

Messverfahren zur Qualitätskontrolle bei Vakuumisolationspaneelen

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern)

Dietrich Büttner, Cornelia Stark, Daniel Kraus, Marco H. Keller

Die herausragende Eigenschaft von Vakuumisolationen ist deren hervorragende thermische Dämmwirkung. Ziel der Qualitätskontrolle von Vakuumisolation ist daher sicherzustellen, dass die exzellente Dämmwirkung für den gewünschten Verwendungszeitraum von mehreren Jahrzehnten (für den Baubereich) erhalten bleibt. Für die Qualitätskontrolle an Vakuumpaneelen sowohl in Prüfeinrichtungen als auch in der Fertigung, auf der Baustelle und für spätere Kontrollen im eingebauten Zustand stehen unterschiedliche Messmethoden zur Verfügung, deren Genauigkeit stark variiert. Die Messwerte der verschiedenen Methoden können daher nur unter Angabe der Messunsicherheiten miteinander verglichen werden. Der Messvorgang und die Auswertung erfordern zum Teil große Erfahrung, da je nach Hüllmaterial oder Einbausituation Abweichungen vom Idealfall auftreten können.

1 Einleitung

Die herausragende Eigenschaft von Vakuumisolationen ist deren hervorragende thermische Dämmwirkung. Ziel der Qualitätskontrolle von Vakuumisolation ist daher sicherzustellen, dass diese für den gewünschten Verwendungszeitraum von mehreren Jahrzehnten für den Baubereich erhalten bleibt [Schwab; e]. Vakuumisolationspaneele bestehen aus Kernmaterial und Hülle. Kritisch sind die Eigenschaften hinsichtlich der Gasdurchlässigkeit des Hüllmaterials und bezüglich des Feuchtegehalts sowie der Gasdruckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Kernes. Der Erhalt des Dämmwertes hängt hauptsächlich von der Güte und Aufrechterhaltung des Vakuums im Vakuumisolationspaneel (VIP) ab. Alternative Methoden zur Qualitätskontrolle messen deshalb meist den Gasdruck im VIP oder eine mit dem Gasdruck korrelierte Größe. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Hüllmaterials im Vergleich zum Kernmaterial treten Randeffekte auf, die bei den Messungen und die in der Anwendung beachtet werden müssen [Schwab; d].

2 Druckmessverfahren

Die hervorragenden Dämmeigenschaften von Vakuumdämmung werden nur erreicht, solange das Vakuum für das verwendete Füllmaterial ausreichend niedrig ist. Die Druckmessung ist daher eine nahe liegende Methode der Qualitätskontrolle. Eine Messung des Druckanstiegs im VIP kann als Grundlage für eine Funktionsdauervorhersage verwendet werden.

Der Druckanstieg kann unterschiedliche Ursachen haben [Schwab; c]. So ist der Druck in einem VIP, dessen Füllmaterial Feuchtigkeit aufgenommen hat, erheblich mit der Temperatur des VIP korreliert [Schwab; b]. Des Weiteren unterscheidet sich das Eindringverhalten von Wasserdampf von dem der „trockenen“ Luftgase erheblich [Schwab; a]. Die treibende Kraft für das Eindringen von Wasserdampf ist die Dampfdruckdifferenz zwischen außen und innen. Der Dampfdruck im Außenraum ist zwar erheblich geringer als der Luftdruck außerhalb des VIP, aber die Durchlässigkeit der Folienhüllen gegenüber Wasserdampf ist in der Regel erheblich größer als für N_2 oder O_2 . Hat das Paneel bereits bei der Ferti-

gung einen hohen Feuchtigkeitsgehalt, kann es in trockener Umgebung sogar eine Druckminderung durch entweichenden Wasserdampf erfahren. Das stark unterschiedliche Verhalten von Feuchtigkeit und „trockener“ Luft machen es in vielen Fällen wünschenswert bei der Druckmessung an VIP deren Anteile separieren zu können. Für eine weitergehende Interpretation von Druckmesswerten ist es notwendig, bei allen Messungen auch die Paneeltemperatur anzugeben.

2.1 Folienabhebeverfahren

Beim Folienabhebeverfahren handelt es sich um ein eigens für VIPs mit flexibler Hülle entwickeltes Verfahren zur Druckbestimmung, das ohne integrierte Sensoren oder Eingriffe in das Paneel auskommt. Hierbei wird das VIP (oder beim Saugglocken-Verfahren ein Teil seiner Oberfläche) in eine Kammer platziert. Zur Messung wird der Druck in dieser Kammer durch Evakuieren soweit abgesenkt, bis der im VIP vorhandene Gasdruck ausreicht, um die Folienhülle gegen den Druck der Kammer aufzublähen. Das ist dann der Fall, wenn der Gasdruck im VIP geringfügig größer ist als der Umgebungsdruck. Der Kammerdruck wird gemessen und das Abheben der Folie kann durch einen Laserabstandssensor oder eine Lichtschranke erfasst werden.

Signifikante systematische Abweichungen ergeben sich sowohl aus gerätespezifischen als auch aus probenspezifischen Effekten. Es kann dabei typischerweise eine Druckauflösung von $(0,1 \pm 0,5)$ hPa erreicht werden.

2.2 Integrierte Gasdrucksensoren

Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Gasdrucks in VIP ist die Integration eines Gasdrucksensors in das VIP. Dieser Lösungsansatz bietet die Möglichkeit einer schnellen und zuverlässigen Gasdruckmessung, bereitet jedoch die Schwierigkeit, dass der Sensor mit Energie versorgt und das Messsignal nach außen übertragen werden muss. Kabeldurchführungen durch die Hülle bedeuten eine potentielle Leckstelle meist auch einen höheren Fertigungsaufwand. Als Alternative zu einer Kabelverbindung ist auch eine akustische, elektrische, thermische oder mechanische Anbindung des Sensors denkbar. Die Auflösung entspricht, je nach Ausführung der Sensoren, denen üblicher Druckmessgeräte.

3 Methoden zur Untersuchung des Wärmewiderstandes

Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit im Labor stehen im Wesentlichen zwei Verfahren zur Verfügung: Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem Plattengerät [DIN 52612] und Wärmedurchgangsmessungen mit dem geregelten Heizkasten, auch Hotbox genannt [DIN EN ISO 8990]. Außer der stationären Messung der Wärmeleitfähigkeit, die normalerweise mehrere Stunden für jede Messung in Anspruch nimmt, wurden zahlreiche nicht-stationäre Methoden speziell für VIP entwickelt. Diese sollen vor allem die einfache, schnelle und kostengünstige Messung sowohl in der Produktion als auch beim verbauten Panel ermöglichen.

3.1 Thermographie

Bei der Thermographie werden Infrarotaufnahmen des untersuchten Gegenstandes angefertigt. Die im

infraroten Spektralbereich emittierte Wärmestrahlung hängt dabei stark von der Oberflächentemperatur und dem Emissionsgrad ab. Die Thermographie wird häufig angewendet, um thermische Schwachstellen an Gebäuden oder Anlagen zu erfassen. Bei genügend hoher Auflösung kann sie eingesetzt werden, um die Funktionsfähigkeit von in Fassaden integrierten VIP zu überprüfen. Eine Aussage über den Zustand eines in der Fassade integrierten VIP ist in der Regel nur im Vergleich zu anderen VIP möglich, die in der gleichen Fassade unter gleichen Bedingungen verbaut wurden. Einzelne Totalausfälle in einer VIP-gedämmten Fassade können somit detektiert werden. Eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit der gesamten Fassade, z.B. durch allgemeine Alterung des Dämmmaterials kann nicht aufgelöst werden.

Wichtig für einen sinnvollen Einsatz der Thermographie ist eine ausreichende thermische Ankopplung der Wärmedämmung an die thermographisch erfasste Oberfläche. Schichten mit hoher thermischer Querleitung wie sie durch metallische Abdeckungen oder vorgehängte Fassaden auftreten, erschweren die Auswertung der thermographischen Aufnahmen.

3.2 Hot Box

Beim Heizkasten-Verfahren (Hot Box-Verfahren) wird der Wärmedurchgangskoeffizient U eines Probekörpers bestimmt. Der Probekörper wird zwischen zwei Räumen mit unterschiedlichen Temperaturen eingebaut. Im stationären Fall fließt ein konstanter Wärmestrom von der warmen Seite durch den Probekörper auf die kalte Seite. Die Größe des Wärmestroms ist ein Maß für den Wärmedurchgangskoeffizienten bei vorgegebenen Kammertemperaturen.

3.3 Ein- und Zweiplattengeräte

Mit Ein- und Zweiplattenmessgeräten wird die Wärmeleitfähigkeit aus dem experimentell bestimmten eindimensionalen Wärmestrom, der Probendicke und der in der Probe vorliegenden Temperaturdifferenz berechnet [Heinemann]. Eine zentrale Metallplatte wird kontrolliert beheizt. Sie ist beim Zweiplattengerät zu beiden Seiten von zwei identischen Probekörpern bekannter Dicke umgeben. Die äußeren Seiten der Proben sind an thermisch kontrollierte Wärmesenken angekoppelt. Die Heizleistung wird derart nachgeregelt, dass sich konstante Temperaturen einstellen. Die in der Heizplatte eingebrachte elektrische Energie fließt als Wärme symmetrisch durch die beiden Proben ab. Um einen eindimensionalen Wärmefluss zu gewährleisten, ist die zentrale Heizplatte von konzentrischen Schutzringen umgeben, die auf derselben Temperatur gehalten werden wie die zentrale Platte. Beim Einplattengerät ist statt dem zweiten Probekörper eine Kombination aus Dämmstoff und einer Schutzplatte angebracht. Die Schutzplatte wird so geregelt, dass keine Temperaturdifferenz zwischen der Heizplatte und der Schutzplatte besteht.

Die Messungen mit den Plattengeräten sind absolute Messungen, die keiner Kalibrierung bedürfen.

3.4 Einbringung von Fremdkörpern

Gasdruck und Wärmeleitfähigkeit in VIPs sind miteinander korreliert. Die Gaswärmeleitfähigkeit von porösen Materialien, wie sie auch bei Füllungen von VIP verwendet werden, ist im Wesentlichen durch die Porengröße, Gasart und den Gasdruck bestimmt [Kaganer]. Es gilt:

$$\lambda_{Gas} = \frac{\lambda_{Gas,0}}{1 + \frac{2 \cdot \beta \cdot l_{gas}}{l_{Pore}}} = \frac{\lambda_{Gas,0}}{1 + \frac{p_{1/2}}{p}}, \quad (3-1)$$

mit:

- λ_{Gas} Gasanteil an der Gesamtwärmeleitfähigkeit,
- $\lambda_{Gas,0}$ Wärmeleitfähigkeit des freien Gases,
- β Wand und gasartabhängiger Parameter,
- l_{gas} Mittlere freie Weglänge des Gases,
- l_{Pore} Porendurchmesser,
- $p_{1/2}$ von der Porengröße abhängiger, charakteristischer Halbwertsdruck und
- p Gasdruck im VIP.

Im voll funktionsfähigen VIP gilt $l_{gas} \gg l_{Pore}$, der Anteil der Gaswärmeleitfähigkeit an der Gesamtwärmeleitfähigkeit des VIP ist vernachlässigbar. Die Bestimmung des Gasdruckanstiegs aus dem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Füllmaterials ist daher mit hohem messtechnischem Aufwand und langen Wartezeiten zwischen den Messungen verbunden. Damit der Gasdruck im VIP aus einer einfachen Wärmeleitfähigkeitsmessung bestimmt werden kann, muss die Wärmeleitfähigkeit an einem Material gemessen werden, das im relevanten Druckbereich eine möglichst große Änderung der Wärmeleitfähigkeit bei Änderung des Gasdrucks zeigt. Nach Gl. (3-1) ist das der Fall, wenn gilt: $l_{Pore} = 2 \cdot \beta \cdot l_{gas}$ oder $p_{1/2} = p$.

Das Prinzip bei beiden im folgenden vorgestellten Messverfahren ist, einen im Vergleich zum Füllmaterial grobporigeren Fremdkörper in das Paneel einzubauen, der eine deutlich stärkere Änderung der Wärmeleitfähigkeit bei Druckänderungen im gewünschten Messbereich zeigt als das eigentliche Füllmaterial. Die Wärmeleitfähigkeit des Fremdkörpers und damit der Paneelinnendruck werden durch Aufsetzen eines beheizten Sensors auf das VIP bestimmt.

1. Wärmefluss in ein VIP mit eingebautem Fremdkörper

In das Paneel wird ein dickes Stück des Fremdkörpers, z.B. ein offenporiger XPS-Schaum, direkt unterhalb der Umhüllungsfolie eingebaut. Ein beheizter Sensor wird zur Messung an dieser Stelle von außen auf die Folie aufgesetzt. Der am Sensor gemessene Wärmefluss in das VIP ist im Wesentlichen von der Effusivität bestimmt, die ein Maß für das Eindringen von Wärme in den Fremdkörper ist; d. h. das Messsignal ist proportional $\sqrt{\lambda_{Fremdkörper}}$.

2. Wärmefluss auf eine im VIP integrierte Metallplatte

Bei diesem Verfahren wird bei der Fertigung eine kleine Metallplatte in das VIP eingelegt, die von der Außenhülle durch einen dünnen Stoff (z.B. ein Vlies) getrennt ist [Caps]. Das Vlies ist der im Vergleich zum Füllmaterial grobporigere Fremdkörper, dessen Wärmeleitfähigkeit bei Druckvariation eine größere Änderung aufweist als das Füllmaterial. Im Gegensatz zur zuvor beschriebenen Messung der Effusivität an einem Fremdkörper ist das Messsignal bei diesem Verfahren direkt proportional zur Wärmeleitfähigkeit des Fremdkörpers (und nicht nur zur Quadratwurzel der Wärmeleitfähigkeit). Durch das Einbringen der Metallplatte wird für eine gewisse Zeit ein stationärer Messvorgang erreicht.

Die Bestimmung des Gasdrucks erfolgt über eine zuvor ermittelte, vliesspezifische Kalibrierung. Das

Messsignal ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Sensor und Metallscheibe zu Beginn der Messung. Deshalb muss die Temperatur der Metallscheibe vor der Messung, z.B. durch Messung der Umgebungstemperatur, bestimmt werden. Alternativ kann aus der Steigung bei logarithmischer Auftragung des Messsignals die Wärmeleitfähigkeit des Vlieses bestimmt werden.

Die Auflösung des Verfahrens ist vor allem durch die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Vlieses vom Gasdruck bestimmt. Die größte Änderung der Wärmeleitfähigkeit im gewünschten Druckbereich und damit die beste Auflösung für die Messung ergibt sich für $p_{1/2} \approx p$. Durch geeignete Wahl des Vlieses kann somit der Messbereich gewählt werden, in dem das Verfahren besonders sensibel ist.

Da der Wärmefluss vom Sensor nicht ausschließlich auf die im VIP befindliche Metallplatte, sondern auch lateral über die das VIP umhüllende Folie erfolgt, muss bei der Verwendung unterschiedlicher Hüllfolien für jede Folie eine separate Kalibrierung erfolgen.

Neben der bereits erwähnten Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des VIP vom Feuchtigkeitsgehalt des Füllmaterials wirkt sich der Feuchtigkeitsgehalt auch auf die Wärmeleitfähigkeit des Vlieses aus. Außer den „trockenen Gasen“ Stickstoff und Sauerstoff ist es vor allem Wasserdampf, der in das VIP eindringt. Wenn Feuchtigkeit im VIP vorhanden ist, kann dies sowohl eine höhere als auch eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit des Vlieses nach sich ziehen. Wasserdampf hat bei Normaldruck eine um ca. 30 % geringere Wärmeleitfähigkeit als Luft was zu einem geringeren Wärmefluss führen müsste. An den Fasern und in der Hüllfolie angelagertes Wasser, das durch die Erwärmung mit dem Sensor verdampft, verursacht hingegen einen höheren Wärmefluss und führt damit zu einer Überschätzung des Gasdrucks. Lagert sich das Wasser hingegen an den Berührungspunkten der Fasern oder Pulverteile an, so führt dies zu einer Erhöhung des Wärmetransports über das Festkörpergerüst.

Das Verfahren wird bei der Fertigungskontrolle von VIP angewandt [Caps] und ermöglicht eine schnelle und einfache Gasdruckmessung an trockenen Paneelen. Die Mehrkosten bei der Fertigung für die Integration der Sensorscheibe sind gering. Die Auflösung des Verfahrens hängt vom verwendeten Aufbau und vom gewünschten Messbereich ab.

3.5 Effusivitäts-Messung

1. Bei konstanter Wärmezufuhr (Hot Disk-Verfahren)

Setzt man die Oberfläche eines idealerweise unendlich dicken Körpers einer konstanten Wärmezufuhr aus, gilt für die Temperatur an der Oberfläche [Fricke]:

$$T(t) = 2 \cdot \Phi \cdot \sqrt{\frac{t}{\lambda \cdot \rho \cdot c_p \cdot \pi}} = \frac{2 \cdot \Phi}{E} \sqrt{\frac{t}{\pi}} \quad (3-2)$$

mit:

$T(t)$ Temperatur an der Oberfläche für $t > 0$,
 Φ Wärmestrom,
 t Zeit und
 E Effusivität.

Bei diesem Verfahren wird der Sensor, eine flache, beheizbare Scheibe, zur Messung zwischen zwei Proben gelegt. Der Temperaturanstieg wird bei konstanter Heizleistung ausgewertet. Idealerweise steigt

die Temperatur wie in Gl. (3-2) proportional mit \sqrt{t} an, und ist proportional zu $1/E$. In Bezug auf VIP wurde das Verfahren als Testverfahren in der Qualitätskontrolle in Erwägung gezogen [Defer].

Aus technischer Sicht ist die Realisierung dieses Verfahrens vergleichsweise einfach, da keine Temperaturregelung benötigt wird, sondern lediglich ein Temperatursensor und eine Konstantleistungsquelle. Dem stehen bei genauer Betrachtung des Verfahrens jedoch auch einige Nachteile gegenüber.

Wird ein VIP lokal erwärmt, treten abhängig vom Hüllmaterial laterale Wärmeströme auf, die den Wärmestrom in das Kernmaterial um ein vielfaches übersteigen können und somit die Auswertung erheblich erschweren. Ebenfalls ist aus Gl. (3-2) nicht ersichtlich, dass dieses Verfahren sehr sensibel auf die Ankopplung des Messkopfes an die Oberfläche reagiert. Da die Sensortemperatur während der Messung kontinuierlich steigt, besteht immer eine Differenz zwischen der Sensortemperatur und der Oberflächentemperatur. Dieser Effekt des Kopplungswiderstandes wird umso störender, je größer der in die Oberfläche eindringende Wärmefluss ist.

Gl. (3-2) bezieht sich auf die Erwärmung eines homogenen Körpers. VIP sind aber selbst im eindimensionalen Fall ein Schichtsystem aus Hülle und Füllkern. Während man mit der Messung die Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Füllkerns detektieren möchte, ist die Temperaturänderung an der Oberfläche bei konstanter Wärmezufuhr jedoch vor allem von den Eigenschaften der oberflächennahen Schichten bestimmt. Insbesondere bei Hüllflächen mit hoher Wärmekapazität oder großer Querleitung führen geringe Variationen zu größeren Änderungen im Temperaturanstieg als eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit des VIP-Kerns.

Eine Variation der Effusivität eines VIP und damit der Wärmeleitfähigkeit kann mittels des Verfahrens konstanter Wärmezufuhr zwar anhand des Temperaturanstiegs prinzipiell detektiert werden, doch kann die Eignung des Messverfahrens nur anhand des jeweiligen VIP Systems beurteilt werden. Um mit diesem Verfahren reproduzierbare Messungen durchführen zu können, muss der Sensor außerdem nach jeder Messung eine gewisse Zeit abkühlen. Dies kann zu einer erheblichen Wartezeit zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen führen, es sei denn, die Wärmekapazität des Sensors ist so gering, dass die Messung nicht erheblich beeinflusst wird.

2. Bei konstanter Temperaturdifferenz

Die Effusivität E , auch als Wärmeeindringkoeffizient bezeichnet, ist definiert als

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}, \quad (3-3)$$

mit:

- λ Wärmeleitfähigkeit,
- ρ Dichte,
- c_p spezifische Wärmekapazität.

Die Definition wird abgeleitet aus der Lösung der zeitabhängigen eindimensionalen Differentialgleichung für Wärmetransport im Festkörper. E beschreibt hierbei den Wärmestrom in einen halbbunendlichen Körper, dessen Oberflächentemperatur sich zum Zeitpunkt $t=0$ sprunghaft von T_0 auf T_1 ändert. Für die Wärmestromdichte q an der Oberfläche gilt dann:

$$q = (T_1 - T_0) \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}{\pi \cdot t}} = (T_1 - T_0) \cdot E \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot t}} \quad (3-4)$$

Die Wärmeleitfähigkeit ergibt sich damit aus Gl. (3-4) zu:

$$\lambda = \frac{\pi \cdot t}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{\Phi(t)}{A \cdot \Delta T} \right)^2, \quad (3-5)$$

mit:

- $\Phi(t)$ Wärmestrom vom Sensor in das VIP,
- A Messfläche des Sensors und
- ΔT Temperatursprung, $\Delta T = T_1 - T_0$.

Damit eine Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus einer Messung der Effusivität möglich ist, müssen Dichte und Wärmekapazität sowie die Starttemperatur der Probe und die Temperatur des Sensors hinreichend genau bekannt sein.

Am ZAE Bayern wird ein mobiler thermischer Sensor entwickelt, der in der Lage ist, die Wärmeleitfähigkeit von VIP mit dicker Edelstahlhülle und durch eine einseitige thermische Messung zu bestimmen. Die Messapparatur soll es vor allem ermöglichen, eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit von einer zur nächsten Messung nachzuweisen, und ist im aktuellen Entwicklungsstadium nicht darauf ausgerichtet, Absolutwerte der Wärmeleitfähigkeit zu messen.

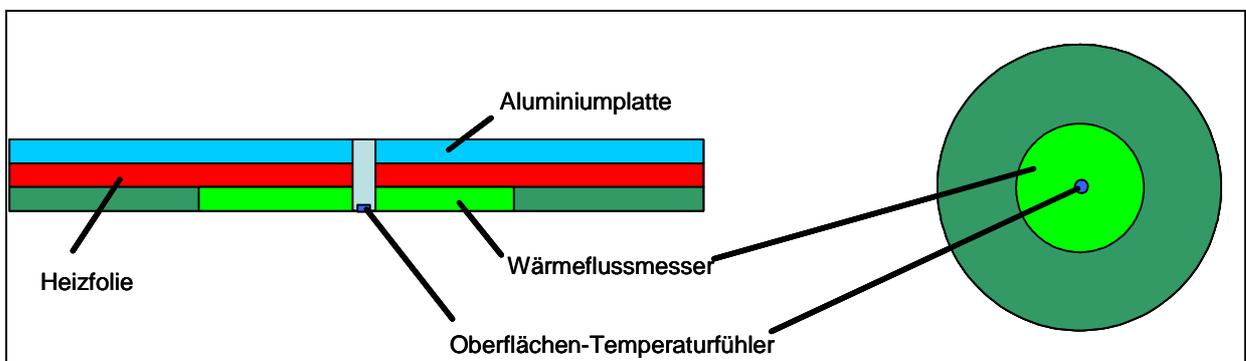


Bild 3.1: Schnitte eines beheizten Messkopfes zur Messung der Effusivität

Die VIP, an denen die Messung durchgeführt werden sollen, haben eine Edelstahlhülle, die je nach Anwendung bis zu 4 mm dick ist. Diese beeinflusst in hohem Maße das Eindringen von Wärme in die Oberfläche. Dies geschieht zum einen durch seitliche Wärmeflüsse, zum anderen durch die Wärmekapazität der Stahlhülle. Vor dem Aufbau der Apparatur wurden mit der FDM Software HEAT 2 zahlreiche Simulationsrechnungen durchgeführt, um die prinzipielle Machbarkeit zu überprüfen und unterschiedliche Betriebsmodi zu testen.

Nimmt man zunächst vereinfachend an, dass alle Parameter außer der VIP-Wärmeleitfähigkeit genau bekannt sind, lässt sich prinzipiell jede Änderung der Wärmeleitfähigkeit durch eine Effusivitätsmessung nachweisen. Bei den Simulationen muss deshalb berücksichtigt werden, dass die für die Effusivitätsmessung relevanten Parameter Temperatur, Dichte und Wärmekapazität - insbesondere der

Hülle - mit Unsicherheiten behaftet sind. Nach Gl. (3-5) wirken sich Unsicherheiten in der Temperaturdifferenz zwischen Sensor und VIP besonders kritisch aus, da die Temperaturdifferenz quadratisch bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eingeht. Zur Messung wird auf das Paneel ein beheizter Sensorkopf gelegt, der mit einem Wärmeflussmesser versehen ist. Der Sensorkopf ist deutlich größer als der Wärmeflussmesser. Der überstehende Rand wirkt wie ein Schutzring, der die Ausbildung lateraler Wärmeströme weitgehend verhindert.

Mit Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, dass Unsicherheiten beim Kopplungswiderstand zwischen dem Sensor und der VIP Oberfläche, der Temperatur oder in der Dicke des Edelstahlbleches den Wärmefluss in die Oberfläche sehr stark beeinflussen. Wegen der hohen Wärmekapazität der Hülle führen außerdem bereits geringe Variationen der Starttemperaturdifferenz zu erheblichen Variationen beim zeitlichen Verlauf des Wärmeflusses in die Hülle des VIP. Wird hingegen die Temperatur der VIP-Hülle konstant gehalten, so wird nur noch die Wärmemenge in die Oberfläche fließen, die von der Hülle in das Kernmaterial geleitet wird. Die gemessene Heizleistung wird entsprechend Gl. (3-5) lediglich von der Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials abhängen.

Die Ansteuerung erfolgt so, dass die Edelstahl-Hülle zunächst mit dem Sensor möglichst schnell aufgeheizt wird. Gleichzeitig wird mit Hilfe eines Kontaktfühlers in der Mitte des Sensors die Oberflächentemperatur der Hülle erfasst. Überschreitet die Oberflächentemperatur einen bestimmten Grenzwert, wird die Heizung des Sensors abgeschaltet und der Sensor kühlt sich solange ab, bis er die gleiche Temperatur wie die Oberfläche der VIP-Hülle annimmt. Ab diesem Zeitpunkt wird der Sensor auf dieser Temperatur konstant geregelt. Da die Temperatur der Hülle sich nicht mehr ändert, entspricht der gemessene Wärmefluss in die Oberfläche dem Wärmefluss, der in den Kern des VIP eindringt. Hierbei ist die Stahlhülle wegen ihrer hohen Leitfähigkeit und Wärmekapazität als annähernd stationär anzusehen.

Durch diese Art der Steuerung wird die Hülle quasi Teil des Sensors, der auf dem Kernmaterial aufliegt. Voraussetzung für eine erfolgreiche Messung ist, dass sich die Hülle im Bereich des Sensors homogen aufheizen lässt. Das wird durch den großen Unterschied der Wärmeleitfähigkeiten von Hülle und Kern von ca. vier Größenordnungen entscheidend begünstigt.

4 Fazit

Für die Qualitätskontrolle an Vakuumpaneelen sowohl in Prüfeinrichtungen als auch in der Fertigung, auf der Baustelle und für spätere Kontrollen im eingebauten Zustand stehen unterschiedliche Messmethoden zur Verfügung, deren Genauigkeit stark variiert. Die Messwerte der verschiedenen Methoden können daher nur mit der Angabe von Messunsicherheiten miteinander verglichen werden. Der Messvorgang und die Auswertung erfordern zum Teil große Erfahrung, da je nach Hüllmaterial oder Einbausituation Abweichungen vom Idealfall auftreten können.

Diese Projekt wird gefördert durch Mittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (FKZ: 0327321E).

Literatur

- [Defer] Defer, Antczak, Duthoit, *Measurement of low-thermal effusivity of building materials using thermal impedance method*, Measurement and Science Technology 12 (2001) 549–556, IOP Publishing Ltd, UK 2001
- [Heinemann] U. Heinemann, *Evacuatable Guarded Hot Plate for Thermal Conductivity Measurements between -200°C and 800°C*, Advances in Thermal Insulation – Proceedings of the Eurotherm Seminar No 44, Portugal, October 1995
- [Fricke] J. Fricke, W.L. Borst, *Energie*, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1984
- [Caps] R. Caps, *Vorrichtung und Verfahren zur Messung des Gasdruckes in evakuierten Dämmplatten*, Deutsches Patent DE 10215213 C1, September 2003
- [Kaganer] M. G. Kaganer *Thermal Insulation in Cryogenic Engineering, Program for Scientific Translation*, Jerusalem, 1969
- [Schwab; a] Schwab H. et al, *Permeation of Different Gases Through Foils used as Envelopes for Vacuum Insulation Panels*, Journal of Thermal Envelope and Building Science 2005 28: 293-317
- [Schwab; b] Schwab H. et al, *Dependence of Thermal Conductivity on Water Content in Vacuum Insulation Panels with Fumed silica Kernels*, Journal of Thermal Envelope and Building Science 2005 28: 319-326
- [Schwab; c] Schwab H. et al, *Predictions for the Increase in Pressure and Water Content of Vacuum Insulation Panels (VIPs) Integrated into Building Constructions using Model Calculations*, Journal of Thermal Envelope and Building Science 2005 28: 327-344
- [Schwab; d] Schwab H. et al, *Thermal Bridges in Vacuum-insulated Building Facades*, Journal of Thermal Envelope and Building Science 2005 28: 345-355
- [Schwab; e] Schwab H. et al, *Prediction of Service Life for Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernel and Foil Cover*, Journal of Thermal Envelope and Building Science 2005 28: 357-374

Dr. Dietrich Büttner, Dr. Cornelia Stark, Daniel Kraus, Marco H. Keller

ZAE Bayern e.V., Am Hubland, 97074 Würzburg

Tel: 0931-70564-0, Fax: 0931-70564-60

www.zae-bayern.de

buettner.dietrich@zae.uni-wuerzburg.de