

Reto Bundi  
 Thomas Nussbaumer  
 Christoph Tanner  
 Hans Mühlebach

# Meßtechnische und rechnerische Untersuchungen an einer mit Vakuum-Isolations-Paneelen gedämmten Holztür

An der EMPA wurden Wärmedurchgangs- und Infrarotmessungen sowie rechnerische Analysen an einer mit Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) gedämmten Holztür durchgeführt. Nachfolgend werden die Resultate aus diesen Untersuchungen präsentiert und besprochen. Vergleiche der Untersuchungsergebnisse untereinander und mit 2D-Berechnungen nach Norm sollen Unterschiede in den Verfahren verdeutlichen und weitere Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen.

## Measurement and analytical investigations on wooden door insulated by Vacuum Insulation Panels.

*Thermal transmittance measurements, IR-investigations and finite element calculations on a wooden door containing Vacuum Insulation Panels (V.I.P.) were done at EMPA. The results of all these investigations are presented and discussed in this article. The comparison of the different methods and calculations according to the standards shows the differences of the approaches and possible ways for optimization.*

## 1 Einleitung

Der Wunsch nach immer besser gedämmten Gebäudehüllen führt einerseits zu immer besser dämmenden Bauelementen wie Isoliergläser und Wärmedämmstoffen, andererseits zu immer größeren Dämmdicken. Mit dieser Entwicklung konnten gewisse Bauelemente, wie z. B. Türen, nicht Schritt halten, da ihre Dicke aus praktischen bzw. konstruktiven Gründen ein gewisses Maß nicht überschreiten kann. Die Optimierung von Geometrie und Materialien konnte nicht solchen Dämmleistungszuwachs bringen, wie die massive Verdickung der Dämmschicht anderenorts.

Seit ca. zwei Jahren werden Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) im Bausektor angewendet. Mit ihrem extrem tiefen Wärmeleitwert, der um das bis zu 5fache besser ist als bei herkömmlichen Dämmmaterialien, bringen sie vollkommen neue Möglichkeiten der Wärmedämmung in diese Branche. Eingesetzt bei wärmetechnischen Problemelementen wie z. B. Türen, können energetische Schwachstellen in der Gebäudehülle eliminiert werden.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden teilweise im Rahmen des IEA ANNEX 39 (HiPTI) Projekts durchgeführt und vom Bundesamt für Energie (BfE), Schweiz unterstützt.

## 2 Vakuum-Isolations-Paneele VIP

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) bestehen aus einem Kernmaterial, das unter Vakuum steht und einer Umhül-

lung mit einer gasdichten Folie. Durch die Evakuierung wird der Wärmetransport durch die normalerweise im Material enthaltene Luft praktisch eliminiert. Diese macht in herkömmlichen Dämmstoffen bis zu 60 % der Wärmeleitung aus. Als Kernmaterial kommt prinzipiell jedes offenporige Material in Frage, welches wärmedämmende Eigenschaften besitzt. Für die Anwendung am Bau hat sich pyrogene Kieselsäure (fumed silica) durchgesetzt, da das extrem feine Pulver auch bei leichtem Innendruckanstieg immer noch sehr gute Wärmedämmeigenschaften hat. Die Verwendung von VIP an Gebäuden stellt höchste Anforderung an dieses Produkt. Die geforderte Lebensdauer von 50 oder mehr Jahren bedeutet, daß extrem gasdichte Hüllfolien verwendet und diese äußerst sauber verarbeitet werden müssen. Zur Anwendung kommen Lamine aus mehreren aluminiumbedampften Kunststofffolien (insg. ca. 100–300 nm Aluminium) und auch Lamine mit einer gewalzten Aluminiumfolie (6–8 µm Aluminium), Bild 1.

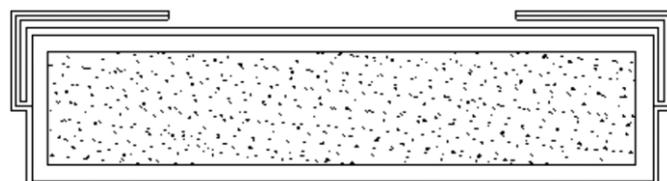
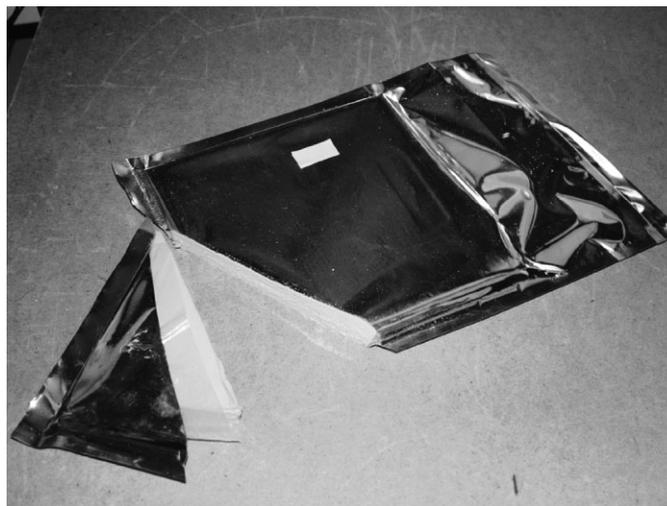


Bild 1. Darstellung eines Vakuum-Isolations-Paneels (VIP); oben: Photo einer aufgeschnittenen Probe; unten: Schematischer Schnitt durch ein VIP: Kieselsäure-Kern  
 Fig. 1. Vacuum Insulation Panel (V.I.P.); top: photograph of a cutted V.I.P.; bottom: schematical cross section

Zu beachten ist, daß jegliche mechanische Manipulation die Lebensdauer verringert, da sie Mikrodefekte in der Barrierefolie verursachen kann. Auch hohe relative Feuchten sowie Temperaturen über 60 °C beschleunigen die Gaspermeation durch die Folie. Temperaturen über 80 °C führen zum schnellen Versagen des VIP, da die verwendeten Kunststoffe diese Temperaturen nicht unbeschadet überstehen. Detaillierte Forschungsergebnisse zur Lebensdauer von VIP sind bereits veröffentlicht [1], [2].

Die Umhüllung eines hochdämmenden Kernes mit einem exzellenten Wärmeleiter wie Aluminium führt zwangsläufig zu einer Wärmebrücke, welche durch einen längenbezogenen Wärmebrückenzuschlag  $\psi$  beschrieben wird. Gleichung (1) beschreibt die Berechnung einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{equi}}$ , welche diese Randeffekte berücksichtigt. Dieser Wert kann für Wärmesimulationen eingesetzt werden, um auf diese Weise komplizierte Kern-Folien-Modelle zu umgehen. Man erkennt schnell, daß die Verwendung von großen Formaten wärmetechnisch zu empfehlen ist. Zwischen den wärmetechnischen Eigenschaften und der Langlebigkeit besteht der Zielkonflikt, daß mehr Aluminium in der Hüllfolie diese zwar deutlich dichter macht, jedoch auch wesentlich höhere Randeffekte verursacht. Detaillierte Zahlen für die Randeffekte sind in [3] zu finden.

$$\lambda_{\text{equi}} = \lambda_{\text{core}} + \Psi(d) \cdot d \cdot \frac{U}{A} \quad (1)$$

wobei

$$\lambda_{\text{equi}} = \text{Equivalente Wärmeleitfähigkeit} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$$

$$\lambda_{\text{core}} = \text{Wärmeleitfähigkeit des Kernes im Vakuum} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$$

$$\Psi = \text{Linearer Wärmebrückenzuschlag} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$$

$d$  = Dicke des VIP [m]

$U$  = Umfang des VIP [m]

$A$  = Fläche des VIP [m<sup>2</sup>]

Das Dämmen mit VIP verlangt ein Umdenken in der Planung und der Verarbeitung. Da sie weder zugeschnitten noch umgeformt werden können, müssen sie ähnlich wie Glas auf Maß bestellt und verarbeitet werden. Auch muß beim Einbau mit besonderer Sorgfalt gearbeitet werden, da schon kleinste Defekte an der Hüllfolie zum Versagen und somit zu einer Verfünffachung der Wärmeleitfähigkeit führen. Es ist folglich ratsam, die VIP bereits geschützt im Bauteil auf die Baustelle zu bringen, da so die Verletzungsgefahr minimiert werden kann. Auch muß bedacht werden, daß mit jedem VIP auch kleine Wärmebrücken eingebaut werden, die je nach Art ihrer unmittelbaren Umgebung verstärkt oder abgeschwächt werden. Wird ein VIP auf eine hochleitende Oberfläche wie zum Beispiel Aluminiumblech appliziert, so wird der Randeffekt  $\psi$  des VIP deutlich verstärkt, sind jedoch andere Wärmedämmstoffe in direktem Kontakt zur VIP-Folie, so verringert sich dieser.

### 3 Die VIP Tür

Objekt der vorliegenden Untersuchung ist eine Holztür, bei welcher das Türblatt mit VIP gedämmt ist. Das sehr

begrenzte Dämmvolumen in einem Türblatt verlangt einen hocheffektiven Dämmstoff wie das VIP. Auch die Vorfabrikation des Elementes in der Werkstatt und somit der geschützte Einbau macht die Tür zu einer vielversprechenden Anwendung für den Dämmstoff VIP. Problematisch sind gewünschte Durchbrüche wie Türspion und kleine Verglasungen, da so nicht mehr großflächige VIP eingesetzt werden können, sondern mehrere kleine Teile, was den Wärmedämmwert verschlechtert. Da die Tür den verschiedenen Witterungseinflüssen wie Temperaturschwankungen, schwankende Feuchten und Strahlung ausgesetzt ist, benötigt der Werkstoff Holz eine statische Verstärkung, damit sich das Türblatt nicht verzieht und die Tür somit zum Luftleck oder gar funktionsuntauglich wird.

Aus diesem Grund wird die Türblattabdeckung aus einem Laminat aus Holz und Aluminiumfeinblech gefertigt. Aluminium wird hauptsächlich aus fertigungstechnischen Gründen verwendet, da es mit denselben Werkzeugen wie Hartholz verarbeitet werden kann (Bild 2). Für die Dämmeigenschaften des Elements ist diese Aluminiumschicht jedoch problematisch. Sind diese hochleitenden Schichten an die Wärmebrücken wie Dorn, Zylinder oder Bänder angeschlossen, so wirken sie als Wärmekollektor oder -verteiler und verstärken so lokale Wärmebrücken deutlich.

Es ist bei allen möglichen Anwendungen von VIP darauf zu achten, daß nicht „nur“ die Dämmstoffe ausgetauscht werden, sondern das ganze System überarbeitet wird. Beim Einsatz eines derart hohen Wärmewiderstan-

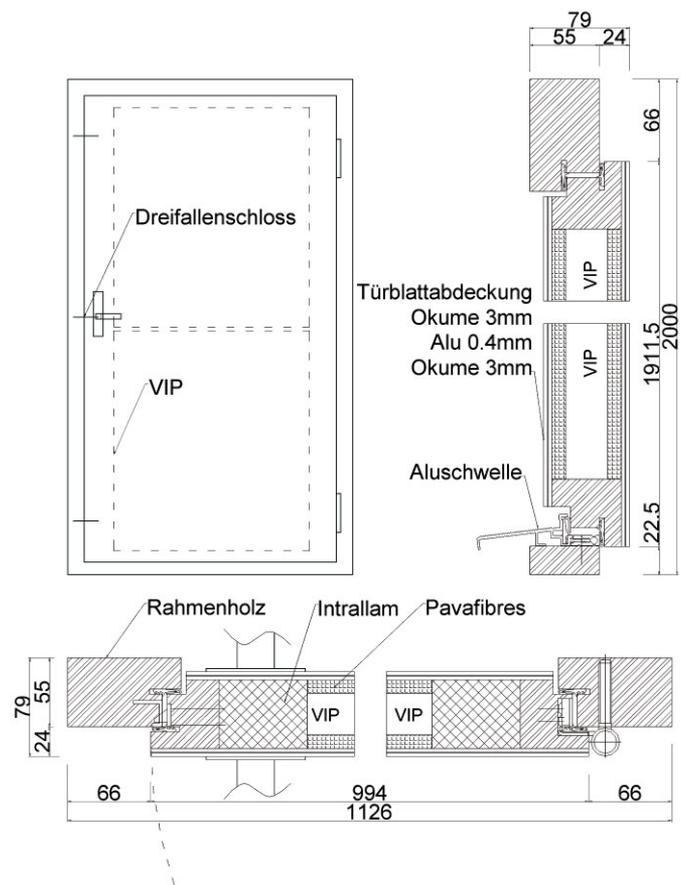


Bild 2. Ansicht, Quer- und Längsschnitt des untersuchten Türelementes  
 Fig. 2. Front view, transversal cross section and longitudinal cross section of the investigated door

des spielen Querleitungseffekte (Lateralleitung) eine bedeutend wichtigere Rolle als bei herkömmlichen Dämmstoffen. So können Komponenten, welche in Nachbarschaft zu herkömmlichen Dämmstoffen keine Wärmebrücke bilden, neben VIP schnell zum Wärmeleck werden. Bei der untersuchten Türe ist das Verhalten von Türrahmen sowie Beschlägen besonders aufmerksam untersucht worden, da diese vom Standard-Tür-Modell übernommen wurden.

#### 4 Meßaufbau

Alle Messungen wurden in einer „Guarded Hot-Box“ ausgeführt [4]. Sie besteht aus einer gekühlten Kammer, und einer doppelschichtigen Warmkammer. Die innere Warmkammer ist die Meßzone; Meßgröße ist die totale Heizleistung. Da die äußere Schutzkammer um die Meßzone auf derselben Temperatur gehalten wird, muß sämtliche Energie, welche die Meßzone verlässt, durch den Prüfling und den Prüfrahmen hindurch.

Der Prüfkörper ist eine komplette Tür mit Rahmen und Schwelle. Da die maximale Meßhöhe auf 2 m limitiert ist, wurde die Tür auf dieses Maß angefertigt, was etwas kleiner als üblich ist. Seitlich wurde mit dem gleichen PS-Schaum, der auch im Prüfrahmen verwendet wurde, die Lücke vom Prüfkörper zum Meßrahmen aufgefüllt (Bild 3).

Folgende Fragen sollten nicht nur mit Simulationen, sondern auch mit den Messungen beantwortet werden, um vergleichbare Daten zu erhalten:

- thermisches Gesamtverhalten der Türe (Wärmedurchgang),

- Wärmeverteilung an den Oberflächen (insbesondere VIP-Fuge und Beschläge),
- Einfluß der Metallbeschläge auf den totalen Wärmedurchgang,
- Einfluß defekter VIP.

Aus diesen Fragestellungen ergaben sich vier Meßanordnungen:

- Komplette Tür
- Tür ohne Metallbeschläge
- Tür mit Beschlägen, aber oberes VIP defekt (belüftet)
- Tür mit Beschlägen, aber beide VIP defekt (belüftet)

#### 5 Modellbildung und Simulation

Ziel war es zu untersuchen, ob mit Simulationen die Meßresultate nachzuvollziehen sind. Zweidimensionale Rechnungen gemäß EN ISO 10077-2 [8] sind für diesen Zweck nicht genügend, da weder Beschläge noch andere dreidimensionale Einflüsse berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde das gesamte Türelement dreidimensional modelliert und simuliert. Das Simulationsmodell beinhaltet die volle Geometrie wie auch die Beschläge. Da das Modell in ein kubisches Netz gelegt werden muß, wurden runde Elemente mit einem äquivalenten Querschnitt rechteckig angenähert (Bild 4).

Das Modell wurde in AutoCAD [5] generiert und mittels eines eigens entwickelten Importfilters in TRISCO [6] importiert. Angesichts der sehr hohen Knotenzahl (ca. 2 Mio. Knoten, siehe Bild 5) der Berechnung konnte die Genauigkeitsprüfung gemäß EN ISO 10211 nicht durchgeführt werden, da die so entstehende 8fach höhere Knoten-

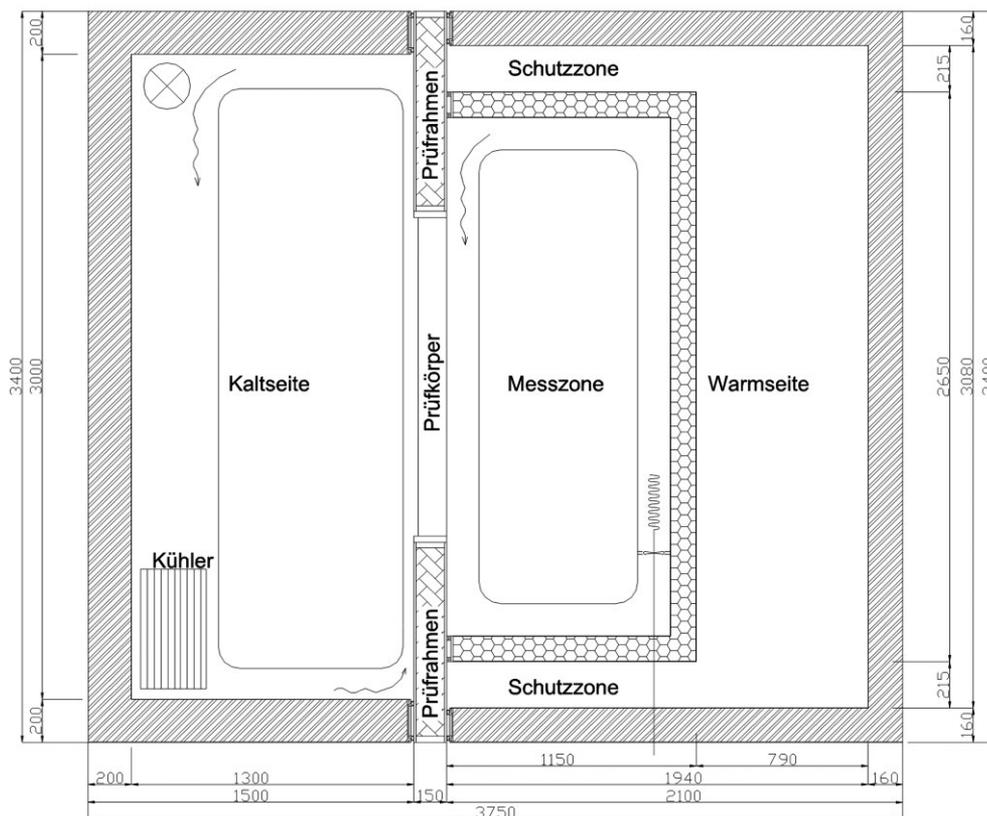


Bild 3. Vertikalschnitt durch Geregelten Heizkasten  
 Fig. 3. Vertical cross section of the „Guarded Hot Box“

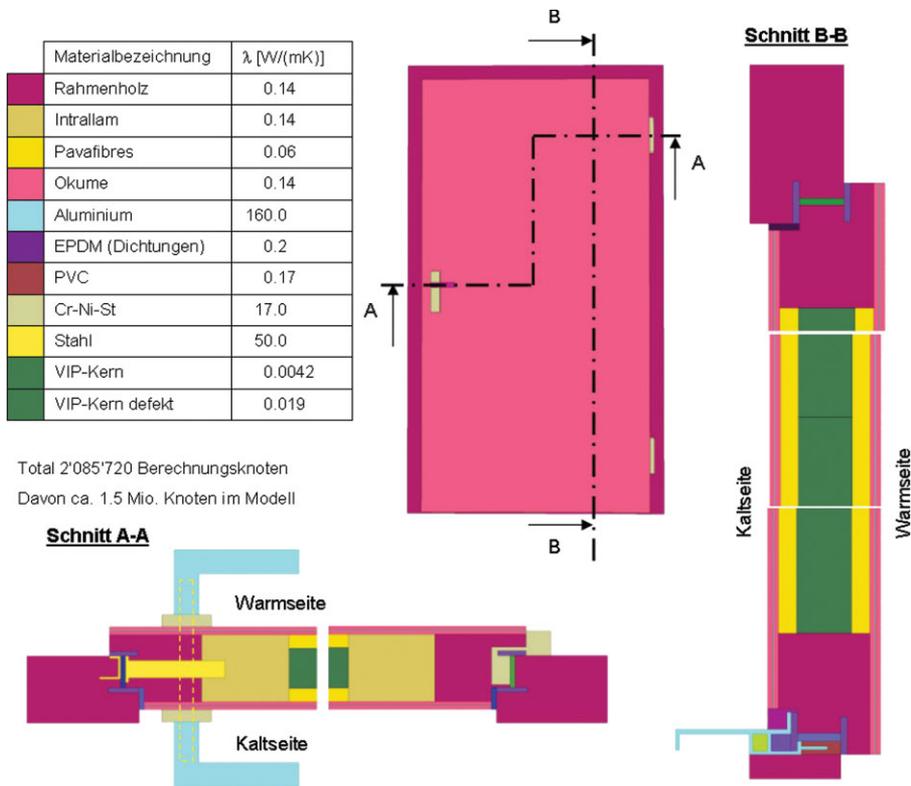


Bild 4. Ansicht, Quer- und Längsschnitt des Berechnungsmodells mit den Werten der Wärmeleitfähigkeit der Materialien

Fig. 4. Front view, transversal cross section and longitudinal and cross section of the analytical model and values of the thermal conductivity of the materials

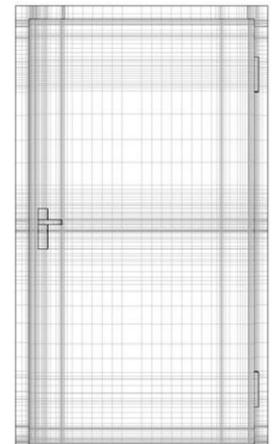


Bild 5. Berechnungsnetz  
Fig. 5. Grid for the numerical analysis

zahl die Möglichkeit der zur Verfügung stehenden Hardware übersteigt.

Da bereits ein VIP an sich schon ein sehr komplexes Simulationsgebilde ist, in welchem extrem dünne hochleitende Schichten berechnet werden müssen, konnte im vorliegenden Fall nicht ein Originalmodell verwendet werden. Eingesetzt wurde ein an der EMPA entwickeltes wärmetechnisch gleichwertiges Ersatzmodell, welches Wärmedurchgang und Wärmeflussverteilung betreffend sehr nahe am realen VIP ist. In diesem Modell werden wärmetechnisch ähnliche Hüllfoliensichten vereinigt und Folienumfaltungen im Randbereich sowie Luftein-schlüsse in den VIP-Fugen durch eine Verdickung der Aluschichten im Stoßbereich angenähert. Geeicht wurde dieses Modell mit zahlreichen Wärmedurchgangsmessungen an VIP (siehe hierzu [3]).

Die Randbedingungen der Simulation wurden denjenigen der Messung angepaßt, damit die Resultate möglichst vergleichbar sind. Die Wärmeleitfähigkeit der zahlreichen Lufthohlräume zwischen Rahmen und Flügel wurde gemäß [7] berechnet, wobei die Temperaturdifferenz und Mitteltemperatur bei jedem der fünf Iterations-schritte angepaßt wurden.

## 6 Thermografie

Um nicht nur punktuelle Vergleiche von Oberflächentemperaturen vorzunehmen, wurden nach jeder Messung Infrarotbilder vom Türelement erstellt. Die Temperatur der Hot-Box-Warmzone wurde so gewählt, daß sie gleich der

Lufttemperatur im klimatisierten Laborraum war. So konnten die warmseitige Meßeinrichtung (Bild 3, rechte Seite) vom Prüfkörper weg geschoben werden, und unter quasi-statischen Bedingungen Infrarotbilder erstellt werden.

In Bild 6 ist links die weggeschobene Warmseite der Hot-Box zu sehen. Im Vordergrund befindet sich die IR-Kamera, welche auf das Meßobjekt gerichtet ist. Hinter dem Prüfraum ist die Kaltseite der Hot-Box, welche auch während der Aufnahmen konstant weiter kühlt. Alle



Bild 6. IR-Meßeinrichtung  
Fig. 6. IR-measurement assembly

metallischen Oberflächen wurden mit einer matten schwarzen Farbe besprüht, damit keine IR-Spiegelungen das Bild stören.

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Wärmedurchgang

Wie zu erwarten war, ergibt Anordnung 2 den tiefsten Wärmedurchgang (Tabelle 1). Aus der Differenzbildung der Anordnungen 1 und 2 der Messung (Spalte 2) läßt sich der Einfluß der Metallbeschläge (einschl. Schwellenprofil) auf den Gesamtwärmedurchgang ermitteln. Dieser liegt bei 2,44 W, was ca. 6 % entspricht. Die Zunahme bei defekten VIP liegt bei 9 bzw. 14 %, was auf den ersten Blick erstaunlich wenig zu sein scheint, jedoch später erklärt wird.

Beim Vergleich von Rechnung und Messung sind Abweichungen von bis zu 9 % festzustellen, was angesichts der großen Unsicherheiten bei den Materialkennwerten sehr gut ist. Für die Leitfähigkeit der VIP wurde ein Durchschnittswert einer vorangegangenen Meßserie angenommen und für die Holzwerkstoffe der dichtebezogene Normwert. Auffallend ist die genauere Übereinstimmung in Anordnung 2. Teilt man den verschiedenen Anordnungen mögliche Fehler in der Simulation zu, so sind einige Schlüsse möglich:

In Anordnung 2 sind nur Fehler in den Materialkennwerten von Holz, Luft und Aluminium möglich (ausschließlich Beschläge) und der Geometrien derselben. Diese machen also 5,2 % aus.

In Anordnung 1 sind zuzüglich der Unsicherheiten von Anordnung 2 auch diejenigen der Beschlagsgeometrie und deren Leitfähigkeit enthalten. Aus der Differenz von 2 und 1 sind somit die Unsicherheiten, welche sich durch die Beschläge ergeben, genau zu beziffern:  $7,8 - 5,2 = 2,6$  % (1,18 W). Die Differenz, welche durch die Beschläge verursacht wird, ist hauptsächlich auf falsch angenommene Materialkontakte zurückzuführen. In der Simulation wird angenommen, daß sich benachbarte Materialelemente ideal, also vollflächig, berühren. Als Beispiel sei hier der Drückerdorn erwähnt, welcher in der Simulation die beiden Aluminiumbleche, welche in der Türblattabdeckung enthalten sind, ideal berührt. Dadurch wird seine Wärmebrückenwirkung verstärkt, da die beiden Flächen Wärme zu- bzw. abführen können. In der Realität ist jedoch das Türblatt rund um diese Durchdringung ausgespart (Bild 7). Subtrahiert



Bild 7. Ansicht des Schloßbereiches nach Demontage des Schloßschildes  
Fig. 7. Cylindrical hole left free for the pin in the door leaf cover after removing the doorplate

man diesen Einfluß von den Rechnungen der Situationen 1, 3 und 4, so nähern sich die Resultate deutlich einander an.

Ebenfalls fällt auf, daß, obwohl die beiden VIP-Elemente vom gleichen Format sind, die Messung 4 nicht die doppelte Differenz zu Messung 1 zeigt, wie Messung 3. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß die beiden VIP-Elemente bei der Messung nicht denselben Innendruck hatten. Dies kann schon bei der Fertigung der Elemente so gewesen sein, oder durch Mikrobeschädigungen während des Einbaus in das Türblatt verursacht worden sein. Auch wird durch das Alublech in der Fläche bei Anordnung 3 der Energiedurchgang erhöht, da Wärmeenergie aus der Fläche über dem intakten hin zum defekten VIP geleitet wird.

### 7.2 Oberflächentemperaturen

Beim Vergleich der Oberflächentemperaturen (Bilder in Tabelle 2) ist eine gute Übereinstimmung der Methoden zu erkennen. Zu beachten ist, daß die Farbskala im Hellblau- bis Rot-Bereich Verschiebungen hat. Auffällig ist, daß die IR-Aufnahmen für die beiden VIP im defekten Zustand unterschiedliche Oberflächentemperaturen auf dem Türblatt anzeigen. Dies bekräftigt die Vermutung, daß die beiden VIP nicht in gleichem Zustand eingebaut wurden. Eine weitere Erklärung für den vertikalen Temperaturgradienten ist die Anströmung in der Meßzone der Hot-Box (siehe Bild 3).

Tabelle 1. Resultate der Messung und der 3D-Simulationen gemäß [7]

Table 1. Results of the measurement and of the 3D-simulations according to [7]

Anordnung	Wärmedurchgang Messung [W]	Wärmedurchgang Simulation [W]	Differenz Rechnung - Messung [W]	U-Wert Messung [W/(m <sup>2</sup> K)]	U-Wert Simulation [W/(m <sup>2</sup> K)]
1	40,54	43,71	3,17 (7,8%)	0,91 ± 0,05	0,98
2	38,10	40,09	1,99 (5,2%)	0,85 ± 0,04	0,90
3	44,00	46,91	2,91 (6,6%)	0,99 ± 0,05	1,06
4	46,19	50,62	4,43 (9,6%)	1,03 ± 0,05	1,13

Tabelle 2. Oberflächentemperaturen ermittelt aus IR-Messung, 3D-Simulation und Messung in der „Hot-Box“  
 Table 2. Surface temperatures determined by IR-measurement, 3D-simulation and thermocouples in the „Hot-Box“

	Anordnung 1					Anordnung 2					Anordnung 3					Anordnung 4					
Infra-Rot																					
Pkt	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Me	18.0	15.6	21.4	21.1	20.9	17.1	-	21.4	21.1	20.9	18	15.9	20.8	20.7	20.8	18.0	16.2	20.8	20.5	20.4	[°C]
Sim	16.9	15.5	21.4	21.3	21.4	16.9	-	21.4	21.3	21.3	16.9	15.4	20.6	20.8	21.3	16.9	15.4	20.6	20.6	20.6	[°C]

Die in Tabelle 2 unten angegebenen Temperaturwerte wurden während der Messung mit Thermoelementen gemessen (Mittelwerte über die Meßperiode).

### 7.3 Vergleich der Messung mit EN ISO 10077-1

Die vorliegenden Simulationen und Messungen sind komplett dreidimensional durchgeführt worden. Dies unterscheidet sie klar von Rechnungen nach EN ISO 10077-1 [8], welche aus zweidimensionalen Schnitten die Dämmeigenschaft von Rahmen und Füllung sowie Linearverluste dazwischen bestimmt. Alle lokalen Effekte, wie diejeni-

gen der Beschläge und Ecksituationen, können nur in dreidimensionalen Rechnungen genau bestimmt werden. Allerdings sind solche 3D-Simulationen äußerst aufwendig.

Nachfolgend soll die Differenz der Verfahren aufgezeigt werden.

Da die Tür nicht dem Standard in [8], also einer Tür mit Rahmen, Flügel und Füllung, entspricht, werden Teilquerschnitte definiert und für diese Teil-U-Werte bestimmt.

In Bild 8 sind die Flächenaufteilung und die zugehörigen U-Werte sowie die Wärmeflußbilder zu sehen.

Tabelle 3. Vergleich der Resultate der Messung, 3D-Simulation und der 2D-Simulation  
 Table 3. Comparison of the measurement results with 3D-simulation and 2D-simulation

Anordnung	Wärmedurchgang Messung [W]	Wärmedurchgang 3D-Simulation [W]	Wärmedurchgang 2D-Simulation [W/(m²K)]	U-Wert Messung [W/(m²K)]	U-Wert 3D-Sim. [W/(m²K)]	U-Wert 2D-Sim.
1	40,54	43,71	37,64	0,91 ± 0,05	0,98	0,84

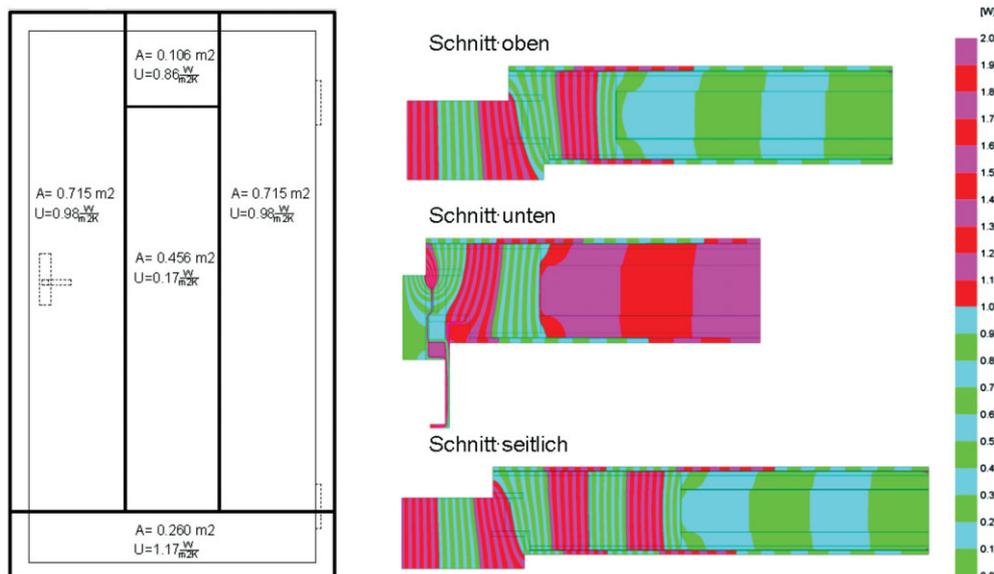


Bild 8. Ergebnisse der 2D-Simulationen  
Fig. 8. Results of the 2D-simulations

Deutlich ist zu erkennen, daß das Aluminium in den Türblättern die Wärmeenergie an den Rand des Flügels, also um das VIP herum, leitet. Die effektive Wirkfläche des VIP wird so drastisch verkleinert.

## 8 Schlußfolgerungen

Die vorliegende Untersuchung zeigt, daß eine dreidimensionale Wärmesimulation eines Bauteils oft einen zu hohen Wärmedurchgang liefert, da Objektkontakte meist nicht so ideal sind wie im Modell. Im Falle der Holztür resultiert eine Überschätzung des realen Wärmedurchgangs um ca. 8 %. Die zweidimensionale Rechnung vernachlässigt punktförmige Wärmebrücken, was zu einer Unterschätzung des U-Wertes führt. Dies bedeutet für das untersuchte Bauteil ein um ca. 6 % unterschätzter Wärmedurchgang. Der Vergleich der Oberflächentemperaturen zeigt eine gute Übereinstimmung.

Die relativ geringen Zunahmen bei defekten VIP sind einerseits darauf zurückzuführen, daß ein „frisch“ belüftetes VIP einen immer noch sehr hohen Wärmewiderstand hat, was sich mit der Zeit aufgrund von zunehmender Befuchtung deutlich verschlechtert. Andererseits ist die effektive Wirkfläche des VIP schon zu Beginn stark eingeschränkt, da Umleitungseffekte aus der Fläche, hin zum Rahmen den Wärmedurchgang deutlich erhöhen.

Verbesserungsansätze liegen folglich bei der Rahmenkonstruktion, die in der vorliegenden Ausführungsweise einen  $U_T$ -Wert von ca.  $1.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  hat, sowie bei der Türblattabdeckung, welche durch das in ihr enthaltene Aluminium ebenfalls eine deutliche Einbuße im Wärmewiderstand verursacht. Die Verbesserung der lokalen Schwachstellen wie Schwelle und Beschläge haben ein Verbesserungspotential von ca. 6–8 %.

## Danksagung

Die Autoren danken der Firma Brunegg AG für die Zurverfügungstellung des Prüfobjektes und die Freigabe des Prüfberichtes.

## Literatur

- [1] Simmler, S., Brunner: Vacuum insulation panels for building application – Basic properties, aging mechanisms and service life. Energy & Buildings (submitted in Aug 2004).
- [2] Willems, W. M.: Vakuumdämmung. In: Cziesielski, E. (Hrsg.) Bauphysik-Kalender 2004. S. 83–124. Berlin: Ernst & Sohn 2004.
- [3] Ghazi Wakili, K.: Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels. Building Research & Information 32 (2004), 4, pp. 293–299.
- [4] EN ISO 8990:1996-09 Wärmeschutz – Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand – Verfahren mit dem kalibrierten und dem geregelten Heizkasten; Deutsche Fassung EnISO 8990:1996. Berlin: Beuth-Verlag 1996.
- [5] AutoCad 2000i, Autodesk, Zwei- und Dreidimensionale CAD-Software.
- [6] TRISCO (2001), Manual of version 9.0 w, Physibel 2001, Maldegem, Belgium.
- [7] Nussbaumer, Th.: Thermal analysis of a wooden door system with integrated vacuum insulation panels. Energy and Buildings (submitted in Okt. 2004).
- [8] EN ISO 10077 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten; Teil 1: Vereinfachtes Verfahren (ISO 10077-1:2000), Juli 2000 Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen (ISO 10077-2:2003), Oktober 2003.

## Autoren dieses Beitrages:

Reto Bundi, Eidg. Dipl. Bau-Fassadenbauing. FH, EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf

Thomas Nussbaumer, Dipl. Physiker ETH, EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf

Christoph Tanner, Architekt FH, EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf

Hans Mühlebach, Architekt FH, EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf