

Thermisches Messverfahren für mobile U_g -Wert-Messungen an Verglasungen

Hippeli Sven, Helmut Weinsläder, Hans-Peter Ebert

¹ Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern), Am Galgenberg 87, 97074 Würzburg, E-Mail: sven.hippeli@zae-bayern.de

Einleitung

Fenster bilden oftmals die thermischen Schwachstellen in der Gebäudehülle. Diese Schwachstellen lassen sich in der Praxis durch Thermographieaufnahmen qualitativ abbilden, eine quantitative Bewertung der eingebauten Verglasungen, d.h. die Bestimmung eines U_g -Wertes, ist hiermit jedoch nicht möglich. So bleibt oftmals unklar, ob eine verbaute Verglasung die Anforderungen an den vorgegebenen Wärmeschutz erfüllt. Ist dagegen der vor Ort gemessene U_g -Wert der Bestandsverglasung bekannt, können Aussagen über deren Qualität getroffen werden.

In dieser Arbeit wird ein transientes thermisches Messverfahren vorgestellt, mit dem sich der U_g -Wert von Bestandsverglasungen, unabhängig vom vorhandenen Temperaturgefälle zwischen Innen und Außen, mit einer kurzen Messdauer, ohne Ausbau der Verglasung vor Ort zuverlässig mit Angabe einer Messunsicherheit bestimmen lässt.

Wärmetransport durch die Verglasung

Moderne Verglasungen weisen niedrige U_g -Werte von 1,0 W/(m²K) (Zweischeibenisolierverglasung) und 0,5 W/(m²K) (Dreischeibenisolierverglasung) auf. Um diese niedrigen U_g -Werte zu realisieren, werden Scheibenzwischenräume mit möglichst kleinen Wärmedurchlasskoeffizienten benötigt. Der Wärmedurchlasskoeffizient h_s des Scheibenzwischenraumes (SZR) setzt sich hierbei aus den beiden Wärmedurchlasskoeffizienten des Strahlungsanteils h_r und des Gaswärmehtransportanteils h_g zusammen:

$$h_s = h_r + h_g \quad (1)$$

Während beim Wärmetransport durch Strahlung eine direkte Proportionalität zwischen dem strahlungsbezogenen Wärmedurchlasskoeffizienten h_r und der dritten Potenz der mittleren Temperatur T_m besteht (ϵ = Emissivgrad, Ω = Stefan-Boltzmann-Konstante):

$$h_r = 4\sigma \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1} T_m^3 \quad (2)$$

liegen bei dem Wärmetransport über die Gasphase Temperaturabhängigkeiten in der Gaswärmeleitfähigkeit λ_g , der Nusseltzahl Nu und der SZR-Dicke d_{SZR} vor:

$$h_g = Nu \frac{\lambda_g}{d_{SZR}} \quad (3)$$

Durch diese Temperaturabhängigkeiten in der Wärmeübertragung und damit auch im U_g -Wert, können bei der experimentellen Ermittlung größere Abweichungen gegenüber der DIN EN 673 [1] entstehen, da hier der U_g -Wert für eine Temperaturdifferenz von 15K und eine absolute mittlere Temperatur von 283K definiert ist. Dieses Temperaturniveau ist in der Praxis meist nicht

vorhanden, eine rechnerische Korrektur des gemessenen U_g -Wertes vom Temperaturniveau der Messung auf das Temperaturniveau der DIN [1] ist daher erforderlich.

Messprinzip

Etablierte Messverfahren zur Bestimmung des U_g -Wertes von Verglasungen können in mobile und ortsfeste Messverfahren aufgeteilt werden. Die ortsfesten Messverfahren (Plattenapparatur) weisen eine hohe Messgenauigkeit auf, die Verglasung muss zum Vermessen allerdings ausgebaut und abtransportiert werden. Die mobilen Messverfahren [2] [3] erlauben eine Messung vor Ort bei kurzer Messdauer, sind aber durch die äußeren Umgebungseinflüsse hinsichtlich der Genauigkeit limitiert, und können nur bei einem ausreichend großen und stationären Temperaturgefälle zwischen Innen und Außen eingesetzt werden.

Um diese Nachteile zu eliminieren, wurde das in Abbildung 1 dargestellte Messprinzip entwickelt.

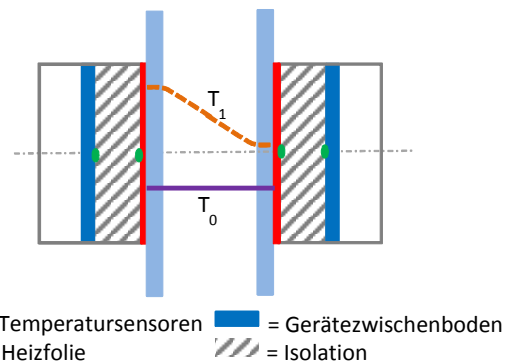


Abbildung 1: Messprinzip und Aufbau des Messgerätes. Zwei Gerätehälften werden an die Außenflächen der Verglasung (hier eine Zweischeibenverglasung) gegenüber angebracht. Je nach vorhandenem Temperaturgefälle kann eine Temperaturänderung durch Aufheizen (aktiver Modus) oder nur durch Anbringen der Gerätehälften (passiver Modus) erreicht werden.

Das Messgerät besteht aus zwei symmetrischen Gerätehälften. Der schematische Aufbau einer solchen Gerätehälfte ist ebenfalls in Abbildung 1 zu sehen (Schnittdarstellung).

Zwei symmetrisch aufgebaute Sensorhälften werden auf beiden Seiten der Verglasung angebracht. Ist kein ausreichend großes Temperaturgefälle vorhanden, kann eine entsprechende Temperaturdifferenz durch Aufheizen einer Sensorhälfte erzeugt werden (aktiver Modus). Ist das vorhandene Temperaturgefälle ausreichend, so unterbleibt der Aufheizprozess (passiver Modus). In beiden Fällen bewirkt die Applikation der Sensorhälften eine Temperaturänderung (aktiv oder passiv), welche die Grundlage für das transiente Messverfahren bildet.

Numerische Modellierung und Auswertung der Messdaten

Um die beim Messen auftretenden transienten Temperaturänderungen numerisch beschreiben zu können, wurde ein flexibles eindimensionales Finite Differenzen Modell erstellt, welches neben der zu messenden Verglasung mit variabler Geometrie auch die beiden Gerätehälften beinhaltet. Die materialspezifischen thermischen Kenngrößen der verbauten Gerätematerialien und der Scheiben werden als bekannt vorausgesetzt. Da für die Berechnung die genauen Dicken der verbauten Scheiben erforderlich sind, werden diese vor der Messung mit einem optischen Messgerät [4] bestimmt. Somit reduzieren sich die gesuchten Größen auf den Wärmedurchlasskoeffizient des SZR.

Bei der Messung ergeben sich Unterschiede zur DIN [1] durch die partielle Abdeckung der Verglasung mit den Gerätehälften. Vor allem im aktiven Modus entstehen durch das partielle Aufheizen andere Strömungsverhältnisse im SZR als bei natürlicher Temperaturdifferenz. Es entstehen Massenströme die den Messbereich zwischen den Gerätehälften verlassen und nicht an der Wärmeübertragung beteiligt sind. Diese Massenströme müssen in der Modellierung berücksichtigt werden. Das Hauptproblem besteht darin, dass die für eine Strömungssimulation benötigten Kenngrößen (Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, dynamische Viskosität) gänzlich unbekannt sind. Selbst wenn das Füllgas der zu vermessenden Verglasung bekannt wäre, muss durch den unbekanntem Gasfüllgrad von einem beliebigen Gasgemisch ausgegangen werden (mit ebenfalls unbekanntem Kenngrößen, Ausnahme bei reiner Luftfüllung). Aufgrund dieser Problematik scheidet eine Strömungssimulation aus. Um dieses Problem dennoch zu lösen, wurde folgendes Grundlagenmodell (GM) entwickelt:

Beim Aufheizen findet durch den Temperaturimpuls eine erhöhte Konvektion gegenüber natürlicher Temperaturdifferenz statt. Ein Teil der eingekoppelten Energie wird durch die angeregte Strömung aus dem Bereich der Messfläche transportiert und außerhalb des Messbereiches abgegeben. Dies führt zu einer um diesen Energiebetrag verringerten Temperaturerhöhung (Temperaturantwort) auf der gegenüberliegenden Scheibe. Umgekehrt fällt auf der aufgeheizten Seite die Scheibentemperatur durch die erhöhte Strömung und die Energieabgabe außerhalb des Messbereiches schneller ab. In Abbildung 2 ist der Temperaturverlauf einer solchen aktiven Messung dargestellt.

Neben den Rand- und Startbedingungen, d.h. Temperaturen der Zwischenböden und Temperaturen zum Beginn der Messung, wird der Numerik die gemessene Heiztemperatur vorgegeben. Numerisch lässt sich dieses GM wie folgt für die Auswertung der Messung nutzen:

Um die Temperaturantwort auf der Gegenseite zu berechnen, wird der noch unbekanntes Wärmedurchlasskoeffi-

zient des SZR im numerischen Modell solange variiert, bis sich eine gute Übereinstimmung zwischen der berechneten (vgl. Abbildung 2) und der gemessenen Temperaturantwort einstellt (numerische Fitroutine).

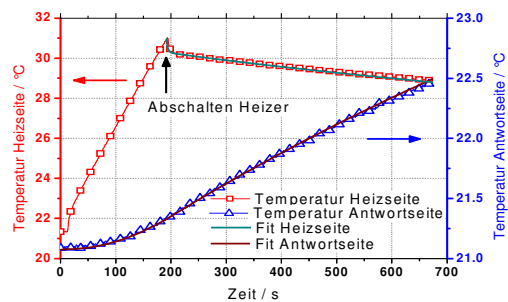


Abbildung 2: Dargestellt ist der Temperaturverlauf einer U_g -Wert-Messung mit aktivem Aufheizen.

Da nach dem GM die erzwungene Strömung den Anstieg der Temperaturantwort um den abgeführten Energiebetrag reduziert, wird aus dem zuvor ermittelten Wärmedurchlasskoeffizienten des SZR folgerichtig ein etwas zu niedriger U_g -Wert berechnet. Gibt man dagegen in der Numerik die Temperaturantwort und die Heiztemperatur bis zum Abschalten der Heizung vor, so kann im Gegenzug der Temperaturabfall auf der Heizseite berechnet und durch Variation des SZR der Wärmedurchlasskoeffizient angefitet werden (Abbildung 2). Der hierdurch bestimmte U_g -Wert würde nach der Modellvorstellung erwartungsgemäß etwas zu hoch liegen (schnellerer Temperaturabfall => schlechtere Dämmung).

Durch diese Vorgehensweise werden der zu geringe Energietransport auf die Gegenseite, und der zu hohe Energieverlust der aufgeheizten Scheibe, in einem zu kleinen und einem zu hohen SZR-Wärmedurchlasskoeffizienten abgebildet. Um die Querwärmeströmungseffekte des partiellen Aufheizens zu kompensieren und um die Energiebilanz des SZR zu erfüllen, werden beide SZR-Wärmedurchlasskoeffizienten gemittelt. Aus dem gemittelten SZR-Wärmedurchlasskoeffizienten und den restlichen Verglasungsdaten wird abschließend der U_g -Wert der Verglasung berechnet.

Für die passive Messung ohne Heizen wird dasselbe numerische Modell verwendet. Jeweils eine Scheibentemperatur wird vorgegeben und die fehlende berechnet.

Um eine Korrektur des gemessenen U_g -Wertes auf das DIN [1] Temperaturniveau durchzuführen, können mit der Auswertesoftware für Vergleichszwecke im Anschluss weitere Korrekturrechnungen durchgeführt werden.

Ergebnisse

Abbildung 3 stellt die mit dem vorgestellten Messverfahren ermittelten U_g -Werte für verschiedene Verglasungstypen über theoretisch berechneten Werten dar. Es zeigt sich innerhalb der gegebenen Messunsicherheiten eine

sehr gute lineare Korrelation entlang der Winkelhalbierenden.

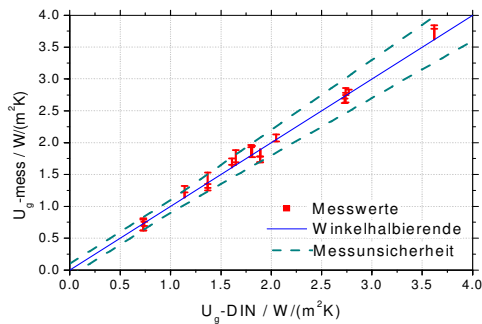


Abbildung 3: Experimentell ermittelte Messunsicherheiten entlang der Winkelhalbierenden.

Abschließend lässt sich feststellen:

- Die experimentell bestimmte relative Messunsicherheit des gezeigten Verfahrens liegt bei $\pm 10\%$ (nicht unter $0,1W/(m^2K)$).
- Die Messdauer liegt bei wenigen Minuten.
- Die Messung von geeigneten Verglasungen ist ebenfalls möglich.

Entsprechende Labor- und Feldtests sind erfolgreich verlaufen. Das vorgestellte Messverfahren wird in Form eines Messgerätes kommerziell vertrieben [5].

Danksagung

Die Ergebnisse stammen aus dem Forschungsprojekt „Fenstercheck“ [6] und wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Literatur

- [1] DIN EN 673, „Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren;“
- [2] Fensterglas-Test, URL: <http://www.fensterglas-test.de>
- [3] U_g-meter, URL: <http://helantec.de/index.php/en/products/special-product/ug-meter>
- [4] GlassBuddy, URL: <http://www.bohle-group.com/shop/search.php?search=glassbuddy>
- [5] Uglass, URL: <http://www.ug-wert-messen.com>
- [6] „Entwicklung eines neuartigen Bewertungstools zur Bestimmung des Energieeinsparpotenzials von Fenstern bei Sanierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung von Verglasung, Rahmen und Anschlüssen“. BMWi Projekt (FkZ 0327654K-Q), URL: <http://www.fenstercheck.info>

Curriculum Vitae

Dipl. Ing. (FH) Hippeli Sven

Ausbildung:

- | | |
|-----------|---|
| 1998 | Fachhochschulreife an der Fachoberschule Bad Neustadt Saale |
| 1999-2004 | Studium Physikalische Technik an der FH Coburg |

Beruflicher Werdegang:

- | | |
|---------|---|
| Ab 2004 | Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, Bereich Energieeffizienz, wissenschaftlicher Mitarbeiter |
|---------|---|