

IMPLEMENTIERUNG UND VALIDIERUNG EINES ALGORITHMUS ZUR THERMISCHEN SIMULATION VON TRANSPARENTEN BAUTEILEN

C. Conrad¹, J. Grunewald¹ und H. Fechner¹

¹Institut für Bauklimatik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

Tel.: + 49 351 463 32911 Fax: +49 351 463 32627

E-Mail: Christian.Conrad@tu-dresden.de

KURZFASSUNG

Bei einem Langzeitmonitoring wurde ein thermisches Verhalten von hochgedämmten Kastenfenstern bis hin zu Schäden an der Verglasung beobachtet, welche mit den herkömmlichen normativen Berechnungsverfahren mit einer getrennten Betrachtung der Strahlungsvorgänge und der Konvektion nicht nachvollzogen werden konnten. Mit zunehmender Verbesserung der Wärmedämmung der Verglasung nehmen die Temperaturdifferenzen und damit das Schadensrisiko infolge der höheren Absorption der kurzwelligen Strahlung und damit die thermischen Spannungen in den Verglasungskonstruktionen zu.

Mit der Implementierung eines Algorithmus zur thermischen Simulation von transparenten Bauteilen steht ein validiertes Werkzeug für eine zeitlich und räumlich detailliertere Auflösung zur Schadens- und Risikobewertung von Fenstern zur Verfügung.

ABSTRACT

During long-term monitoring, a thermal behaviour of highly insulated box-type windows up to damages of the glazing was observed, which could not be reconstructed with the conventional normative calculation methods with a separate consideration of the radiation and convection processes. With increasing improvement of the thermal insulation of the glazing, the temperature differences and thus the risk of damage increase due to the higher absorption of short-wave radiation and thus the thermal stresses in the glazing structures.

With the implementation of an algorithm for the thermal simulation of transparent components, a validated tool for a temporally and spatially more detailed resolution is available for the damage and risk assessment of windows.

EINLEITUNG

Der Klimaschutz ist eine Herausforderung und eine Verantwortung insbesondere gegenüber den nachfolgenden Generationen. Ein Baustein zum Klimaschutz ist die erhebliche Senkung des Energieverbrauches der bestehenden Gebäude. Bei der Sanierung von älteren oder gar zu Denkmälern erklärten Gebäuden stellt die Erhaltung der Originalsubstanz und des Erscheinungsbildes erhöhte Anforderungen an alle am Bau Beteiligten. Für eine energetische Ertüchtigung von historischen Fenstern,

welche auch zukünftigen Anforderungen an den Klimaschutz genügen, sind eine detaillierte Planung und bauphysikalische Betrachtung notwendig.

Die Implementierung und Validierung eines Algorithmus zur thermischen Simulation von transparenten Bauteilen möchte einen Beitrag leisten, damit zukünftig das thermische Verhalten der einzelnen Bestandteile (Verglasung, Randverbund, Rahmen) des energetisch ertüchtigten Fensters realitätsnah simuliert und bewertet werden kann.

MODELLGEBÄUDE IN GÖRLITZ

Durch die modellhafte Sanierung des barocken Gebäudes wurde unter Beachtung der gestalterischen und denkmalpflegerischen Belange das praktisch mögliche Einsparpotenzial im Bereich des Primärenergie-, Trink- und Abwasserverbrauchs quantifiziert.

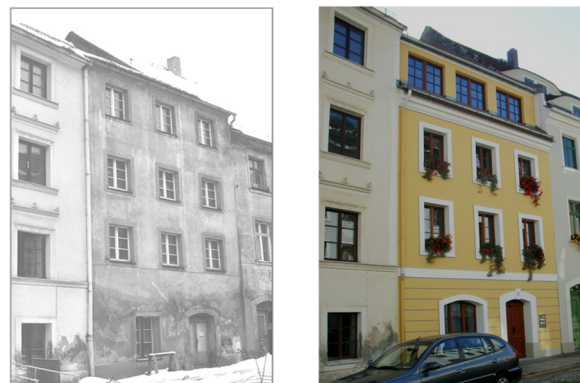


Abbildung 1: Straßenansicht Handwerk 15 in Görlitz/ D vor und nach der Sanierung [Conrad, C.]

Kastenfenster des Modellgebäudes

Bei den in Eigenregie gefertigten Holz-Kastenfenster mit 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (WSV) aus Solarglas/ Diamantglas wurden die für den Klassizismus typischen Fensterprofile und Schlagleistengetriebe eingesetzt.

Messungen und Beobachtungen

Die Hauptaufgabe des Langzeitmonitorings war das Aufzeigen des möglichen Energieeinsparpotenzials beim Heizwärmeverbrauch und bei der regenerativen Energiebereitstellung bei denkmalgeschützten Gebäuden. Zusätzlich wurden 12 Messstrecken in den

Bauteilen verbaut. Darunter ist jeweils eine Messstrecke auf der Nord- und Südseite im und am Kastenfenster sowie im 2. Dachgeschoss auf der Nordseite beim Dachliegefenster.

Es werden die Scheibenoberflächentemperaturen, die Temperatur im Kastenzwischenraum (KZR), die Globalstrahlung und die Außen- und Innenklimadaten aufgezeichnet. Zur Erfassung der Oberflächentemperaturen wurden die ca. 1 mm kugelförmige Ntc-Fühler ca. 12 cm vom Randverbund positioniert, um die Laibungs- und Eigenverschattung und den Einfluss des Randverbundes zu minimieren. Die Zuleitung und der Fühler wurden mit speziellem Klarsilikon an die Glasoberfläche angebunden. (siehe Abb. 2).

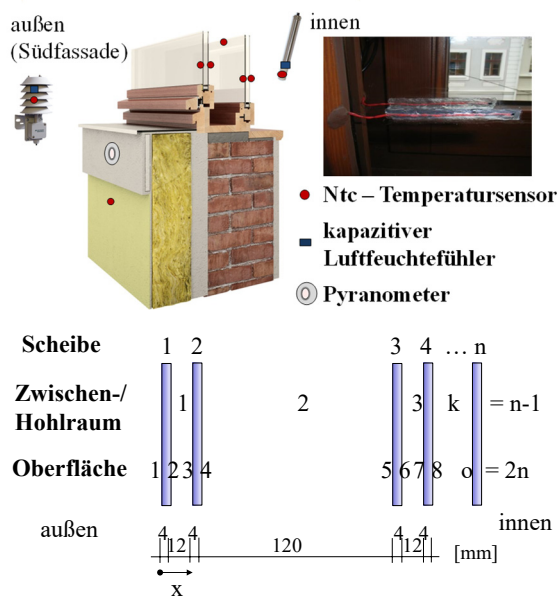


Abbildung 2: Aufbau der Messstrecke Kastenfenster, 1. DG Süd, Nummerierungsdefinition [Conrad]

Die Temperaturen auf der Südseite steigen nur nachts von außen nach innen an. Die maximale Globalstrahlung (\perp zur Fassade) im Beispiel-Zeitraum Juli 2017 liegt bei ca. 800 W/m^2 . Die maximale Scheibenoberflächentemperatur auf der Außenseite beträgt ca. $48 \text{ }^\circ\text{C}$ und auf der Innenseite ca. $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (siehe Abb. 3). Durch die Absorption der kurzwelligigen Strahlung steigt die Temperatur im Fensterkasten auf über $53 \text{ }^\circ\text{C}$ an (siehe T_{04} Abb. 11) an. Es findet eine Umkehrung der Transmissionsrichtung statt: von der Energie vom Fensterkasten in Richtung Innenraum und gleichzeitig auch nach außen. In der Übergangszeit, bei flachem Einstrahlungswinkel ist dieser Effekt erwünscht. In der Hitzeperiode wirken die Balkone bei den darunterliegenden Geschossen als Verschattung. Bei drei Fenstern ohne Verschattung ist auf der Südseite im Bereich der Wiener Sprosse jeweils ein Spannungsriß in der Übergangszeit aufgetreten. Dabei ist die äußerste Scheibe betroffen.

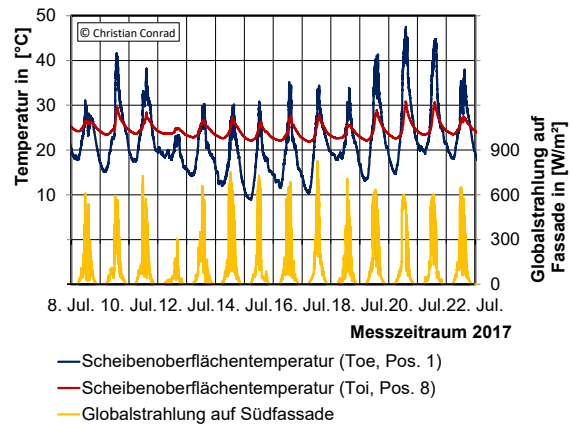


Abbildung 3: Verlauf der Scheibenoberflächentemperaturen und der Globalstrahlung [Conrad]

Auf den horizontalen Flächen der Fenster, wie zum Beispiel dem Wetterschenkel, den Sprossen und den Querstücken der Flügel, sind Risse und Farbablplatzungen der Dickbeschichtung zu verzeichnen. Dieses Schadbild tritt nur an den Fenstern der Südfassade ohne Verschattung auf und wird im Wesentlichen durch den thermischen Stress infolge der stark wechselnden Oberflächentemperaturen verursacht (siehe Abb. 4).



Abbildung 4: Kastenfenstertür Südseite ohne Verschattung, Riss in der äußeren Scheibe der außenliegenden WSV, Farbablplatzungen der Dickbeschichtung [Conrad]

HERLEITUNG UND ANWENDUNG DES AUFGESTELLTEN SIMULATIONS-ALGORITHMUS

Die normativen Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Kennwerte der Verglasung betrachten die Strahlungsvorgänge [DIN EN 410] und die thermischen Wärmetransportprozesse zur Ermittlung des Ug-Wertes [DIN EN 673] unter stationären Randbedingungen getrennt voneinander.

Anhand des aufgestellten Modells zur thermischen Simulation der Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung können transparente Bauteile und deren Bauteilanschlüsse unter Realklimabedingungen

simuliert werden. Ziel ist die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit und die energetische Optimierung der Konstruktion sowie die Beurteilung der Behaglichkeit anhand der Oberflächentemperatur der Verglasungen. Das am Institut für Bauklimatik entwickelte Programm [DELPHIN] ist ein numerisches Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransport für 1D-, 2D- und 3D-Probleme, welches auf der Finite-Volumen-Methode beruht. Dieses Programm zur Berechnung von opaken Bauteilen wurde um die Konvektion und die Absorption ergänzt und zu einem Programm zur Berechnung von transparenten Bauteilen weiterentwickelt. Zusätzlich können damit unter Berücksichtigung der Feuchtespeicherung hydrothermisch realistische Schadensprognosen (Holzerstörung und Rissbildung bei Scheiben) in der Ingenieurpraxis erstellt werden. Im Vergleich zur CFD-Simulation/ Multiphysik wird nur ein Bruchteil der Rechenleistung bzw. -zeit benötigt.

Randbedingungen und Geometrie

Die Innen- und Außentemperatur sowie die kurzwellige und langwellige Strahlung sind die wesentlichen äußeren Randbedingungen, welche auf das transparente Bauteil einwirken. Im Zusammenhang mit der Bauteilsimulation können die relative Luftfeuchte, der Wind, die Windrichtung und der Regen mit berücksichtigt werden. Für die Geometrie des transparenten Bauteils ist eine Aufteilung in nachfolgende Bereiche geeignet (siehe Abb. 5):

- Verglasung im ungestörten Bereich (1 D)
- Randverbund Verglasung/Rahmen (2 D)
- Verglasung/ Randverbund/ Rahmen/ Bauteilanschluss (2/3 D)

Die Energieerhaltungsgleichung für den Wärmetransport

Die einzelnen Wärmetransportvorgänge werden nachfolgend den Scheiben, den Zwischen- bzw. Hohlräumen und den Oberflächen zugeordnet. Die Energieerhaltungsgleichung für den Wärmetransport lautet:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot q + \delta_u = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

Q = innere Energiedichte, t = Zeit,
x = Ort in x, y, z-Richtung, q = Wärmestromdichte,
 δ_u = Wärmequellen- und -senken, ρ = Dichte,
c = spezifische Wärme, T = Temperatur

Dabei stehen die Wärmetransportvorgänge im Gleichgewicht mit der Wärmespeicherung. Die Wärmestromdichte beschreibt die Änderung der thermischen Energie über die Grenzen eines Systems

bezogen auf eine bestimmte Fläche und ein bestimmtes Zeitintervall. Die Wärmestromdichte kann sich aus den einzelnen Wärmestromdichten der Wärmeleitung, der Konvektion und der Wärmeübergänge zusammensetzen:

$$q = q_\lambda + q_r + q_c \quad (2)$$

q_λ = Wärmestromdichte der Wärmeleitung, q_r = Wärmestromdichte des langwelligen Strahlungsaustausches, q_c = Wärmestromdichte der Konvektion

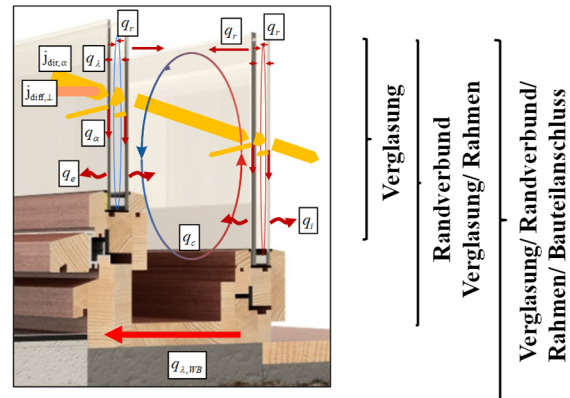


Abbildung 5: Zuordnung der Wärmetransportvorgänge und Aufteilung eines transparenten Bauteils in Bereiche [Conrad]

Innerhalb der Scheibe finden die Wärmeleitung q_λ (siehe B - Wärmeleitung) und die Absorption der Globalstrahlung q_α (siehe F Energietransport infolge der kurzwelligen Strahlung) statt. In den Zwischen- bzw. Hohlräumen erfolgt der langwellige Strahlungsaustausch zwischen den Scheiben (siehe G). Die Konvektion q_c (siehe E - Konvektion im Scheibenzwischenraum) wird als ein Wärmetransportvorgang in dem Zwischen- bzw. Hohlraum jedoch nicht als Massentransport berücksichtigt. Die Wärmestromdichten des Wärmeübergangs auf der Außenseite q_e und Innenseite q_i sind den jeweiligen Oberflächen zugeordnet.

Die Absorption der kurzwelligen Strahlung in den Scheiben q_α wird als Wärmequelle berücksichtigt:

$$\delta_u = q_\alpha \quad (3)$$

q_α = Wärmequelle der Absorption der kurzwelligen Strahlung in den Scheiben

Eine Berücksichtigung der Absorption auf den Außenoberflächen des Fensters ist bereit mit dem Programm [DELPHIN] möglich. Bei den Innenoberflächen ist eine externe Vorberechnung unter Berücksichtigung der (Eigen-) Verschattung notwendig. Nachfolgend werden die einzelnen Wärmetransportvorgänge und die Wärmespeicherung näher beschrieben.

A Speicherung

Im Vergleich zu anderen Bauteilen besitzen transparente Bauteile in Bezug auf die Wärmeübertragungsquerschnitte eine geringe Speichermasse und damit verbunden eine schnelle Änderung der Wärmetransportvorgänge und der Temperatur. Die Speicherung der Wärmeenergie (innere Energie) ist die zeitliche Änderung der Energiedichte im Volumen und daraus abgeleitet die zeitliche Änderung der Temperatur (siehe Gleichung (1)).

B Wärmeleitung

Der Wärmedurchgang bei einer hohlraumfreien Baukonstruktion setzt sich zusammen aus der Summe der Wärmeleitung in den einzelnen Schichten des Bauteils und den Wärmeübergängen an den Rändern.

C Wärmeübertragung auf der Außenseite

Der äußere Wärmeübergang findet zwischen der Oberfläche des Festkörpers Glas und des Fluids Außenluft an den Rändern statt. Die äußeren Wärmeübergangsvorgänge setzen sich aus der Konvektion und der Wärmestrahlung zusammen. Der konvektive Anteil der Wärmeübertragung ist abhängig von der Oberfläche des Glases (z. B. Verschmutzungsgrad), der Neigung, der Luftgeschwindigkeit, der Luftrichtung, der Temperatur des Fluids und der Glasoberfläche.

Der radiative Anteil der äußeren Wärmeübertragung berücksichtigt die Strahlungswechselwirkung des langwelligen Strahlungsaustausches mit der Umgebung.

D Wärmeübertragung auf der Innenseite

Die inneren Wärmeübertragungsvorgänge setzen sich ebenfalls aus der Konvektion und der Wärmestrahlung zusammen. Der konvektive Anteil der inneren Wärmeübertragung ist im Jahresmittel gegenüber der äußeren Wärmeübertragung geringer. Er wird durch den Temperaturunterschied zwischen der Oberfläche des Glases und der Raumluft verursacht. Der radiative Anteil der inneren Wärmeübertragung berücksichtigt den langwelligen Strahlungsaustausch zwischen der Oberfläche der Konstruktion und den Raumbooberflächen (vgl. [DIN EN 673]).

E Konvektion im Scheibenzwischenraum

Die Konvektion im Scheibenzwischenraum bewirkt zusätzlich einen Wärmetransport durch das Mitführen der thermischen Energie des strömenden Fluids (Luft, Edelgase: Argon, Krypton, Xenon) in einem geschlossenen Hohlraum. Die Temperatur des Fluids erhöht sich an der warmen Außen- oder Innenoberfläche und kühlt sich an der kalten Oberfläche ab. Infolge der induzierten Massedichteänderung und damit verbundenen Gravitation kommt es zum Aufsteigen des Fluids an

der warmen und zum Absinken an der kalten Oberfläche. Es bildet sich eine Konvektionswalze aus (siehe Abb. 5). Bei dieser freien (natürlichen) Konvektion erfolgen eine Wärmeaufnahme des Fluids an der warmen Seite und eine Wärmeabgabe an der kalten Seite.

Die Konvektion ist abhängig vom Fluid im Scheibenzwischenraum und dessen physikalischen Eigenschaften (Dichte, dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität) in Abhängigkeit von der Temperatur, der Geometrie des Hohlraumes (Höhe, Breite) und des Temperaturunterschiedes zwischen den Scheiben.

Durch eine CFD-Simulation (Multiphysik) können das Strömungsfeld und die Temperaturverteilung ermittelt werden. Für die Geometrien: schmaler Hohlraum (vertikal, horizontal, geneigt) und breiter vertikaler Hohlraum (z. B. Kastenfenster) gibt es halbempirische Beschreibungs- und vereinfachte analytische Modelle für die Berechnung des Wärmetransportes infolge der Konvektion mit einem definierten Strömungsfeld und einer dazugehörigen Temperaturverteilung (vgl. Abb. 5). Für die Berücksichtigung der Konvektion im Programm [DELPHIN] wurde ein geeignetes analytisches Modell für die freie Konvektion in geschlossenen Hohlräumen für transparente Bauteile für typische Anwendungsfälle untersucht. Zum Teil sind deren Anwendungsgrenzen nur unzureichend dokumentiert bzw. wurden diese Modelle nicht primär für die Konvektion bei transparenten Bauteilen entwickelt. Die analytischen Konvektionsmodelle [DIN EN 673], [ISO 15 099], [Marek u. Nitsche] (Elsherbiny, Raithby und Hollands), [VDI-Wärmeatlas] (Modell Klan und Thess) und [Häupl] wurden mittels einer Parameterstudie bei einer 2-Scheiben-Verbundverglasung (vertikal, horizontal, 30°, 45° und 60° geneigt) und Kastenfenster für den bautypischen Temperaturbereich von -25 °C bis 80 °C untersucht. Die Untersuchungen betrachteten eine maximale Temperaturdifferenz zwischen den Scheiben von 60 Kelvin. Bei der Variation des Scheibenabstandes wurden die Randbedingungen der [DIN EN 673] verwendet. Bei den analytischen Berechnungen werden die Materialkennwerte des Edelgases Krypton mit 90 % Füllgrad auf $T_m=10$ °C bezogen. Das Edelgas Krypton wird bei Wärmeschutzverglasungen verwendet, welche schmalere Verglasungsgesamtdicken und somit schmale Fensterprofile mit historischen Ansichtsbreiten bei denkmalgeschützten Gebäuden ermöglichen. Die Stärke der Glasscheiben beträgt 4 mm. Der Emissionsgrad der Wärmeschutzverglasung beträgt $\varepsilon=0,03$ und der K-GlassTM-Beschichtung $\varepsilon=0,15$. Die K-GlassTM-Beschichtung besitzt dauerhaft eine hohe chemische und mechanische Widerstandsfähigkeit sowie eine hohe Kratzfestigkeit. Somit ist diese für die Anwendung in Kastenfenstern prädestiniert. Zusätzlich wurden die Neigung der Verglasung, die Temperaturunterschiede

im Scheibenzwischenraum (SZR) und die Breite des Scheibenzwischenraumes variiert. Beispielpflicht wird die Untersuchung für die schmale vertikale ebene Schicht erörtert.

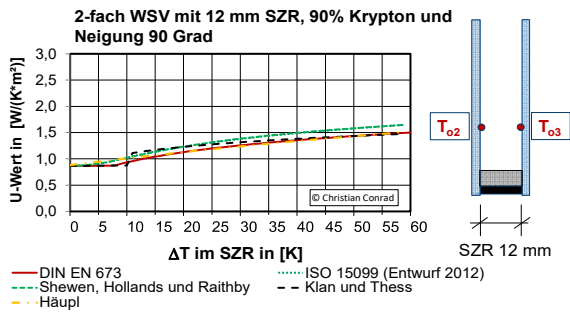


Abbildung 6: Vergleich der U-Wert-Berechnungsmodelle bei der Variation des Temperaturunterschiedes im SZR [Conrad]

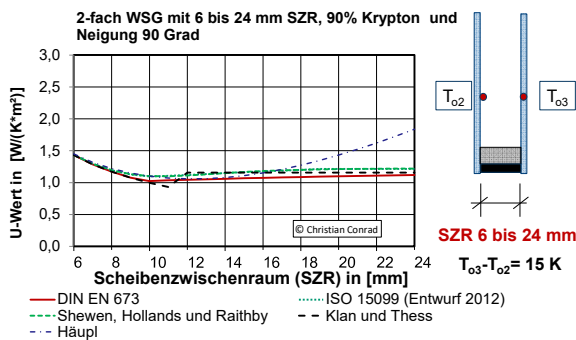


Abbildung 7: Vergleich der U-Wert-Berechnungsmodelle bei der Variation des Scheibenzwischenraumes [Conrad]

Bei einer vertikal eingebauten WSV liegen die ermittelten U-Werte der einzelnen Konvektionsmodelle dicht beieinander. Das Konvektionsmodell nach [Häupl] liefert ab 18 mm Scheibenzwischenraum (SZR) höhere Werte (siehe Abb. 6 und 7). Bis auf das Modell von Robison und Powlitch aus dem Jahre 1954 aus der [DIN EN 673] verwenden alle anderen Konvektionsmodellzusammenstellungen verschiedene zum Teil sehr komplexe Formeln für verschiedene Einbautagen, SZR und Neigungen. Ein Genauigkeitserfolg bei der U_g-Wert Ermittlung gegenüber der DIN EN 673 konnte bei dieser Parameterstudie bei der Verwendung der komplexen Konvektionsmodellzusammenstellung und einer CFD-Simulation [Kuhne] nicht festgestellt werden.

Das Modell von Robison und Powlitch [DIN EN 673] wurde für die weitere Bearbeitung sowie für die Implementierung in das Programm [DELPHIN] ausgewählt. Es liefert mit einer allgemeingültigen Formel für alle bautypischen Geometrien von Verglasungen plausible Ergebnisse in der Parameterstudie, welche nachfolgend zu einer guten Übereinstimmung für Messung und Simulation

fürten. Die Konvektion wird im Programm [DELPHIN] in der korrigierten Wärmeleitfähigkeit λ_{Nu} des Fluids im Scheibenzwischenraum mittels der Nusselt-Zahl berücksichtigt.

$$\lambda_{Nu} = Nu \cdot \lambda \tag{4}$$

Dabei wird mittels dieser analytischen Berechnung für jeden Berechnungsschritt die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Die Nusselt-Zahl ergibt sich wie folgt:

$$Nu = A \cdot (Gr \cdot Pr)^n \tag{5}$$

Nu= Nusselt-Zahl, A, n= Korrekturfaktor, Gr = Grashof-Zahl, Pr= Prandtl-Zahl

Tabelle 1: Korrekturfaktoren A und n

Lage	0°	45°	90°
A	0,16	0,10	0,035
n	0,28	0,31	0,38

$$Gr = \frac{g \cdot s^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2} \tag{6}$$

g= Erdbeschleunigung, s= Breite des Zwischenraumes, ΔT= Temperaturdifferenz zwischen den Glasflächen, ρ= Dichte des Gases, T_m= mittlere Temperatur, μ= dynamische Viskosität

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \tag{7}$$

λ=Wärmeleitfähigkeit des Gases, c= spezifische Wärme

F Energietransport infolge der Globalstrahlung

Das kurzwellige Sonnenlicht wird innerhalb der Glasscheibe absorbiert. Ein weiterer Anteil wird an der Glasscheibenoberfläche reflektiert. Der Großteil der Sonnenstrahlung wird durch die Glasscheibe transmittiert (durchgelassen) (siehe Abb. 8).

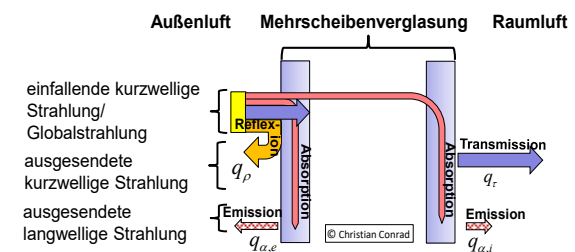


Abbildung 8: Energiebilanz der Strahlung [Conrad]

Die Absorption bewirkt unter anderem eine Erhöhung der Oberflächentemperatur und damit verbundene eine höhere langwellige Emission nach innen und außen. Die Absorption wird in dem Programm DELPHIN als Feldbedingung Energiequelle berücksichtigt. Diese Energiequelle wird extern, ggf.

unter Berücksichtigung der äußeren Verschattung durch Gebäude, Laubung usw., vorberechnet. Dazu wird der neigungsabhängige Absorptionsgrad mit dem Programm [Window] ermittelt (siehe Abb. 9). Für jeden Zeitschritt wurden der Einfallswinkel und der dazugehörige Absorptionsgrad in Abhängigkeit der Lage und Neigung bestimmt:

$$q_{\alpha,n} = \frac{j_{\text{diff},\perp} \cdot \alpha_n(0^\circ) + j_{\text{dir},\alpha} \cdot \alpha_n(\gamma)}{d_n} \quad (8)$$

$q_{\alpha,n}$ = Wärmequelle der Absorption der kurzwelligigen Strahlung in der n-ten Scheibe, $j_{\text{diff},\perp}$ = diffuse Normalstrahlung \perp zur Verglasung, $j_{\text{dir},\alpha}$ = Direktnormalstrahlung, $\alpha_n(\gamma)$ = Absorptionsgrad in Abhängigkeit des Einfallswinkels, γ = Einfallswinkel, d_n = Dicke der Glasscheibe

In der Praxis liegt in der Regel nur ein Absorptionsgrad senkrecht zur Scheibenebene aus dem Datenblatt des Herstellers vor. In diesem Fall kann der Absorptionsgrad der Scheibe bis zu einem Einfallswinkel von 80° verwendet und im Bereich zwischen 80° und 90° ($\alpha=0$) linear interpoliert werden.

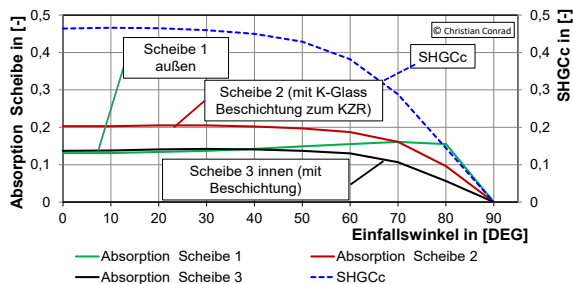


Abbildung 9: Kastenfenster mit WSV und K-Glass innen (V3), Absorption der kurzwelligigen Strahlung und Strahlungstransmission (SHGCc) in Abhängigkeit des Einfallswinkels [Conrad]

G langwelliger Strahlungsaustausch zwischen den Scheiben

Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen den Scheiben in den Zwischen- bzw. Hohlräumen wird als Wärmequelle und -senke an den jeweiligen Scheibenoberflächen im Programm [DELPHIN] unter Berücksichtigung der Scheibenoberflächentemperatur und des Emissionsvermögens berücksichtigt. Der Energietransport zwischen planparallelen Flächen enthält neben der Eigenemission einer Oberfläche auch die rückreflektierte Strahlung.

$$q_{r,k} = \sigma \cdot \frac{T_i^4 - T_e^4}{\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_e} - 1} \quad (9)$$

σ = Stefan-Boltzmann-Konstante, T = Temperatur der Oberfläche, ϵ = effektives Emissionsvermögen

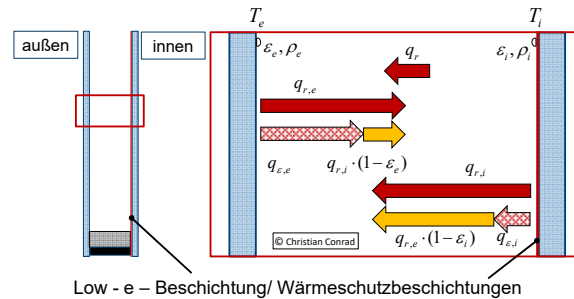


Abbildung 10: Wärmestrombilanz zwischen zwei planparallelen Flächen [Conrad]

VERGLEICH ZWISCHEN MESSUNG UND DER SIMULATION

In die Simulation gehen die messtechnisch ermittelten Eingangswerte der Oberflächentemperatur auf der Raumseite (Position 8) und die Außenlufttemperatur sowie als Feldbedingung die Absorption der Globalstrahlung senkrecht zur Fassadenebene für alle 4 Scheiben ein. Die gemittelten Absorptionsgrade wurden unter Berücksichtigung der Mehrfachreflexion des gesamten Glaspaketes für jede Scheibe mit dem Programm [Window] und anhand von Herstellerangaben ermittelt (vgl. Abb. 9). Die gemessene Scheibenoberflächentemperatur auf Position 4 wird mit der simulierten Scheibenoberflächentemperatur des aufgestellten Simulationsmodells verglichen. Beispielhaft wird die Messstrecke Kastenfenster, 1. DG Süd im Messzeitraum Juli 2017 betrachtet, da die Temperaturen in der sommerlichen Hitzeperiode wesentlich höher als auf der Nordseite sind. Es gibt eine gute Übereinstimmung von Messung und Simulation bei Temperaturen bis zu 25°C . Darüber hinaus gibt es kurzzeitige größere Abweichungen bei Temperaturen über 50°C .

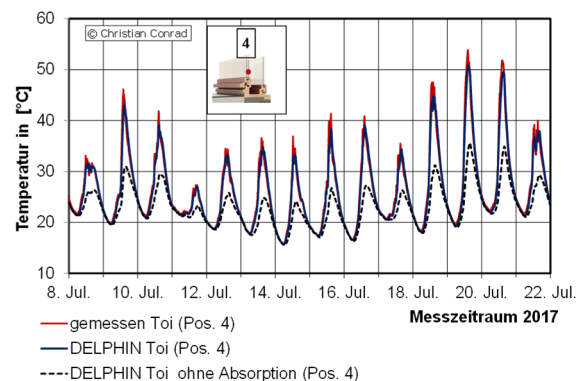


Abbildung 11: gemessene und simulierte Scheibenoberflächentemperaturen mit und ohne der kurzwelligen Absorption [Conrad]

Zur Veranschaulichung wurde eine Simulation ohne Berücksichtigung der kurzwelligen Absorption durchgeführt. Die Temperaturen an der Oberfläche der äußeren Wärmeschutzverglasung im Kastenzwischenraum (Position 4) sind wesentlich geringer

(siehe Abb. 11). Die Messungen am realen Gebäude und die Simulationen der Kastenfenster haben gezeigt, dass bei der Bauteil- und Gebäudesimulation die Berücksichtigung der Absorption der kurzwelligen Strahlung und die daraufhin veränderten freien Konvektionen und der langwellige Strahlungsaustausch in den geschlossenen Hohlräumen nicht vernachlässigt werden können.

ENERGETISCHE ERTÜCHTIGUNG VON BESTANDSFENSTERN

Als nächster Schritt wurden ausgehend von einem Bestandskastenfenster Beispiele von umgesetzten energetischen Fenstersanierungen durch den Austausch der Verglasungen sowie bei Einfachfenstern durch Einsatz einer neuen Fensterebene untersucht:

- Variante 0: Bestandskastenfenster
- Variante 1: Bestandskastenfenster mit innerer Scheibe mit K-Glass™-Beschichtung
- Variante 2: Bestandskastenfenster mit schmaler WSV mit K-Glass™-Beschichtung außen
- Variante 3: Kastenfenster mit schmaler WSV und K-Glass™-Beschichtung innen
- Variante 4: Doppelfenster mit neuer WSV vor Einfachfenster mit alter WSV

Tabelle 2: lichttechnische Kennwerte Variante 1-4

V	0	1	2	3	4
Absorptionsgrad je Scheibe (1 ... außen)					
α_1	0,067	0,069	0,190	0,144	0,166
α_2	0,048	0,142	0,081	0,187	0,121
α_3			0,012	0,128	0,038
α_4					0,047
Position der jeweiligen Emissionsgrade					
$\varepsilon = 0,03$			2	5	3, 7
$\varepsilon = 0,15$		3	4	3	
$\varepsilon = 0,84$	1-4	1,2,4	1, 3, 5, 6	1, 2, 4, 6	1, 2, 4-6, 8
Hohlraum in [mm] Ar...Argon, Kr...Krypton					
KSZ	125	125	80	125	100
SZR			6 Kr	16 Ar	16/ 12 Ar/ Kr

Für alle thermischen Simulationen wurden die Temperatur sowie die direkte und diffuse Strahlung

des Testreferenzjahres (TRY) 2010 DE 09 (Repräsentanzstation Chemnitz) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Für die Variante 3 wird beispielhaft für eine Südfassade die simulierte Temperaturverteilung in Abb. 12 gezeigt. Der Einfluss der Absorption der kurzwelligen Strahlung in den Scheiben und die damit einhergehende Temperaturverteilung beeinflusst die Konvektion und den langwelligen Strahlungsaustausch in der Wärmeschutzverglasung und dem Kastenzwischenraum im Tages- und Jahresverlauf maßgeblich.

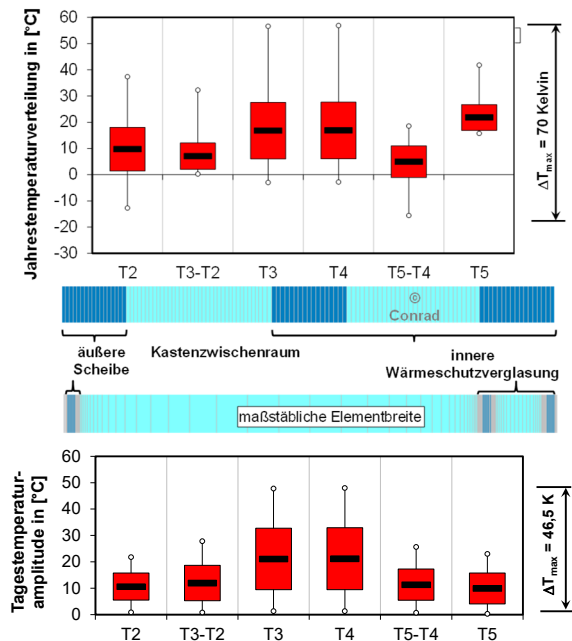


Abbildung 12: simulierte Jahrestemperaturverteilung und Tages Temperaturamplitude der V3 [Conrad]

Die Aufheizung im Kastenzwischenraum ist mit max. 58 °C wesentlich höher als bei dem Bestandskastenfenster. Die maximale Jahrestemperaturamplitude liegt mit ca. 70 Kelvin um 30 Kelvin höher als bei dem Bestandskastenfenster. Die für die Beurteilung der thermischen Spannungen maximale Tagesschwankung beträgt in der Scheibe 2 mit der K-Glass™-Beschichtung ca. 46,5 Kelvin (siehe Abb. 12 und Abb. 14).

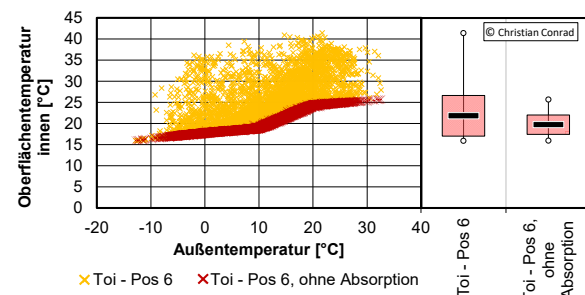


Abbildung 13: simulierte Innenoberflächentemperatur [Conrad]

Die maximale Oberflächentemperatur unter Berücksichtigung der Absorption der kurzwelligeren Strahlung liegt bei Außentemperaturen um die 20 °C bei über 40 °C. Auch innerhalb der Heizperiode, bei Außentemperaturen unter 12 °C, liegen je nach Einstrahlung die Werte ebenfalls über 35 °C. Die Oberflächentemperaturen unter Verwendung des statisch ermittelten U-Wertes nach [DIN EN 673] bzw. bei Simulation ohne den Ansatz der Absorption der kurzwelligeren Strahlung führen bei diesem Verglasungsaufbau zu einer sehr großen Abweichung der Oberflächentemperaturen (siehe Abb. 13.).

Die erreichten energetischen Verbesserungen zeigen, dass Bestandsfenster durch einen Austausch der Verglasung bzw. durch Anordnen einer neuen Fensterebene zu energetisch hocheffizienten Fenstern nachgerüstet werden können und ein Großteil der Originalsubstanz erhalten werden kann. Mit steigender Energieeffizienz der Verglasung steigen die Temperaturdifferenzen im Tages- und Jahresverlauf in den jeweiligen Verglasungsaufbauten an. Dies muss erkannt und konstruktive Maßnahmen umgesetzt werden, um Schäden infolge thermischer Spannungen zu vermeiden (siehe Abb. 14).

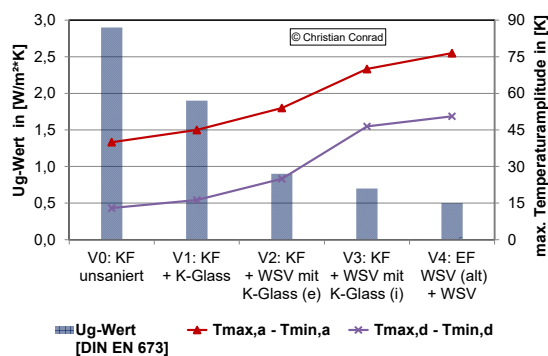


Abbildung 14: Beispiele für die energetische Ertüchtigung von Fenstern im Bestand

AUSBLICK

Der Algorithmus zur thermischen Simulation von transparenten Bauteilen wurde mit der hygrothermischen Simulation im Programm [DELPHIN] angewendet. Die Abb. 15 zeigt beispielhaft das Temperaturfeld mit dem Temperaturmaximum in der 2. Scheibe und das Feld der relativen Feuchtigkeit einer hygrothermischen Simulation des Laibungsanschlusses eines Kastenfensters (Variante 3). Zurzeit wird eine Arbeitshilfe für die sonst aufwendige Vorberechnung der Absorption in Scheiben erarbeitet. Dabei sollen z. B. die Verschattungs- und Absorptionseffekte innerhalb eines Kastenfensters berücksichtigt werden. In Zusammenhang mit der hygrothermischen Simulation mit einer zeitlich und räumlich detaillierteren Auflösung müssen ggf. Kriterien zur Schadens- und Risikobewertung der einzelnen Bestandteile des Fensters (Verglasung,

Randverbund, Rahmen, Beschichtungssystem usw.) und der Bauteilanschlüsse weiterentwickelt werden.

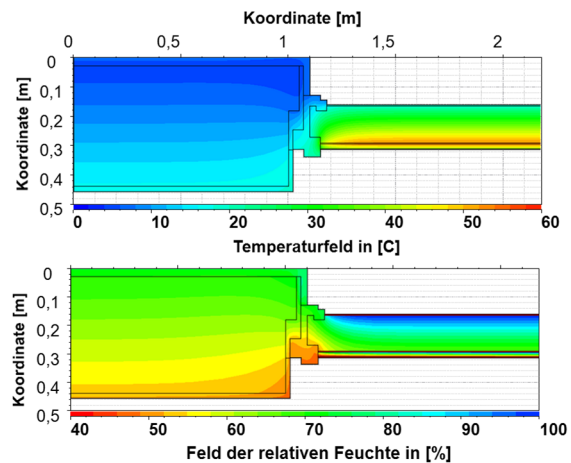


Abbildung 15: hygrothermische Simulation des Laibungsanschlusses des Kastenfensters (V3), Temperatur- und Feuchtfeld am 15. Feb. 12 Uhr

LITERATUR/ NORMEN/ PROGRAMME

- Conrad, C.: Implementierung und Validierung eines Algorithmus zur thermischen Simulation von transparenten Bauteilen für die energetische Ertüchtigung von Fenstern im Bestand; Dresden; 2019
- Marek, R., Nitsche, K.: Praxis der Wärmeübertragung; Deggendorf; 2012
- Häupl, P.: Bauphysik - Klima Wärme Feuchte Schall, Grundlagen, Anwendungen, Beispiele; Berlin; 2008
- Kuhne, M.: Modellierung des Energietransports durch Verglasungen; Weimar; 1997
- VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: VDI-Wärmeatlas; 11. Auflage; Düsseldorf; 2013
- DIN EN 410: Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; Berlin; 2011
- DIN EN 673: Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren; Berlin; 2011
- DIN EN ISO 10 211: Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen; Berlin; 2010
- ISO 15 099 - 2012 (Entwurf): Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices - Detailed Calculations; Geneva (Schweiz); 2012
- [DELPHIN] www.bauklimatik-dresden.de/delphin/
- [Window] <https://windows.lbl.gov/software/window>