2

39. Jahrgang
April 2017
ISSN 0171-5445
A 1879

Bauphysik

Wärme | Feuchte | Schall | Brand | Licht | Energie

- Modell zur numerischen Untersuchung der Trocknung in Estrichdämmschichten
- Vorhangfassade auf Holzbasis – Untersuchungen zum Schallschutz, Feuchteschutz und Brandschutz
- Autarkie – Tendenzen der solarthermischen Selbstversorgung
- Berechnung der Wärme- und Kälteverluste – Normenvergleich
- Energieeffizienzklassen in VDI 4610 – Rohrdämmungen
- Einfluss der Wärmebehandlung auf Holzfaserplatten
- Integrale Bauforschung zur Wahrung historischer Bausubstanz am Beispiel der Asamkirche St. Georg zu Weltenburg
- Wärmedurchgang bei Doppelfenstern – Konzept zur In-situ-Bewertung historischer Konstruktionen

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

Günther Kain
Florian Gschwandtner
Friedrich Idam

DOI: 10.1002/bapi.201710015

Der Wärmedurchgang bei Doppelfenstern – Konzept zur In-situ-Bewertung historischer Konstruktionen

Historische Kastenfenster stehen noch immer in Verwendung, werden aber seit den 1980er Jahren vermehrt durch sogenannte Thermofenster aus Holz, Metall oder Kunststoff ersetzt. Als Hauptargument für den Fenstertausch wird neben der Haltbarkeit der Oberflächenbeschichtung vor allem der hohe Wärmedurchgang bei Kastenfenstern ins Treffen geführt. Dabei werden aber für diese historischen Fenster nicht Messergebnisse am realen Bestand, sondern normativ festgelegte Default-Werte herangezogen. Diese Default-Werte betragen allerdings das Drei- bis Vierfache der Laborwerte der industriell gefertigten Thermofenster. Um den tatsächlichen Wärmedurchgang bei Kastenfenstern bestimmen zu können, wurde an der Höheren Technischen Bundeslehranstalt (HTBLA) in Hallstatt/Oberösterreich die Entwicklung eines Messverfahrens in Angriff genommen, das an Ort und Stelle am realen Objekt einsetzbar ist. Die erste Messreihe legt den Schluss nahe, dass der reale Wärmedurchgang bei Kastenfenstern deutlich niedriger liegt, als die Default-Werte vorgeben.

Thermal conductivity of box-type windows – an in-situ evaluation concept for historical buildings. *Historic box-type windows are still in use, but are, starting with the 1980ies, increasingly replaced by insulating glass windows made from wood, metal, or plastic. Primary argument for a window change is the durability of the surface coating and the high heat loss with box-type windows. Historic windows are thereby not evaluated with real, experimental values, but are characterized by default-values. These values are three to four times as high as the heat transfer values of modern insulating glass windows measured in the laboratory. In order to determine the real heat transfer values of box-type windows, a measuring system is developed at the Higher Technical College in Hallstatt, which can be applied in-situ the real object. First results suggest that the real heat transfer through box-type windows is significantly lower than assumed.*

1 Kastenfenster

Von der Mitte des 18. Jahrhunderts bis zur ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts waren Doppelfenster, meist als Kastenfenster ausgeführt, der überwiegend eingebaute Fenstertyp [1]. Beim Kastenfenster, einer Entwicklung des 19. Jahrhunderts, sind Innen- und Außenflügel gemeinsam mit dem Fensterstock zu einer konstruktiven Einheit zusammengefasst. Für den Verlauf des Temperaturgradienten ist das physikalische Verhalten des Luftpolsters zwischen Innen- und Außenflügeln entscheidend. Die Dicke dieses Luftpolsters liegt bei Kastenfenstern im Dezimeter-Bereich, während bei modernen Thermofenstern, die nur eine Flügelebene aufweisen, der Gaspolster zwischen den Scheiben des Isolierglases im Zentimeterbereich liegt.

2 Fenstertausch

Der Bestand an historischen, handwerklich aus Holz gefertigten Fenstern ist in Österreich immer noch relevant, obwohl diese Fenstertypen fortlaufend ausgebrochen und durch industriell gefertigte Thermofenster ersetzt werden. Durch diese Maßnahme wird, mit öffentlichen Mittel gefördert – so die gängige Meinung – Energie gespart. Für die Wärmedurchgangskoeffizienten der historischen Fensterkonstruktionen werden nicht Messergebnisse am realen Bestand, sondern normativ festgelegte Default-Werte [2] herangezogen, was die Bestandfenster in bauphysikalischer Hinsicht unter Umständen unterbewertet [3].

So ist ein fachgereicht restauriertes Doppelfenster in einer ganzheitlichen Betrachtung dem rezenten Industriefenster in energetischer Sicht häufig überlegen. Nebenbei erzeugt der Fenstertausch oftmals bauphysikalische Probleme wie Schimmelbildung an Laibungen und in Eckbereichen, da sich das bauphysikalische Verhalten des Gesamtsystems verändert. Integrativ betrachtet ist damit unter Umständen der Erhalt des historischen Bestandes – auch vom Energieverbrauch her gesehen – die beste Lösung [4]. So werden etwa in Schweden und Norddeutschland von mobilen „Fensterhandwerkern“ Holzfenster mit in historischen Handwerkstechniken an Ort und Stelle repariert. Dadurch wird einerseits der Bestand historischer Fenster energieeffizient erhalten und andererseits das regionale Handwerk gefördert [5].

3 Restauriertechnik-Ausbildung an der HTBLA Hallstatt

Im Ausbildungszweig Restauriertechnik der HTBLA Hallstatt im oberösterreichischen Salzkammergut wird, neben der Instandsetzung von Möbeln, ein zweiter Schwerpunkt auf die Restaurierung und energetische Optimierung historischer Tür- und Fensterkonstruktionen gelegt. Im Rahmen des Lehrplans wird den Schülerinnen und Schülern die Bestandsaufnahme und Befundung historischer Holzobjekte und Holzkonstruktionen an Ort und Stelle und im Labor vermittelt.

Im Werkstättenunterricht werden die handwerklichen Fertigkeiten in überlieferten Techniken, verknüpft mit dem

 © Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin

Einsatz moderner Technologien, vermittelt. Der Lehrplan ist mit der Architekturabteilung des österreichischen Bundesdenkmalamtes akkordiert.

4 Restauriertechnik-Ausbildung an der HTBLA Hallstatt

Der Grundgedanke des hier vorgestellten Messkonzeptes ist es, bestehende Fensterkonstruktionen an ausreichend vielen Stellen mit Sensoren zu besetzen. So werden Lufttemperatur, Oberflächentemperatur und Luftbewegung an signifikanten Stellen ermittelt und über den jeweiligen Messzeitraum gespeichert. Im Anschluss können aus den Temperaturprofilen innerhalb der (quasi-) stationären Temperaturphasen die Wärmedurchgangskoeffizienten der Konstruktion näherungsweise bestimmt werden. Der Wärmetransport erfolgt über drei Mechanismen: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Für das hier vorgestellte Modell wurde – um dem maßgeblichen U-Wert-Rechenmodell möglichst nahe zu kommen – vereinfachend der Einfluss von Konvektion und Strahlung vernachlässigt. So ergibt sich für den (eindimensionalen) Wärmefluss über den Querschnitt eines Kastenfensters in Richtung des Temperaturgradienten bei stationären Temperaturbedingungen der Zusammenhang nach Gl. (1) und (2). Folglich können die Temperaturdifferenzen zwischen Schichten und die Temperaturen an den Schichtgrenzen nach Gl. (3) und (4) ermittelt werden. Die Zielfunktion nach Gl. (5) erlaubt die deduktive Ableitung der Variablen in Gl. (1). Die Lösungen wurden unter Einsatz des Microsoft Excel Solvertools ermittelt. Der U-Wert des betrachteten Systems ergibt sich aus dem Reziprokwert des Wärmedurchgangwiderstands nach Gl. (1).

Hierzu sei angemerkt, dass der U-Wert zwar einerseits nur bei stationären Temperaturbedingungen gültig ist, andererseits aber in der Baupraxis die gängige Größe zum Vergleich der energetischen Leistung von Bauteilen ist. Um die allgemeine Akzeptanz und einfache Vergleichbarkeit der Messmethode zu erleichtern, erfolgt die Darstellung mit Hilfe des U-Werts.

In weiterer Folge des Projekts sollen die Modellierungsansätze auch auf instationäre Situationen und um Randeinflüsse erweitert werden. Dabei werden diskrete Modellierungssätze verfolgt, wie sie bereits an inhomogenen Mehrphasensystemen erfolgreich eingesetzt wurden [6].

$$R = Rsa + \frac{d_{ga}}{\lambda_{ga}} + Rsi + \frac{d_l}{\lambda_l} + Rsi + \frac{d_{gi}}{\lambda_{gi}} + Rsi \qquad (1)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{R} * \Delta\vartheta * A \qquad (2)$$

$$\Delta\vartheta_j = \frac{\Delta\vartheta}{R} * R_j \qquad (3)$$

$$\vartheta_m = \vartheta_a + \sum_{j=1}^{m} \Delta\vartheta_j \qquad (4)$$

$$\sum_{i}^{n} \left(\vartheta_{r_i} - \vartheta_{m_i}\right)^2 \rightarrow \min \qquad (5)$$

mit:

R	Wärmeduchgangswiderstand [$m^2 \cdot K/W$]
Rsa	Wärmeübergangswiderstand außen [$m^2 \cdot K/W$]
d_{ga}	Dicke der äußeren Glasscheibe [m]
λ_{ga}	Wärmeleitfähigkeit der äußeren Glasscheibe [$W/(m \cdot K)$]
Rsi	Wärmeübergangswiderstand innen [$m^2 \cdot K/W$]
d_l	Dicke des Luftzwischenraums Glasscheibe [m]
λ_l	Wärmeleitfähigkeit des Luftzwischenraums [$W/(m \cdot K)$]
d_{gi}	Dicke der inneren Glasscheibe [m]
λ_{gi}	Wärmeleitfähigkeit der inneren Glasscheibe [$W/(m \cdot K)$]
$\frac{dQ}{dt}$	Energiefluss pro Zeiteinheit [W]
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz zwischen innen und außen [K]
A	Fläche der betrachteten Einheit [m^2]
$\Delta\vartheta_i$	Temperaturdifferenz zwischen zwei Messpunkten j – 1 und j [K]
R_j	Wärmedurchlasswiderstand der Schicht zwischen j – 1 und j [$m^2 \cdot K/W$]
ϑ_m	Berechnete Temperatur an der Innenseite einer Schicht m [K]
ϑ_a	Außentemperatur [K]
ϑ_r	Gemessene Temperatur an der Innenseite einer Schicht [K]
n	Anzahl der seriellen, thermischen Widerstände – im vorliegenden Fall 7

5 Ergebnisse der ersten Messreihe

Als Versuchsobjekt für die erste Messreihe wurde eine Fensterkonstruktion aus einem denkmalgeschützten Gebäude im UNESCO-Welterbegebiet Hallstatt-Dachstein/Salzkammergut ausgewählt. Das sogenannte Benefiziatenhaus wurde im Spätbarock errichtet, wobei die Außenflügel der untersuchten Fensterkonstruktion im frühen 20. Jahrhundert erneuert worden sein dürften. Die Innenflügel stammen aus dem späten 20. Jahrhundert. Für diese Annahmen sprechen die Details der Tischlerkonstruktion, der Erhaltungszustand der Holzteile, die unterschiedlichen Gläser sowie die jeweils zeitlich dazu passende Beschlagstechnologie.

Diese Doppelfensterkonstruktion (Bild 1 und Bild 2) wurde über die Monate Oktober und November hinweg messtechnisch überwacht. Dabei wurden Lufttemperaturen, Oberflächentemperaturen an beiden Seiten beider Fensterflügel sowie das Klima im Scheibenzwischenraum aufgezeichnet (Bild 3). Aus den so gewonnen Messwerten konnte nun der tatsächliche U-Wert der Konstruktion – wie oben dargestellt – deduktiv rückgerechnet werden. Erste Auswertungen zeigen, dass der U-Wert der betrachteten Konstruktion bei ca. 1,1 $W/m^{-2} \cdot K^{-1}$ liegt und damit deutlich geringer ausfällt als der normativ vorgegebene Defaultwert von 2,50 $W/m^{-2} \cdot K^{-1}$, siehe [7], dort Punkt 4.3.1 Default-Werte für Fenster von Gebäuden, die vor 1900 errichtet wurden. Entscheidend ist hier vor allem der Wärmedurchlasswiderstand des Luftpolsters zwischen Innen- und Außenflügel, der deutlich bessere Werte aufweist, als in standardisierten Tabellenwerken angenommen wird. Ein Grund dafür ist, dass die allgemein angenommene Konvektion in diesem Bereich sehr gering ausgeprägt ist

Bild 1. Betrachtete Doppelfensterkonstruktion am Benefizium Hallstatt, Österreich
Fig. 1. Double window at the Benefizium Hallstatt, Austria

Bild 3. Temperaturprofil über die Tiefe der Kastenfensterkonstruktion mit überlagertem Modell [8]
Fig. 3. Temperature profile across the window depth with overlaid modelling results

(im betrachteten Messzeitraum war die Luftgeschwindigkeit im Scheibenzwischenraum stets kleiner als 0,1 m/s). Die bisherigen Ergebnisse zeigen in Übereinstimmung mit [3], dass Erhaltungsmaßnahmen an historischen Fensterkonstruktionen durchaus ökonomisch und energetisch zu rechtfertigen sind. So zeigte sich beispielsweise, dass der erforderliche Energieaufwand für die Restauration der in der Studie betrachteten Kastenfensterkonstruktion und einer anschließenden 15-jährigen Nutzungsphase geringer ist, als jener bei einem Fenstertausch mit einem Kunststofffenster.

6 Ausblick

Bei Betrachtung des Gesamtenergieverbrauchs im Sinne von [9] kann die Reparatur eines historischen Fensters sehr wohl die energieeffizienteste Maßnahme darstellen. Zur Bewertung dieser Handlungsoption kann nun das hier vorgestellte messtechnische Verfahren herangezogen werden, mit welchem die U-Werte für beliebige Fensterkonstruktionen in-situ ermittelt werden können. Dadurch wird es möglich im jeweiligen Einzelfall messtechnisch nachzuweisen, ob durch die Reparatur eines bestehenden Fensters eine Verbesserung des U-Werts erzielt werden kann. In weiterer Folge können auf dieser Basis sowohl eine Gesamtökobilanz einer Fensterreparatur als auch die eines Fenstertausches aufgestellt werden, durch welche die Gesamtenergieeffizienz der verschiedenen Handlungsoptionen bewertet werden kann.

Neben den energetischen Eigenschaften eines Fensters ist die Dauerhaftigkeit der Oberflächenbeschichtung maßgeblich. Daher widmet sich ein weiteres ins Auge gefasste Forschungsfeld der Rekonstruktion historischer Ölanstrichtechniken und deren Bewertung auf Dauereignung unter veränderlichen Klimabedingungen.

Die energieeffiziente Reparatur von Fenstern sollte auf regionalem Erfahrungswissen basieren, weil sich im Laufe der Zeit spezifische, für den Standort besonders gut geeignete Konstruktionstypen ergeben haben. Mit naturwissenschaftlichen Methoden kann dieses Erfahrungswis-

Bild 2. Grundrissschnitt der betrachteten Doppelfensterkonstruktion [8]
Fig. 2. Horizontal section of the discussed double window construction [8]

sen kritisch hinterfragt und validiert werden. Forschungsziel an der HTBLA Hallstatt ist es ein möglichst umfangreiches, fundiertes Wissen um das Verhalten traditioneller Fensterkonstruktionen und deren Potential zur Selbstregulation bei real gegebenen instationären Klimasituationen zu erarbeiten. Die Weiterentwicklung und Adaption der traditionellen Handwerkstechniken für rezente Ansprüche wird dabei wissenschaftlich begleitet und evaluiert. Durch Qualitätssteigerung in technischer und funktionaler aber auch in gestalterischer Hinsicht, wird die Dauer der Produktzyklen vervielfacht und damit die Energieeffizienz signifikant erhöht.

Literatur

[1] *Maldoner, B.*: Die Fensterkonstruktion im Spannungsfeld von Tradition und Neuerung. Dissertation, Universität Innsbruck, 1993.

[2] OIB Leitfaden OIB-300.6-039/07 Punkt 4.3.1 Default-Werte.

[3] *Huber, A., Korjenic, A., Bednar, T.*: Kastenfenster-Optimierung im historischen Bestand. Bauphysik 35 (2013), Heft 2, S. 107–118.

[4] *Schmid, J.*: Fenstertechnik zwischen Wärme- und Denkmalschutz. In: *Uhlig G., Kohler N., Schneider L.*: Fenster – Architektur und Technologie im Detail. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn, 1994.

[5] www.das-fensterhandwerk.de (22.11.2016)

[6] *Kain, G., Charwat-Pessler, J., Barbu, M. C., Plank, B., Richter, K., Petutschnigg, A.*: Analyzing wood bark insulation board structure using X-ray computed tomography and modeling its thermal conductivity by means of finite difference method. Journal of Composite Materials 50/6 (2016), pp. 795–806.

[7] OIB: Leitfaden des Österreichischen Instituts für Bautechnik „Energietechnisches Verhalten von Gebäuden“ (Version 2.6, April 2007 – OIB-300.6-039/07).

[8] *Gschwandtner, F., Fink, A., Wimmer, J.*: Messtechnische Charakterisierung historischer Kastenfenster und daraus abgeleitete bauphysikalische Simulation. Diplomarbeit, HTBLA Hallstatt, 2015.

[9] Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizient von Gebäuden.

Autoren dieses Beitrages:

DI (FH) DI Günther Kain, guenther.kain@aon.at
HTBLA Hallstatt, Abteilung für Restauriertechnik
Lahnstraße 69, 4830 Hallstatt/Österreich
Fachhochschule Salzburg, Abteilung für Holztechnologie und Holzbau, Markt 136a, 5431 Kuchl

Florian Gschwandtner, gschwandtner.florian@gmail.com
Untersee 150, 4822 Bad Goisern
Student der Luft- und Raumfahrttechnik, Universität Stuttgart

DI Dr. Friedrich Idam, idam@gmx.at
Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger für Bauphysik historischer Baukonstruktionen
HTBLA Hallstatt, Abteilung für Restauriertechnik
Lahnstraße 69, 4830 Hallstatt/Österreich
ICOMOS Austria, World Heritage Monitoring Group