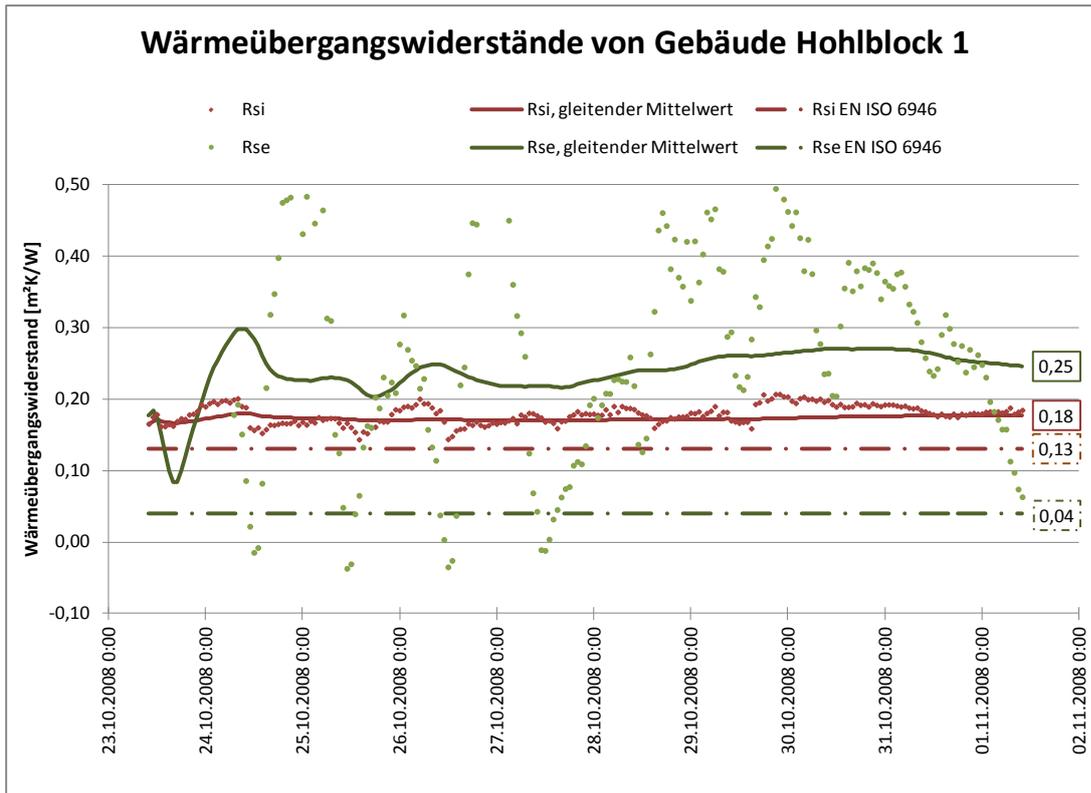


Abbildung 3: Wärmeübergangswiderstände von Gebäude Hohlblockstein 1.

Neben den Wärmeflussmessungen wurden dynamische Simulationen durchgeführt. Als Randbedingungen wurden gemessene Parameter (Oberflächentemperaturen und Lufttemperaturen) festgelegt. Des weiteren müssen plausible Spezifikationen des Mauerwerks festgelegt werden (Rohdichte, spezifische Wärmespeicherfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit) [9], mit denen die stündlich gemessene Wärmestromdichte am besten beschrieben wird. Wenn die Ergebnisse aus Messung und Simulation übereinstimmen, so kann davon ausgegangen werden, dass im Messzeitraum kein Wettertrend vorliegt. Das untersuchte Material zeigte mit folgenden Spezifikationen mit einer Standardabweichung von 7 % die beste Übereinstimmung mit der gemessenen Wärmestromdichte (vgl. Abb. 4, orange Linie):

Rohdichte	1400 kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmespeicherfähigkeit	1000 J/(kgK)
mittlere Wärmeleitfähigkeit	0,62 (m <sup>2</sup> K)/W

Tabelle 2: Gewählte Materialeigenschaften für dynamische Simulation.

Diese Materialkennwerte sind ähnlich denen von Annahmen bzgl. Beton-Hohlblocksteinen nach DIN 4108-4 [10]. Aus der Simulation ergibt sich ein U-Wert von 1,15 W/(m<sup>2</sup>K), welcher nahe dem gemessenen von 1,14 W/(m<sup>2</sup>K) (Basis Oberflächentemperaturen) liegt (vgl. Abb. 4 und Tab. 1).

Bei der Verwendung von Lufttemperaturen und normierten Wärmeübergangswiderständen als Randbedingung ist die simulierte Wärmestromdichte bei gleichem Bauteilaufbau durchgehend größer als die gemessene (grün). Erst wenn als Übergangswiderstände die gemittelten Messwerte eingesetzt werden (vgl. Abb. 3), stimmen die Simulationsergebnisse annähernd mit der tatsächlichen Messung überein (blau). Der simulierte U-Wert beträgt dann 0,91 W/(m<sup>2</sup>K), welcher nahe am Ergebnis der Messung (Basis Lufttemperatur) mit 0,89 W/(m<sup>2</sup>K) liegt. Durch die Simulation wird also bestätigt, dass bei der Messung höhere Wärmeübergangswiderstände vorlagen, als in der Berechnung nach Norm angenommen wird.

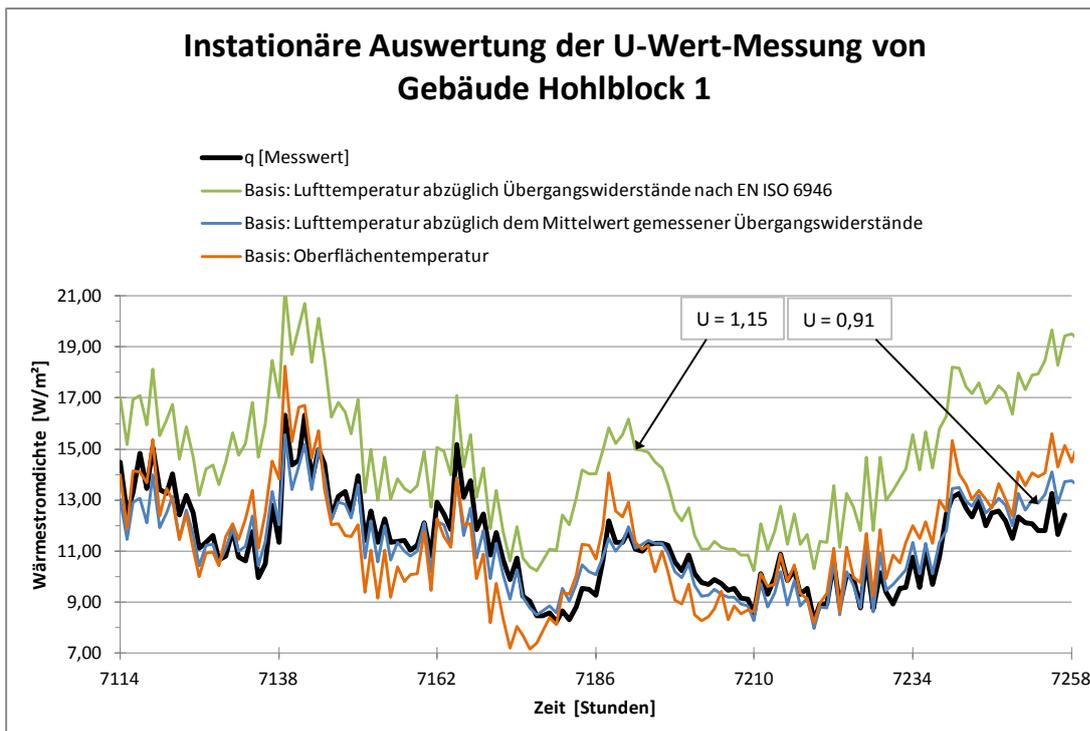


Abbildung 4: Dynamische Auswertung der U-Wert-Messung von Gebäude Hohlblockstein 1.

## Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung werden Ergebnisse aus U-Wert Messungen und Simulationen an vier Bruchsteinmauerfassaden und zwei Hohlblocksteinfassden präsentiert. Die U-Werte für diese Fassaden lagen bei 0,9 bis 1,2 W/(m²K) und somit deutlich niedriger als die in normierten Tabellenwerten angenommenen Werte zwischen 1,4 (Hohlblock) und 1,7 bis 2,1 W/(m²K) (Bruchstein). Die gemessenen Wände weisen somit bessere Dämmeigenschaften und größere Wärmeübergangswiderstände auf als in Typologien angenommen werden. Die in [1,2] beschriebenen Abweichungen zwischen Energiebedarfsberechnung und tatsächlichem Verbrauch können somit zum Teil auf fehlerhafte, an Typologiewerten orientierte Annahmen des ausstellenden Experten vor Ort zurückgeführt werden.

## Literatur

- [1] Merzkirch, A.; Maas, S.; Scholzen, F.; Waldmann, D.: *Energiepässe – Vergleich zwischen berechneter und gemessener Endenergie in 230 Wohngebäuden*. Bauphysik 1/2014, S. 40-43, Ernst & Sohn, Berlin, 2014. DOI: 10.1002/bapi.201410007
- [2] Techem Energy Services GmbH: *Energiekennwerte 2013*. Eschborn, 2013.
- [3] Ministère de l'Économie et du Commerce extérieur Luxembourg: *U-Wert-Typologien für bestehende Gebäude*. Version 1.1 vom 12.11.2007.
- [3] Rogaß, H.; Donath, A.; Gutschker, O.: *Instationäres Auswerteverfahren für Wärmedämmmessungen*. Bauphysik 6/1994, S. 82-85, Ernst & Sohn, Berlin, 1994.
- [4] Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen: *Wärmeflussplatten FQAx*.

- [5] Hoos, T.: *Einsparpotential und ökonomische Analyse der energetischen Sanierung staatlicher Gebäude in Luxemburg*. Shaker Verlag, Aachen, 2012.
- [6] Rogaß, H.; Donath, A.; Gutschker, O.: *Instationäres Auswerteverfahren für Wärmedämmmessungen*. Bauphysik 6/1994, S. 82-85, Ernst & Sohn, Berlin, 1994.
- [7] Richter, T., Winkelmann-Fouad, S.; *Anwendung des U-Wertes als Kenngröße für Wärmetransportvorgänge*. Bauphysik-Kalender 5, S. 249-295, Ernst & Sohn, Berlin, 2005.
- [8] DIN EN ISO 6946:04.2008: *Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 5946:2007)*, Deutsche Fassung EN ISO 6946:2007, Berlin, 2008.
- [9] Beißner, E.; Eilering, S.: *Ermittlung des Aufbaus und der Stoffkennwerte von Außenbauteilen mit Hilfe von In-situ-Messungen und FEM Berechnungen*. Bautechnik 86, Heft 2, S. 94-98, 2009.
- [10] DIN 4108-4:2004-07: *Wärmeschutz und Energie – Einsparungen in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchtetechnische Bemessungswerte*. Berlin, 2004.