

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 44 823 55 11
F +41 44 821 62 44
www.empa.ch



Materials Science & Technology

Vaku-Isotherm GmbH

Mittweidaer Straße 16
D-09661 Rossau

Prüfbericht Nr. 440'411/1A

Prüfauftrag: **Bestimmen des Alterungsverhaltens und der Wärmeleitfähigkeit im Klima 25°C/80% r.F. und 23°C/50% r.F.**

Auftraggeber: Vaku-Isotherm GmbH, D-09661 Rossau

Prüfobjekt: VIP-Isotherm Vakuumisulationspaneele
Barrieretyp DL105. Probekörper:
18 Stück 500 x 500 x 20 mm, 12 Stück 250 x 250 x 20 mm

Kundenreferenz: Herr R. Baars

Ihr Auftrag vom: 27. Oktober 2005

Eingang des Prüfobjektes: 11. November 2005

Ausführung der Prüfung: bis Juli 2006

Anzahl Seiten: 11

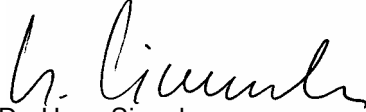
Beilagen: -

Inhalt


1. Auftrag
 2. Prüfmaterial
 3. Qualitätsüberwachung
 4. Probenahme / Probekörper
 5. Prüfverfahren
 6. Resultate
 7. Langzeitwerte der Wärmeleitfähigkeit
- Anhang

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Dübendorf, 2. März 2007

Prüfleiter / Prüfleiterin:


Dr. Hans Simmler

Abteilung Bautechnologien
Der Abteilungsleiter:


i.V. Thomas Frank

Anmerkung: Die Untersuchungsergebnisse haben nur Gültigkeit für das geprüfte Objekt. Das Verwenden des Berichtes zu Werbezwecken, der blosse Hinweis darauf sowie auszugsweises Veröffentlichen bedürfen der Genehmigung der Empa (vgl. Merkblatt). Bericht und Unterlagen werden 10 Jahre archiviert.

1 Auftrag

Die Firma Vaku-Isotherm GmbH, D-09661 Rossau, erteilte der EMPA Abt. Bautechnologien am 3. März 2006 den Auftrag, eine Erstprüfung zur Bestimmung von Langzeitwerten der Wärmeleitfähigkeit für das Vakuumisulationspaneel „Vaku-Isotherm“ in Anlehnung an Vornorm SIA 279 (2004) und Europäische Normen für Wärmedämmstoffe für Gebäude durchzuführen.

Da für die neuartige Produktgruppe Vakuumisulationspaneel (VIP) keine Norm zur Bestimmung von Langzeitwerten der Wärmeleitfähigkeit vorhanden ist, wurden im Rahmen des Projekts IEA Annex 39 mit Unterstützung des Bundesamts für Energie (BFE) in den Jahren 2002 bis 2005 umfangreiche Untersuchungen zum Alterungsverhalten bei unterschiedlichen Temperatur- und Feuchtebedingungen durchgeführt. Die Resultate erlauben eine Prognose der Wärmeleitfähigkeit nach einer Zeitdauer von 25 Jahren bei den Standardbedingungen 23°C, 50% r.F. Diese Bedingungen sind gemäss SIA 279 und Europäischen Produktnormen für Wärmedämmstoffe für die Angabe von Nennwerten massgeblich.

Der vorliegende Bericht ist eine aktualisierung Fassung des Empa-Berichts Nr. 440'411/1 mit zusätzlicher Bestimmung von format- und dickenabhängigen Langzeitwerten der Wärmeleitfähigkeit.

2 Prüfmaterial

Das VIP „Vaku-Isotherm“ besteht aus einem gepressten Kern aus pyrogener oder gefällter Kieselsäure (SiO_2) mit geringen Mengen an Zuschlagstoffen (Polyesterfasern, Trübungsmittel), der bei einem Umgebungsdruck unter 1 mbar in eine hochgasdichte Hülle eingeschweisst wird. Die Rohdichte liegt bei 130 bis 170 kg/m^3 für pyrogene oder ca. 220 kg/m^3 für gefällte Kieselsäure. Die Abmessungen sind in gewissen Bereichen wählbar. Standardformate sind 100 x 60, 100 x 50, 50 x 60, 50 x 50, 120 x 60, 120 x 50 cm^3 . Herstellerin des Paneels ist die Firma Vaku-Isotherm GmbH in Rossau (Deutschland). Die thermisch verschweisste Hülle besteht aus dem 4-Schicht-Laminat DL105 (3 metallisierte Kunststofffolien und PE-Schweisssschicht), das von der Firma Wipak GmbH in Walsrode (Deutschland) hergestellt wird. Die Gesamtdicke der Aluminiumschichten beträgt ca. 3 x 30 nm.

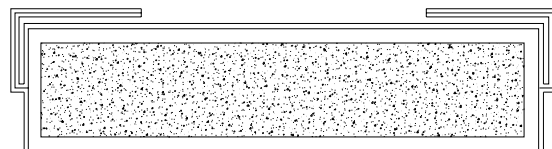


Fig. 1: Oben: Schematischer Schnitt durch das VIP Vaku-Isotherm mit umgelegten Rändern.
Links: Foto eines aufgeschnittenen Paneels.

3 Qualitätsüberwachung

Kernmaterialien und Barrierefolien werden bei den entsprechenden Herstellern überwacht. Zur Eigenüberwachung der VIP-Produktion ist im Werk ein Messverfahren zur Prüfung des Innendrucks vorhanden. Jedes 5. Paneel wird während und nach der Produktion geprüft. Eine Fremdüberwachung der VIP-Produktion besteht nicht (alle Angaben gemäss Auftraggeber).

4 Probenahme / Probekörper

Der gesamte der EMPA 2005-2006 zur Verfügung gestellte Probenumfang ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Abmessung l x b x d, mm	Anzahl
250 x 250 x 20	12
500 x 500 x 20	18

Die angelieferten Proben wurden bis zur Durchführung von Messungen in einem Klimaraum bei ca. 23°C, 35% r.F. gelagert.

5 Prüfverfahren

5.1 Wärmedurchlasswiderstand / Wärmeleitfähigkeit

Messverfahren:	2-Plattenverfahren (Guarded Hot Plate) SN EN 12667 / SIA 279, EMPA SOP Nr. 176.103/176.001 (Beschreibung in Anhang 1) Messung des Wärmedurchlasswiderstandes R_{total} einschliesslich Ausgleichsschichten R_S (min. 5 Einzelwerte) im stationären Zustand, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = d/(R_{total} - R_S)$ aus den Mittelwerten
Messzone:	Seitenlänge $\ell = 0.25$ m, $A = \ell \times \ell = 0.0625$ m ²
Mitteltemperatur:	10.0 ± 0.3 °C
Plattentemperaturen:	kaltseitig ca. 5°C, warmseitig ca. 15°C
Zusatzschichten:	4 Ausgleichsschichten mit je $R_S = 0.07$ m ² K/W auf allen Probenoberflächen
Messgenauigkeit:	rund ± 2%

5.2 Wärmebrückenzuschlag für den Paneelrand

Durch die umlaufende Hülle mit metallischen Schichten entsteht bei einer Temperaturdifferenz ΔT über dem Paneel ein zusätzlicher Wärmestrom im Randbereich der Länge ℓ . In zweidimensionaler Näherung kann ein dickenabhängiger Verlustkoeffizient Ψ_d im Prinzip messtechnisch oder rechnerisch bestimmt werden aus

$$\Psi_d = \frac{\dot{Q}_{\text{Stoss}} - \dot{Q}_{1\text{-dim}}}{\Delta T \ell} = \left(\frac{1}{R_{\text{Stoss}}} - \frac{1}{R_{1\text{-dim}}} \right) \frac{A}{\ell}, \text{ in W/(m K)} \quad (\text{Gl. 1})$$

Eine korrekte Berechnung ist wegen der sehr dünnen, hochleitfähigen Metallschichten und unbekannter geometrischer Details im Stossbereich heikel. Die Messung erfolgt im 2-Plattengerät. An Stelle je einer Platte werden je zwei halbformatige Platten mit den Abmessungen 50 cm x 25 cm (Folienränder umgelegt und fixiert) leicht gegeneinander gestossen und mit Papierklebeband in dieser Lage zu einer quadratischen Probe verbunden. Der vertikale Luftspalt im Stoss ist weniger als 1 mm breit.

Der Stoss dieser Proben liegt im Zentrum der Messfläche. Numerisch wurde festgestellt, dass sich der Randeinfluss auf einen Abstand von weniger als 5 cm vom Stoss beschränkt. Somit wird der Randeinfluss des Stosses in der Messung korrekt erfasst. Unter Annahme einer Symmetrieebene in Stossmitte ist der Verlustkoeffizient $\Psi_{d,\text{Rand}} = \Psi_{d,\text{Stoss}} / 2$, anzuwenden auf die Randlänge (den Umfang) jeder Platte. Für grossflächige Verlegung ohne geometrische Wärmebrücken kann damit eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit für die VIP-Schicht wie folgt verwendet werden:

$$\lambda_{\text{äquivalent}} = \lambda_{\text{Kern}} + \Psi_{d,\text{Rand}} \cdot \text{Dicke} \cdot \text{Umfang} / \text{Fläche} \quad (\text{Gl. 2})$$

5.3 Alterung

Im Projekt „Hochleistungswärmedämmung für den Baubereich“ im Rahmen von IEA/ECBCS Annex 39 wird das Alterungsverhalten, genauer die irreversible Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des VIP-Kerns über einen langen Zeitraum, detailliert untersucht. Nach heutigem Stand des Wissens sind dafür hauptsächlich zwei Effekte verantwortlich:

1) Permeation der primären atmosphärischen Gaskomponenten Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) führt zu einer kontinuierlichen Innendruckerhöhung und damit zu einem Anstieg des Wärmetransports durch Stösse zwischen Gasmolekülen in den Poren. Im Bereich bis etwa 100 mbar beträgt der Anstieg $a_p \cong 0.035 \text{ mW}/(\text{m K mbar})$ für pyrogene Kieselsäure. Für gefällte Kieselsäure wurde Empa-intern $a_p \cong 0.099 \text{ mW}/(\text{m K mbar})$ bestimmt. Die Permeationsraten hängen von Materialeigenschaften der Hüllfolie, der erhöhten Defektdichte im beanspruchten Randbereich und den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) ab.

Es gibt kein Standardverfahren zur Messung des Innendrucks. Die EMPA hat ein Verfahren entwickelt, bei dem der Umgebungsdruck einer Probe in einer Unterdruckkammer kontinuierlich abgesenkt wird, bis das Ablösen der Hülle bei Unterschreitung des Innendrucks durch eine Laserdistanzmesseinheit detektiert werden kann (siehe Kurzbeschreibung des Messverfahrens in Anhang 2).

2) Durch Eindringen von Wasserdampf steigt der Feuchtegehalt eines sorptionsfähigen Kernmaterials. Der feuchtebedingte Anstieg a_u der Wärmeleitfähigkeit des SiO_2 -Kerns bei kleinem Innendruck ist mehrfach untersucht worden. a_u ist im Bereich bis etwa 80% r.F. in guter Näherung linear und es gilt $a_u \cong 0.5 \text{ mW}/(\text{m K Masse-\%})$.

Die Feuchtegehaltsänderung wird durch periodisches Wägen bestimmt. Die Permeationsgeschwindigkeit hängt neben den Materialeigenschaften stark von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebung ab. Da der Wasserdampfdruck in der Umgebung normalerweise zwischen 10 und 20 mbar liegt, kann bei relativ undichter Hülle über längere Zeit ein Wasserdampfdruckausgleich bzw. der entsprechende Ausgleichsfeuchtegehalt u_{eq} auftreten. Dieser kann bei stationären Bedingungen 23°C, 50% r.F. vereinfacht abgeschätzt werden durch $u = s \cdot \varphi$, wobei für die mittlere Steigung s der Sorptionsisotherme $u(\varphi)$ etwa 8 Masse-% pro 100 % r.F. einzusetzen ist. Damit wird $u_{eq} \approx 4$ Masse-%. Der Zeitverlauf der Feuchteaufnahme bei diesen Bedingungen ist

$$u(t) = u_{eq} (1 - \exp(-t/\tau))$$

mit $\tau = u_{eq} / u_a$ Zeitkonstante in Jahren (Gl. 3)
 u_a Anfangswert Feuchteaufnahme, in Masse-% pro Jahr

Unter stationären Bedingungen beträgt der wasserdampfbedingte Innendruckanstieg näherungsweise $\dot{p}_{H_2O} = p_s(T) \dot{u} / s$. Dieser Anteil kann von der gemessenen Innendruckanstiegsrate subtrahiert werden, da der gesamte wasserdampfbedingte Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit in der Grösse a_u enthalten ist. Die Wärmeleitfähigkeit des Kerns in Funktion der Zeit kann somit näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$\lambda(t) \cong \lambda_0 + a_p \cdot p_a \cdot t + a_u \cdot u_{eq} (1 - \exp(-t/\tau)) \quad (\text{Gl. 4})$$

Dabei ist λ_0 der Anfangswert der Wärmeleitfähigkeit nach der Produktion bzw. bei Auslieferung.

6 Resultate

6.1 Wärmedurchlasswiderstand / Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Plattenebene

Die Messungen des Wärmedurchlasswiderstandes bzw. der Wärmeleitfähigkeit gemäss Kap. 5.1 an je 2 VIP-Platten (nicht gealtert) mit den Abmessungen 50 x 50 cm² und der Plattendicke $d = 20$ mm ergeben folgende Resultate:

Messung Nr.	Proben- Nummern	Innendruck mbar	Dicke mm	R_{Probe} m ² K / W	$\lambda_{\text{Kern,ungealtert}}$ W/(m K)
1	vai25/26	1.3	19.95	4.658	0.0043
2	vai37/38	0.9	19.67	4.982	0.0039
3	vai47/48	1.0	19.75	4.730	0.0042
4	vidp0012	0.4	20.00	4.505	0.0044

Die Proben der Messungen Nr. 1 bis 3 enthalten gefällte Kieselsäure, jene der Messung Nr. 4 pyrogene Kieselsäure. Der Feuchtegehalt der Proben lässt sich nicht zerstörungsfrei feststellen. Gemäss Messungen des Innendruckes kann ein Anfangsfeuchtegehalt unter 0.2 Masse-% angenommen werden.

6.2 Wärmebrückeneffekt Randverbund

Aus Messungen des Wärmedurchlasswiderstandes gemäss Kap. 5.2 an je 4 Platten mit einer Stossfuge mit den Abmessungen 50 x 25 cm² und der Plattendicke d = 20 mm wurden im Rahmen des Projekts IEA Annex 39 für diesen Barrieretyp mit umgelegten Rändern folgende Werte bestimmt:

Dicke	Ψ_{Stoss} W/(m K)	Ψ_{Rand} W/(m K)
20 mm	0.0139 ± 0.0032	0.0070 ± 0.0016
30 mm	0.0064 ± 0.0022	0.0032 ± 0.0011

Um Einflüsse wie Messunsicherheit und unterschiedliche Stossbreiten zu berücksichtigen, ist die Verwendung folgender Ψ -Werte für die Dimensionierung angezeigt:

$$\Psi_{20 \text{ mm,Rand}} = 0.008 \text{ W/(m K)}$$

$$\Psi_{30 \text{ mm,Rand}} = 0.004 \text{ W/(m K)}$$

Diese Werte sind auf die Randlänge (Umfang) eines Panels anzuwenden. Für Stösse ist entsprechend die doppelte Länge einzusetzen.

6.3 Alterungsverhalten

Die Zunahme des Innendrucks und des massebezogenen Feuchtegehalts wurde an mehreren Probekörpern der Dicke d = 20 mm mit unterschiedlichen Abmessungen während einer Messzeit von rund 180 Tagen bestimmt. Die Resultate (Mittelwerte von 2 bis 5 Probekörpern) sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt.

25°C / 80% r.F.

Abmessungen (d = 20 mm)	Zunahme Innendruck p_a , mbar / Jahr	Zunahme Feuchtegehalt u_a , Masse-% / Jahr	Zeitkonstante Feuchteausgleich τ , Jahre
25 x 25 cm ²	3.6 ± 0.3	0.36 ± 0.05	17.8 ± 2.5
50 x 50 cm ²	2.9 ± 0.2	0.32 ± 0.02	19.9 ± 1.2
100 x 60 cm ² ¹⁾	2.7 ± 0.2	0.31 ± 0.03	20.7 ± 1.2

23°C / 50% r.F.

Abmessungen (d = 20 mm)	Zunahme Innendruck p_a , mbar / Jahr	Zunahme Feuchtegehalt u_a , Masse-% / Jahr	Zeitkonstante Feuchteausgleich τ , Jahre
25 x 25 cm ²	2.9 ± 0.4	0.13 ± 0.01	29.9 ± 3.0
50 x 50 cm ²	1.7 ± 0.1	0.11 ± 0.01	37.9 ± 3.8
100 x 60 cm ² ¹⁾	1.4 ± 0.2	0.10 ± 0.01	41.7 ± 4.2

¹⁾ Werte berechnet auf Basis der Messwerte

7 Langzeitwerte der Wärmeleitfähigkeit

Gestützt auf die Alterungsdaten in Abschnitt 6.3 können mit Gl. (4) Langzeitwerte der Wärmeleitfähigkeit ¹⁾ angegeben werden. Ausgehend von einem Anfangswert $\lambda_0 = 4.5 \text{ mW}/(\text{m K})$, der von allen gemessenen Proben unterschritten wird, sind in den folgenden Tabellen berechnete Langzeitwerte des Innendrucks, des Feuchtegehalt und der Wärmeleitfähigkeit zusammengestellt.

Prognosewerte Klima 25°C/80% r.F., DL105			
Format	cm	50x50x2	100x60x2
Zeitdauer 15 Jahre			
Innendruck $p_{i \text{ total}}$	mbar	37.7	34.8
Feuchtegehalt u_m	Masse-%	3.4	3.3
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \text{ SiO}_2 \text{ pyrogen}$	mW/(m K)	7.0	6.9
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \text{ SiO}_2 \text{ gefällt}$	mW/(m K)	8.6	8.3
Zeitdauer 30 Jahre			
Innendruck $p_{i \text{ total}}$	mbar	68.4	62.9
Feuchtegehalt u_m	Masse-%	5.0	4.9
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \text{ SiO}_2 \text{ pyrogen}$	mW/(m K)	8.7	8.5
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \text{ SiO}_2 \text{ gefällt}$	mW/(m K)	11.8	11.3

Prognosewerte Klima 23°C/50% r.F., DL105			
Format	cm	50x50x2	100x60x2
Zeitdauer 25 Jahre			
Innendruck $p_{i \text{ total}}$	mbar	41.0	31.9
Feuchtegehalt u_m	Masse-%	1.9	1.8
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \text{ SiO}_2 \text{ pyrogen}$	mW/(m K)	6.7	6.3
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \text{ SiO}_2 \text{ gefällt}$	mW/(m K)	8.9	7.9
Zeitdauer 50 Jahre			
Innendruck $p_{i \text{ total}}$	mbar	78.8	60.9
Feuchtegehalt u_m	Masse-%	2.9	2.8
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \text{ SiO}_2 \text{ pyrogen}$	mW/(m K)	8.4	7.7
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \text{ SiO}_2 \text{ gefällt}$	mW/(m K)	12.7	11.0

Der Anstieg des Innendrucks, des Feuchtegehalt und der Wärmeleitfähigkeit in Funktion der Zeit ist im Anhang 1 grafisch dargestellt.

¹⁾ Die Resultate beruhen auf der Extrapolation von Labordaten aus einem Zeitraum von rund 6 Monaten. Zurzeit sind noch keine Langzeitwerte aus Anwendungen bekannt, welche zur Abschätzung der Unsicherheit dieser Extrapolation herangezogen werden können.

Für den Baubereich ist in Anlehnung an die Europäischen Normen für Wärmedämmstoffe für Gebäude EN 13162 ff. und Vornorm SIA 279 die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquivalent}}$ einschliesslich Alterung im Zeitraum von 25 Jahren bei der Klimabedingung 23°C, 50% r.F. und Randverlust gemäss Gl. (2) massgeblich. Mit dem Anfangswert $\lambda_0 = 0.0045 \text{ W/(m K)}$ berechnen sich folgende Werte für typische Formate:

Format l x b mm x mm	d = 15 mm		d = 20 mm		d = 30 mm	
	$\lambda_{25 \text{ Jahre}}$ W/(m K)	$\lambda_{\text{äquivalent}}$ W/(m K)	$\lambda_{25 \text{ Jahre}}$ W/(m K)	$\lambda_{\text{äquivalent}}$ W/(m K)	$\lambda_{25 \text{ Jahre}}$ W/(m K)	$\lambda_{\text{äquivalent}}$ W/(m K)
1000 x 1200	0.0065	0.00694	0.0061	0.00669	0.0056	0.00604
1000 x 600	0.0068	0.00744	0.0063	0.00715	0.0058	0.00644
500 x 1200	0.0069	0.00758	0.0063	0.00721	0.0058	0.00648
500 x 600	0.0072	0.00808	0.0066	0.00777	0.0059	0.00678

Der Nennwert λ_D bzw. Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit nach SIA 279²⁾ ist der auf drei Nachkommastellen aufgerundete Wert in W/(m K), der von mindestens 90 % der Produktion unterschritten wird (mit Vertrauensniveau 90 %). Für Vaku-Isotherm DL105 sind unter Berücksichtigung der Häufigkeit verschiedener Formate folgende Werte angezeigt:

Dicke	Wärmeleitfähigkeit λ_D
15 bis 25 mm	0.008 W/(m K)
ab 30 mm	0.007 W/(m K)

Diese Werte sind für grossflächige Isolationen mit vernachlässigbaren geometrischen Wärmebrücken anwendbar. Der Wärmedurchlasswiderstand bzw. der U-Wert von Bauteilen mit VIP (Türen, Rahmen, Brüstungselemente usw.) kann nicht durch dieses vereinfachte Verfahren berechnet werden, sondern ist durch Messung oder detaillierte Berechnung (2-/3-dimensionale Temperaturfeldberechnung) einschliesslich Metallschichten in der VIP-Hülle zu bestimmen.

Hinweise:

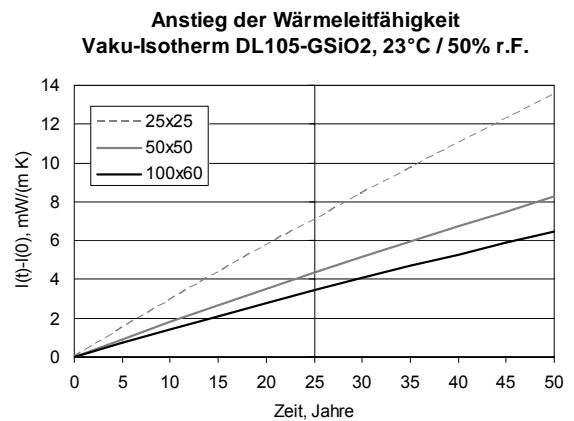
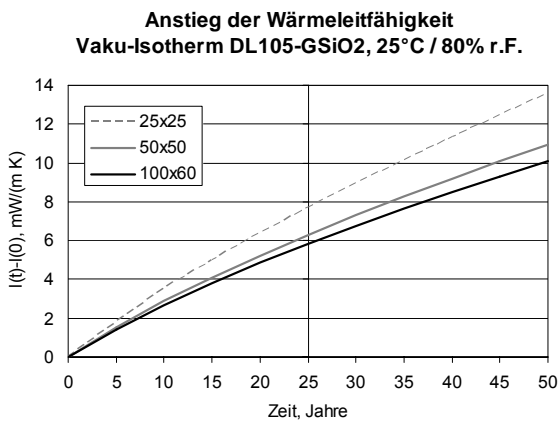
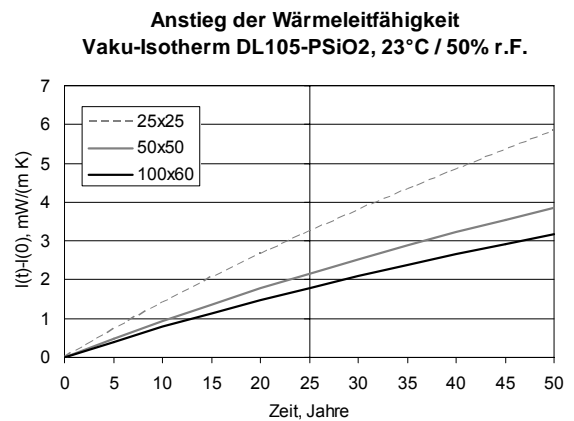
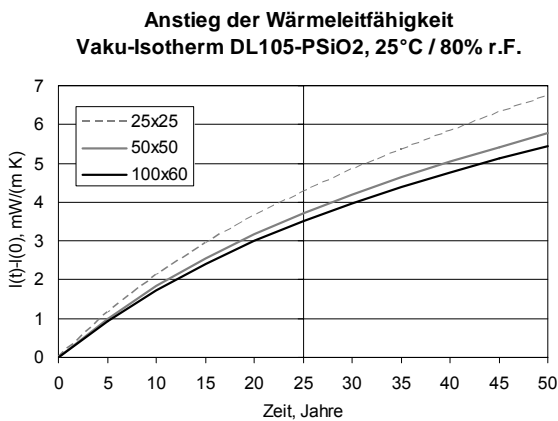
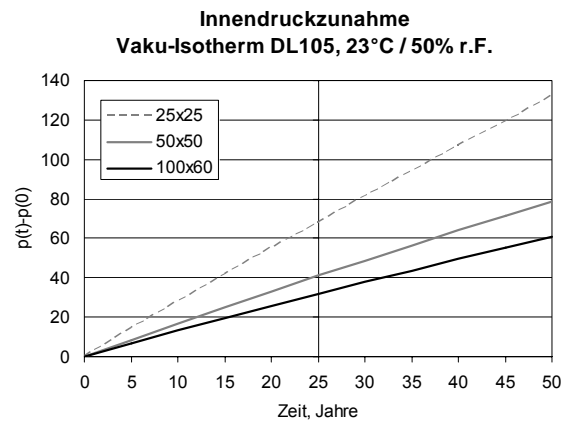
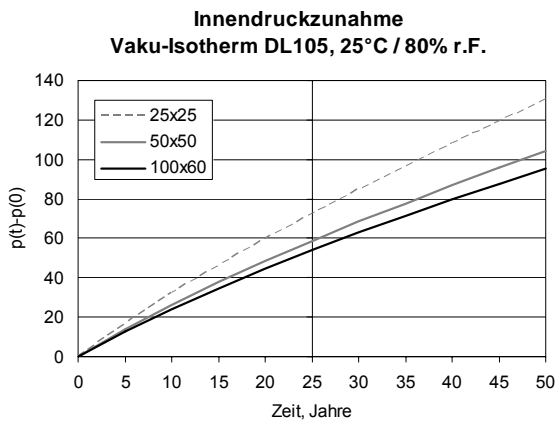
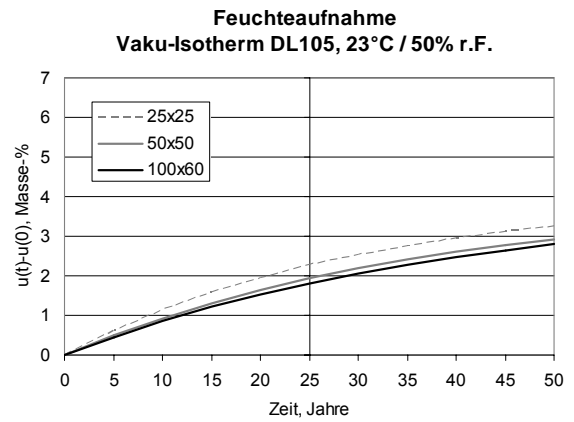
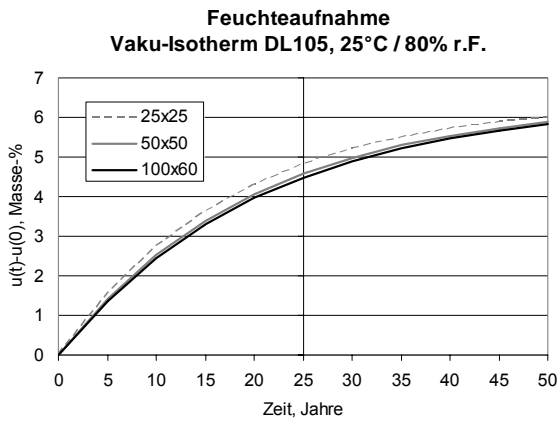
- Diese Werte beinhalten im Wesentlichen Alterungseffekte durch Temperatur- und Luftfeuchteinflüsse im Bereich von Umgebungsbedingungen. In Anwendungen mit wiederkehrenden höheren Temperatur- und/oder Feuchtelasten oder häufigem Auftreten von (Tau-) Wasser an VIP-Oberflächen oder im Stossbereich kann vorzeitige Alterung eintreten.
- Erhöhte mechanische, chemische oder UV-Belastungen können zu beschleunigter Alterung oder Ausfällen führen.
- Für Planung und Einbau von VIP-Dämmungen sind speziell ausgebildete Fachpersonen unerlässlich. Wichtige Punkte sind insbesondere: Schutz vor mechanischer Beschädigung bei Transport und Einbau, beidseitig weiche Deckschichten ohne Einschluss scharfkantiger Partikel wie Sandkörner etc., satte Verlegung mit möglichst schmalen Stossfugen, gute Lösungen bei Anschlussdetails.

²⁾ Zur Verwendung dieses Werts in bauphysikalischen Nachweisen (SIA 180) oder Wärmeschutznachweisen (SIA 380/1) in der Schweiz ist eine Bestätigung durch die Kommission SIA 279 erforderlich.

Anstieg von Innendruck, Feuchtegehalt und Wärmeleitfähigkeit

Anhang 1

Formate 25 x 25 cm², 50 x 50 cm², 100 x 60 cm² / Dicke 20 mm



Anhang 2

Wärmeleitfähigkeitsmessung an der EMPA Abt. Bautechnologien

Messprinzip

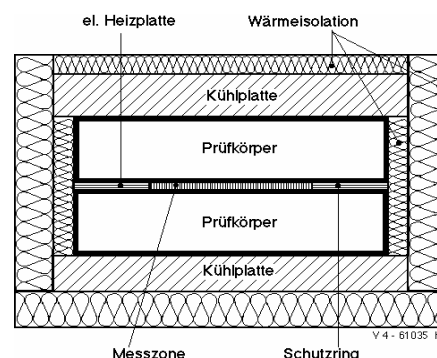
Der Wärmedurchlasswiderstand bzw. die Wärmeleitfähigkeit von Materialien mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand wird in Übereinstimmung mit SIA V 279 „Wärmedämmstoffe“ durch das Zweiplattenverfahren gemäss SN EN 12667 bzw. ISO 8302 bestimmt (SOP 176.103). Dabei wird der mittlere Wärmedurchlasswiderstand von zwei plattenförmigen Probekörpern ermittelt, welche symmetrisch zu beiden Seiten einer quadratischen Heizplatte angeordnet sind. An den gegenüberliegenden Probekörperoberflächen wird die Wärme durch Kühlplatten konstanter Temperatur abgeführt, womit sich eine stationäre Temperaturdifferenz einstellt. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit ist die Heizplatte in eine zentrale Messzone und eine thermisch abgetrennte Randzone auf gleicher Temperatur unterteilt. In der Messzone wird die elektrische Heizleistung im stationären Zustand gemessen und daraus die Wärmestromdichte bezogen auf die (beidseitige) Fläche bestimmt. Der Wärmedurchlasswiderstand berechnet sich als Quotient von gemessener Temperaturdifferenz und Wärmestromdichte.

Messapparatur

An der EMPA werden zwei Messapparaturen eingesetzt, die sich im Wesentlichen durch die Abmessungen der Kühl-/ Heizplatte und der zentralen Messzone unterscheiden:

- SOP 176.001: Platte 500 x 500 mm², Messzone 250 x 250 mm²
- SOP 176.002: Platte 750 x 750 mm², Messzone 300 x 300 mm².

In der nebenstehenden Skizze ist der Aufbau der Prüfapparatur schematisch dargestellt. Umgeben von einer dicken Wärmedämmstoff-Hülle liegen die 2 Probekörper horizontal zwischen der Heiz- und den beiden Kühlplatten. Die Kühl- und die Heizplattentemperaturen können zwischen -20°C (Kühlplatte) und 60°C (Heizplatte) frei gewählt werden.



Der Messbetrieb erfolgt automatisch durch eine elektronische Steuerung und Datenerfassung. Zur Einhaltung eines stabilen Messbetriebes werden enge Grenzen für die Abweichung gegenüber den Solltemperaturen, den Temperaturunterschieden zwischen Kern- und Randzone sowie innerhalb der Heiz- und der Kühlplatten wie auch für den Regelbereich der Heizleistung überwacht.

Messverfahren und Bezeichnungen

- Mittlere Oberflächentemperatur der Zentrums-Heizfläche (Mittelwert aus 5 Messstellen): ϑ_W
- Mittlere Oberflächentemperatur an der Kühlfläche: ϑ_K
- Mittlere Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlfläche: $\Delta\vartheta = \vartheta_W - \vartheta_K$
- Mitteltemperatur der Probe: $\vartheta_M = (\vartheta_W + \vartheta_K)/2$
- Mittlere Heizleistung: P_{Heizung}
- Mittlere Probendicke: d
- Fläche der Messzone (einseitig): A

Während je 20 Minuten werden Heizleistung und Oberflächentemperaturen gemessen und daraus ein Einzelmesswert des Wärmedurchlasswiderstands $R = \Delta\vartheta \cdot 2A / P_{\text{Heizung}}$ bzw. der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = d / R$ berechnet. Der gültige Messwert für eine Mitteltemperatur wird als Mittelwert von mindestens 5 Einzelmesswerten bestimmt.

Die Standard-Mitteltemperatur ϑ_M für Wärmedämmstoffe ist 10.0 ± 0.3 °C mit $\Delta\vartheta$ ca. 10 K. Messungen bei mehreren Mitteltemperaturen werden normalerweise bei 9°C, 19°C und 29°C durchgeführt. In diesem Fall kann unter Annahme einer linearen Temperaturabhängigkeit eine Regressionsgerade bestimmt werden. Als Resultat wird dann die Wärmeleitfähigkeit bzw. der Wärmedurchlasswiderstand für $\vartheta_M = 10$ °C auf der Regressionsgerade angegeben.

Messunsicherheit

Die Reproduzierbarkeit der Messung liegt in der Regel günstiger als ± 0.5 %. Die kombinierte Standardunsicherheit beträgt bei homogenen, ebenen und planparallelen Probekörpern bis 75 mm bzw. 125 mm Dicke ca. 1.5 %.

Probekörper

Abmessungen: 500 x 500 mm² oder 750 x 750 mm², Dicke maximal 100 mm bzw. 180 mm.

Thermischer Widerstand (d/λ): Zwischen 0.3 und 10 m²K/W.

Die Probekörper müssen ausreichend eben und planparallel sein, die Dicke und die Rohdichte der zwei Probekörper sollten nicht mehr als 5 % von einander abweichen.

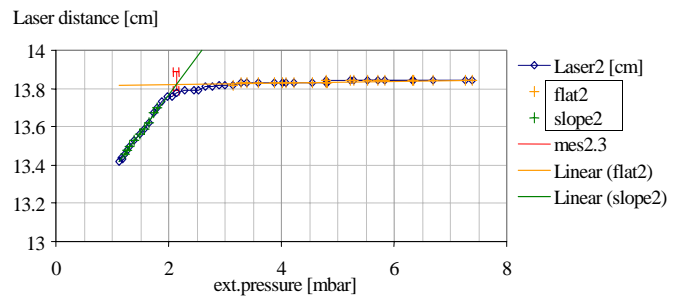
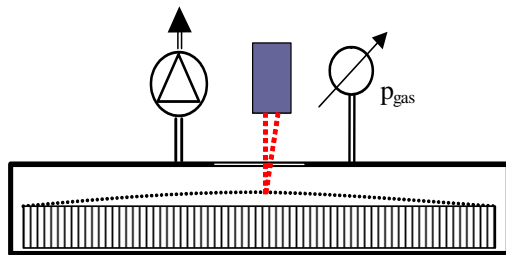
Die Dicke von Probekörpern wird allgemein gemäss Prüfverfahren SN EN 823 gemessen. Bei weichen Probekörpern werden die Abstände von Heiz- und Kühlplatten mit Stützen auf die Nenndicke eingestellt. Loses Material wird so in einen Holzrahmen eingefüllt, dass die vorher festgelegte Rohdichte erreicht wird. Eine Schichtung von dünnen Probekörpern ist zulässig, wenn planparallele Probekörper ohne Luftzwischenräume gestapelt werden können.

Anhang 3

Innendruckmessung an Vakuumisolationspaneelen (VIP)

Messprinzip

Der Innendruck von VIP wird an der EMPA Abt. Bauphysik durch ein Druckausgleichsverfahren bestimmt. Dabei wird der Aussendruck um das VIP in einer Unterdruckkammer soweit abgesenkt bis der Innendruck des VIP unterschritten wird. Durch den leichten Überdruck im VIP beginnt sich die flexible Hülle vom Kern abzulösen. Dieser Vorgang wird durch optische Distanzmessung zusammen mit dem Aussendruck aufgezeichnet und daraus der Ausgleichsdruck ermittelt.



Messapparatur

Die Innendruckkammer ist an ein Leitungssystem mit Regelventil und Pumpe angeschlossen. Ein zweiter Anschluss der Kammer dient der Innendruckmessung. Da Innendrucke vor allem um 1 bis 20 mbar von Interesse sind, wurde ein Absolutdruckmesssystem kapazitiver Art bis 100 mbar angeschlossen. Zur Erfassung der Ablösung werden 3 bis 4 Distanzmesslaser eingesetzt. Eine Datenerfassung zeichnet Innendruck und Distanz als Funktion der Zeit auf. Im Messbereich bis 15 mbar wird der Übergangsbereich mit Hilfe einer automatischen Steuerung mehrfach durchgeführt, über 15 mbar Innendruck erfolgt die Druckabsenkung manuell. Der Innendruck-Messbereich ist 0,2 mbar bis 100 mbar. Der Absolutdrucksensor wird ab 80 bis 110 mbar (gemessen mit einem Pirani-Drucksensor) durch ein Ventil vor dem Umgebungsdruck geschützt, so dass die Empfehlung „seit 2 Stunden unter 100 mbar“ bei der Messung eingehalten wird.

Messverfahren

Bei der VIP-Hülle werden 2 Typen unterschieden: überstehende Hüllen mit umzulegenden Randflächen und satt gepackte Hüllen ohne Randflächen. Proben mit überstehenden Hüllen werden mit einer Lochplatte (Lochdurchmesser 20 cm) beschwert, damit nicht eine Auswölbung nach unten die Volumenzunahme dominiert. Bei eng anliegender Hülle und tiefem Innendruck wird ohne Lochplatte gemessen, da nur so eine ausreichende Verschiebung der Hülle erreicht wird.

Das erste Ablösen der Folie wird dabei nicht ausgewertet, da sich der erste Ablösevorgang teilweise stark von den folgenden unterscheidet, was mit einem Haften der Folie nach dem lange andauernden Druck von 1 bar bzw. 10 t/m² erklärt werden kann.

Da aus Handhabungsgründen die VIP in horizontaler Lage vermessen werden, ist unter 0,1 mbar (10 N/m²) das Folieneigengewicht von typischen 100 g/m² (1 N/m²) nicht mehr vernachlässigbar. Beim Messen unter 0,2 mbar weicht die Druckkurve von der Solldruckkurve ab. Dies ist auf die Leistung der Pumpe, bzw. Lecks zurückzuführen.

Zur Messdatenerfassung dient eine intern erstellte Software, die auch in anderen Prüfständen wie dem 2-Plattengerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eingesetzt wird.

Das Messresultat ist der Mittelwert von mindestens 3 Orten (Laserpunkte) und 2 Durchgängen. Der Innendruck wird normalerweise für die Temperatur bei normalen Laborbedingungen angegeben (20 bis 25°C).

Messunsicherheit

Die Messunsicherheit des eingesetzten Absolutdruckmessers (Compact Capacitance Diaphragm Gauge Pfeiffer CMR262, temperaturkompensiert) wird mit 0,2% des Messwerts angegeben. Der Ortseinfluss der Laserposition erweist sich als wichtiger bezüglich der Wiederholgenauigkeit einer Innendruckmessung als die zeitliche Wiederholung der Druckrampe. Nach dem aktuellen Erfahrungsstand kann die Standardunsicherheit auf $s = 0,3$ mbar (Hülle mit umgelegten Randflächen) bzw. $s = 0,1$ mbar (satt gepackte Hüllen) + 5% relativ geschätzt werden.

Probekörper

Abmessungen: maximal 500 x 500 [mm]

Empfohlene Minimalgröße: 200 x 200 [mm]