

Deutsche Zusammenfassung des Berichts  
**“Characterization, evaluation and optimization of a switchable insulation system”**

**for:**

I[n]solation UG  
Waldecker Str. 5b  
33647 Bielefeld  
Tel. 0521-5467731

**prepared by:**

Dr. Thibault Pflug  
Dr. Bruno Bueno  
Dr. Tilmann Kuhn

1<sup>st</sup> July, 2016

**Address:**

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems  
Division TAG  
Group Solar Facades  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg  
Germany

Dieser Prüfbericht umfasst 5 Seiten. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder in sinnentstellendem Zusammenhang erfolgen. Der Prüfbericht darf ohne die schriftliche Zustimmung des Fraunhofer ISE nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

Der Bericht ist Eigentum der I[n]sulation UG, Bielefeld. Er darf nicht ohne die schriftliche Genehmigung des Auftraggebers weitergegeben werden.

Die Ergebnisse dieses Berichts beziehen sich auf die geprüften Muster. Das Fraunhofer ISE hatte keinen Einfluss auf die Probennahme.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik (TAG)  
Gruppe Solare Fassaden  
TestLab Solar Façades

Freiburg, 23. Dezember 2016

Dr Thibault Pflug  
Bearbeiter

Dr. Tilmann Kuhn  
Leiter der Gruppe Solare Fassaden

In diesem Projekt wurde eine schaltbare Dämmung untersucht. Die schaltbare Dämmung besteht aus mehreren Folien, die in einem Fensterelement oder einem Wandelement herunter- oder hochgerollt werden können. Werden die opaken Folien heruntergerollt, dient die Luft, die zwischen die Folien eingeschlossen ist, als zusätzlicher Wärmewiderstand. Auf diese Weise wird der U-Wert und der g-Wert des Fassadenelements geschaltet.

### **Messungen**

Vom Hersteller wurde ein Prototyp geliefert, bei dem die Folien fix im isolierenden Zustand eingestellt wurden. Der Prototyp mit den Außenmaßen 80 cm x 80 cm x 10 cm hat die Fraunhofer ISE Kennung NT366001. Beim Prototyp wurde der U-Wert mit einer Zweiplattenapparatur gemessen und die optischen und infraroten Eigenschaften einer Folie bestimmt. Bei den Messungen konnte gezeigt werden, dass mit dem Aufbau U-Werte von rund 0,4 W/m<sup>2</sup>K erreicht werden können. Die Ergebnisse sind detailliert im Bericht TAG3-TP-1601-E01 bzw. TAG3-UA-1510-E10 dargestellt.

### **Theoretische Analysen**

In einem ersten Schritt wurde eine einzelne Kavität zwischen zwei Folien analysiert und Vorschläge zur Optimierung erarbeitet. Die wesentlichen Ergebnisse waren zum einen, dass die Emissivität der verwendeten Folien ausreichend niedrig ist, so dass der Strahlungs-Wärmetransport sehr klein gegenüber dem konvektiven Wärmetransport ist. Zum anderen wurde eine bevorzugter Folienabstand von 1 cm ermittelt, der die Temperaturabhängigkeit der Konvektion und übliche Aspektverhältnisse für den Luftspalt berücksichtigt.

In einem zweiten Schritt wurde der „center-of-glazing Bereich“ des Elements untersucht. Das ist der ungestörte Bereich im Zentrum des Elements, bei dem Randeffekte durch Rahmen oder ähnliches vernachlässigt werden können. Der Zentralbereich besteht aus mehreren hintereinander angeordneten Kavitäten. Das verwendete Modell lehnt sich an die ISO 15099:2003 an. Der Einfluss der Anzahl der Kavitäten im isolierenden Zustand und die gesamte Dicke des Elements sowie die Eigenschaften im hochgezogenen Zustand wurde für verschiedene innere und äußere Abdeckungen untersucht. Ein Vergleich zwischen Modell und U-Wert Messungen zeigte, dass die gemessenen U-Werte höher lagen als die berechneten, was sich sehr wahrscheinlich durch den nicht luftdichten Abschluss am Rand des Elements zwischen Folien und Rahmen erklären lässt.

In einem dritten Schritt wurde die Auswirkung der neuen schaltbaren Dämmelemente auf den Energieverbrauch eines Modellraums ermittelt. Als Referenzraum zum Aufzeigen des Verbesserungspotentials wurde ein auf Passivhausniveau sehr gut gedämmter Raum verwendet, mit dem dann die neuen Varianten verglichen wurden. Für die Simulationsstudie wurden ein Fenstersystem und ein

Wandsystem mit jeweils 20 Kavitäten und 20 cm Gesamtdicke ausgewählt. Die Varianten lassen sich wie folgt beschreiben:

- Die “solar glass-black painting” Variante für das Wandelement (Solar-glas als äußere Abdeckung und schwarze, absorbierende Farbe auf der Außenseite der Innenwand hinter dem Folienstapel). Der U-Wert wurde von 0.14 auf  $2.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  geschaltet und der g-Wert von Null auf 0.49.
- Die “solar glass-solar glass” Variante für das Fensterelement (unbeschichtetes Solarglas als äußere und innere Abdeckung). Hier wurde der U-Wert zwischen 0.14 und  $2.70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  geschaltet. Der g-Wert wurde zwischen Null und 0.84 geregelt.

Ein Raummodell mit südorientierter Fassade wurde im Gebäude-Energiesimulationsprogramm EnergyPlus für das Klima von Stuttgart erstellt. Beim Modell wurde nicht der minimal theoretisch erreichbare U-Wert für luftdichte Folien angesetzt sondern ein realistischer Wert, der auch einen gewissen Luftaustausch am Rand des Elements und Rahmeneffekte einbezieht. Konkret wurde mit einem minimalen U-Wert von  $0.23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  simuliert und nicht mit dem theoretisch erreichbaren Wert von  $0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Der maximale U-Wert von zirka  $2.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  entspricht einer luftgefüllten, unbeschichteten Zweifachverglasung. Zwei verschiedenen Regelstrategien für die schaltbare Dämmung wurden untersucht. Bei der sogenannten „advanced control strategy“ wurde die Fassade so geregelt, dass die Energiebilanz im Hinblick auf passive solare Gewinne in der Heizperiode möglichst positiv ist und in der Kühlperiode möglichst negativ. Als Kriterium für die Heiz- oder Kühlperiode wurde der gleitende Mittelwert der Außentemperatur für die letzten 24h verwendet. Das Ergebnis der Gebäudesimulation zeigt, dass sich beim Fensterelement mit der „advanced control strategy“ die Summe des Heiz- und Kühlbedarfs um 29 % ( $6.2 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ ) senken lässt. Dabei konnte der Kühlbedarf um  $5.1 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$  (55 %) reduziert werden und der Heizbedarf um  $1.1 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$  (11 %). Dadurch, dass eine opake Fläche im (tageslichtrelevanten) obersten Fassadenteil durch das im hochgezogenen Zustand transparente Fensterelement ersetzt wurde, konnte in diesem Fall auch der Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung um  $12.7 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$  (52 %) gesenkt werden. Für das Wandelement konnte eine Reduzierung der Summe des Heiz- und Kühlbedarfs um 34% ( $7.2 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ ) erzielt werden. Verglichen mit der Referenz sank dabei der Kühlenergiebedarf um  $3.5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$  (38 %) und der Heizenergiebedarf um  $3.7 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$  (31 %). Das Potential der schaltbaren Isolierung ist noch höher, wird aber momentan durch Randeffekten am Element begrenzt.

Der Einfluss der thermischen Masse auf der Reduzierung des Heiz- und Kühlbedarfs ist sehr hoch: wenn das Referenzgebäude eine geringere thermische Masse hätte (5 cm Betonwände statt 15 cm), könnte nur eine Reduzierung um 17 % (statt 34 %) erzielt werden mit der “advanced control strategy”.

Das größte Potential ergab sich im Stuttgarter Klima für eine südorientierte Fassade, wo die hohen solaren Gewinne eine Kühllast im Sommer und erwünschte Gewinne im Winter verursachen. Weitere Kombinationen von Klima, Orientierung und Fassadenkonfiguration (z.B. mit anderen Elementdicken, etc..) könnten mit dem vorhandenen Simulationsmodell bewertet werden.

Neben einem Büroraum wurde auch ein Wohnraum simuliert. In diesem Fall wurde eine Reduzierung der Summe des Heiz- und Kühlbedarfs um 53% erzielt, verglichen mit der entsprechenden Referenz.

Überschüssige Energie, die im Winter für den südorientierten Raum nicht mehr nutzbringend ist (wenn z.B. die Raumtemperatur 24°C beträgt, anstelle der notwendigen 20°C), könnte in einem kompletten Gebäude für andere Orientierungen eingesetzt werden, zum Beispiel durch den Einsatz eines Lüftungssystems. Solche „überschüssigen“ solaren Gewinne lassen sich teilweise in der thermischen Masse des Gebäudes speichern. Im Umkehrschluss könnte die Bedeutung der thermischen Masse sinken, wenn überschüssige Gewinne über eine Lüftungsanlage im Gebäude verteilt werden.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass sich der Heiz- und Kühlenergiebedarf durch den Einsatz der schaltbaren Dämmung signifikant reduzieren lässt, im Fall des Wohnraums um mehr als 50%.