



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Jahresbericht 23. November 2012

Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte – Bauelemente für Vakuumpanels

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

Forschungsprogramm „Elektrizitätstechnologien und –anwendungen“

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Helbling Technik AG

Hubstrasse 24

CH-9500 Wil

www.helbling.ch

Autoren:

Hans Tischhauser, Helbling Technik AG, hans.tischhauser@helbling.ch

Gerhard Staufert, freier Mitarbeiter Helbling Technik AG, gs@galileo-ag.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Roland Brüniger

BFE-Vertragsnummer: SI/500552-04

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Definition

Wir werden im Folgenden - und in zukünftigen Arbeiten - für alle Arten von Aufbauten, welche einen leeren evakuierten Raum zur thermischen Isolation verwenden, den Begriff "Vakuumspalt-Isolation" (englisch: vacuum space insulation) oder kurz "VSI" verwenden.

Dieser Begriff hat für alle Arten von Aufbauten Gültigkeit, unabhängig davon ob diese panelartig, zylindrisch, kubisch, becherförmig oder wie auch immer geformt sind und ob sie einen Spalt mit konstantem oder sehr stark variierendem Wandabstand verwenden.

Projektziele

Im Rahmen der vom Bundesamt für Energie mitfinanzierten, vom Dezember 2010 bis Oktober 2011 durchgeführten Projekts "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte - Technologieabklärungen für Vakuumpanels" (BFE Projekt Nr. SI/500552) (1) konnte bezüglich der, für ebene oder schwach gekrümmte Vakuumspalt-Isolationen (VSI) notwendigen, Distanzhalter folgende Zusammenfassung gemacht werden:

Es zeigt sich, dass Druck in Zug wandelnde Distanzhalter andersartigen überlegen sind. Hierbei sind die beiden Typen "Ball-Prinzip" und "Parallel-Filament-Prinzip" dem "Spann-Filament-Prinzip" deutlich vorzuziehen. Mit beiden Typen lassen sich kostengünstig sowohl innere Distanzhalter als auch Rand-Distanzhalter aufbauen, welche die hohe Anforderung bezüglich maximal zulässigen Wärmeflusses erfüllen. Die Untersuchungen ergeben, dass sich ihr thermisches Verhalten auch unter hohem Druck nicht verändert. Weiter wird deutlich, dass beide Typen bezüglich Ausgasen nicht nur unproblematisch sind, sondern dass sie mit hoher Wahrscheinlichkeit eine sehr erwünschte Getterwirkung ausüben.

Damit ist die prinzipielle Machbarkeit von Vakuumspalt-Isolation (VSI) mit ebenen Wänden - wie Vakuumspaltpanels oder Haushaltsgeräte mit beliebiger kubischer Form - bewiesen.

Bevor jedoch die Prototyp-Entwicklung von industriell fertigbaren panelartigen oder kubischen VSI durchgeführt werden kann, müssen die Aufbauarten und Fertigungsmöglichkeiten der Bauelemente "Distanzhalter" und "Rand-Distanzhalter" im Detail abgeklärt werden.

Zusätzlich muss abgeklärt werden, auf welche Weise die zur Minderung des Energietransports durch Wärmestrahlung notwendigen Folien auf kostengünstige Weise lagestabil in den Vakuumspalt eingebracht werden können.

Im Zeitraum zwischen der Antragstellung und dem Start des Projektes ist Helbling zur Überzeugung gelangt, dass gegenüber dem Projektantrag weitere, sich in den Zielsetzungen 1,2,3 und 8 niederschlagende, Punkte - zumindest im Sinne von Vorabklärungen - untersucht werden sollten.

Damit ergeben sich für das vorliegende Projekt folgende Zielsetzungen:

1. Vorabklärung der Anforderungen an Vakuumspalt-Isolation (VSI) für unterschiedliche Anwendungen in den Bereichen Haushaltsgeräte und Hausbau.
2. System-Überlegungen zur Anwendung von VSI für grosse Volumina
3. Bestimmung der tauglichen Materialien und Konstruktionsprinzipien für die das Vakuum begrenzenden Wände.
4. Bestimmung eines funktionell und kostenmässig optimierten Aufbaus von Distanzhaltern nach dem Ball-Prinzip und eines möglichen Fertigungsverfahrens derselben.
5. Bestimmung eines funktionell und kostenmässig optimierten Aufbaus von Distanzhaltern nach dem Parallel-Filament-Prinzip und eines möglichen Fertigungsverfahrens derselben.
6. Bestimmung eines funktionell und kostenmässig optimierten Aufbaus eines die Grenzwände des Vakuumspalts abschliessenden Randverbundes unter Verwendung von Rand-Distanzhaltern nach diesen beiden Prinzipien, inklusive der gasdichten Verbindung eines gasdichten Randbandes mit den Grenzwänden.
7. Bestimmung des Typs und der thermisch guten, lagestabilen Befestigung von strahlungsmindernden Folien im Innern des Vakuumspalts.
8. Art des Getterns zur langzeitigen Sicherstellung des notwendigen Unterdrucks im Vakuumspalt.
9. Test des Zusammenwirkens dieser Bauelemente anhand einfacher, panelartiger Aufbauten.

Erwartete Ergebnisse:

Die Summe der Resultate bildet die Basis für die Prototyp-Entwicklung von beliebig geformten Bauteilen oder Geräten mit Vakuumspalt-Isolation.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

An folgende Aufgaben wurden seit dem Projektbeginn (02.04.12) gearbeitet

1. Vorabklärungen
 - 1.1 Anwendungsbereiche VSI im Bereich Wohnen
 - 1.2 Stand der Technik und Potenziale durch VSI
 - 1.3 Lastenheft VSI
2. System-Überlegungen VSI für grosse Volumina
 - 2.1 Überlappungsprinzip
 - 2.2 Modularität
3. Grenzwände des Vakuums
4. Aufbau Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip
 - 4.1 Füllmaterial
 - 4.2 Hüllmaterial
 - 4.3 bisherige Resultate
5. Aufbau Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip
 - 5.1 Aufbau
 - 5.2 Vorrichtung für Herstellung kleiner Mengen
 - 5.3 bisherige Resultate
6. Randverbund
 - 6.1 Aufbau Prinzipien
 - 6.2 Randdistanzhalter
 - 6.3 Randband
 - 6.4 Verbindung Randband - Grenzwände
7. Fixierung Distanzhalter an Grenzwände
8. Strahlungsminderung
 - 8.1 Aufbau Prinzipien
 - 8.2 Folienhalter
 - 8.3 thermisches Verhalten
9. Gettern
10. Test VSI-Panel

1. Vorabklärungen

1.1 Anwendungsbereiche von Vakuumspalt-Isolation (VSI) im Umfeld Wohnen

Um fundierte Anforderungen an VSI stellen zu können, ist es notwendig, sich einen groben Überblick über die Anforderungen an die thermische Isolation möglicher Anwendungen von VSI zu erarbeiten.

Wir haben dies im Folgenden für eine willkürliche und nicht vollständige Auswahl von Anwendungen im Umfeld "Wohnen" getan. Zunächst folgen einige Erklärungen zu den betrachteten Anwendungen, die dann im Abschnitt 1.2, Tabelle 1 mit einer Zusammenstellung der isolationstechnisch relevanten Werte ergänzt werden.

1.1.1 Thermoblock Kaffeemaschine

Der Themenbereich Energieeinsparung durch thermische Isolation für Kaffeemaschinen ist von uns in früheren Arbeiten (2) ausführlich bearbeitet worden. Dabei wurde klar, dass eine Isolation des heißen Bauteils "Thermoblock" entscheidend ist. Für diese Isolation steht ein sehr begrenztes Volumen im Innern des Gehäuses der Kaffeemaschine zur Verfügung, so dass die Isolationsdicke keinesfalls grösser als 10 mm sein kann.

Wir haben in Tabelle 1 auch dem nicht isolierten Thermoblock einen Wärmedurchgangskoeffizienten zu-geordnet, der sich durch den Wärmeübergang vom Thermoblock durch den Luftraum des Gehäuseinnen-ren ergibt.

Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe einer becherartigen VSI um den Thermoblock - ohne jeglichen Komfortverlust - substanzielle Energieeinsparungen erzielt werden können.

1.1.2 Backofen

Auch bei Backöfen (für den Haushalt) ist der für Isolation zur Verfügung stehende Raum sehr begrenzt. Ein typischer Backofen weist in der Breite beispielsweise ein Einbaumass von 560 mm auf und die innere Breite des Backrohrs beträgt ca. 485 mm. Berücksichtigt man die Abmessungen der Wandmaterialien und die notwendigen Einbautoleranzen so bleibt ein mögliche Isolationsdicke von ca. 25 bis maximal 30 mm.

Da die Isolation Temperaturen bis über 400°C widerstehen muss, steht eine sehr begrenzte Auswahl zur Verfügung. Wir sind in unseren Überlegungen davon ausgegangen, dass Steinwolle zum Einsatz kommt. Der Wärmeleitwert λ [W/m] von Steinwolle ist stark temperaturabhängig (0.042 bei 50°C, 0.09 bei 300°C, 0.23 bei 600°C). Bei der Abschätzung des "heutigen" U-Wertes in Tabelle 1 sind wir von 0.08 W/mK bei 250°C ausgegangen.

Zur Abschätzung eines allfälligen Nutzraumgewinns durch VSI wurde davon ausgegangen, dass die gesamte Dicke der VSI nur 10 mm (statt 25 mm bei Steinwolle) beträgt.

1.1.3 Kühlschrank

Auch der Themenbereich Energieeinsparung durch verbesserte thermische Isolation bei Kühlschränken ist in früheren Arbeiten (3) ausführlich bearbeitet worden.

Auffällig ist hier zunächst einmal, dass der U-Wert eines guten A++ Kühlschranks mit den in Tabelle 1 angegebenen - und in früheren Arbeiten verifizierten - 0.14 W/m²K deutlich unterhalb des Wertes von ca. 0.4 liegt der sich ergibt, wenn man mit 50 mm PU-Isolation direkt den theoretischen U-Wert berechnet. Dies resultiert aus der Tatsache, dass für den gesamten U-Wert in diesem Falle sehr niedrige Wärme-übergangskoeffizienten im Inneren des Kühlschranks mit berücksichtigt werden müssen.

Die in der Tabelle 1 für den U-Wert als VSI-Sollwert angegebenen 0.08 W/m²K erscheinen als relativ geringe Verbesserung gegenüber den 0.14 eines A++ Kühlschranks. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass durch den Einsatz von VSI erhebliche Nutzraumgewinne (>40%) erzielt werden können, was dazu führt, dass die auf das Nutzvolumen bezogene spezifische Leistung sehr viel stärker sinkt. Für einen 250 Liter A++ Kühlschrank ergibt eine VSI-Variante mit denselben Aussenmassen ca. 370 Liter Nutzin-halt, womit die spezifische Leistung von 0.04 auf 0.015 W/Liter, also auf weniger als 40% des ursprüngli-chen Wertes sinkt.

1.1.4 Waschmaschine / Tumbler

Wir gehen davon aus, dass auch bei Waschmaschinen, vor allem aber bei Tumblern, erhebliche Energie-einsparungen mittels VSI möglich sind. Bis zum Zeitpunkt dieses Berichts haben wir jedoch noch nicht die Zeit gefunden dies zu verifizieren.

1.1.5 Boiler

Der in Tabelle 1 für einen heutigen sehr guten Boiler angegebene U-Wert von 0.4 W/m²K wurde aus dem Bereitschaftsstromverbrauch (0.66 kWh/24h) und der Gesamtoberfläche des besten im Frühjahr 2012 am Markt erhältlichen 80 Liter Boilers errechnet.

In einer früheren, ausführlichen Arbeit bezüglich dieser Anwendung (3) konnte mittels Berechnungen und Messungen an einem Funktionsmuster nachgewiesen werden, dass für einen 80 Liter Boiler mit VSI U-Werte von 0.12 und kleiner - und damit eine Reduktion der Energieverluste durch die Isolation von über 70% - auf wirtschaftliche Weise erzielbar sind. Da weitere Verbesserungen möglich sind, scheint der angegebene Soll-U-Wert von < 0.1 W/m²K realistisch.

Je nach Bauweise der VSI lässt sich - bei gleichen Außenabmessungen - zusätzlich zu den Energieeinsparungen noch ein Raumgewinn von bis zu 20% erzielen, so dass beispielsweise aus einem 80 Liter Boiler ein 95 Liter Boiler wird.

1.1.6 Saisonaler Wärmespeicher

In einer kurzen Studie konnten wir im Rahmen dieses Projektes rechnerisch abschätzen, dass "im Freien" aufgestellte, mittels VSI gedämmte Speicher auf ähnliche Deckungsgrade (= % des Wärmebedarfs der dem Speicher entnommen werden kann) kommen können, wie Wärmespeicher welche nach dem "Prinzip Jenni" so im Innern des Hauses untergebracht sind, dass der Wärmefluss durch die Dämmung zur Heizung des Hauses beträgt und damit vernachlässigbar ist.

Voraussetzung hierfür ist, dass die VSI des im Freien aufgestellten Wärmespeichers einen U-Wert von $\leq 0.08 \text{ W/m}^2\text{K}$ aufweist.

Dieselbe Feststellung gilt für einen denkbaren Wärmespeicher der in Inneren der Nord- (und West-) Wand eines Gebäudes untergebracht ist. Bei dieser Überlegung (und Berechnung) wurde davon ausgegangen, dass eine total ca. 70 cm dicke Wand eine 50 cm dicke Schicht Wasser beinhaltet, welche gegen außen vollständig und gegen innen konventionell oder teilweise mit VSI gedämmt ist.

1.1.7 Gebäudehülle

Die Betrachtung der für Minergie- bzw. Passiv-Häuser notwendigen U-Werte, sowie die mit VSI im Hausbau immer erzielbaren Raumgewinne, machen deutlich, dass allfällige VSI für die Gebäudehülle schon bei U-Werten von ca. $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ sinnvoll sein können und dass es auch für den Anwendungsfall "Passivhaus" nicht notwendig ist, U-Werte $< 0.08 \text{ W/m}^2\text{K}$ anzustreben. Ob VSI im Bereich Gebäudehülle Sinn machen wird sich über den Preis entscheiden.

1.1.8 Sonnenkollektoren

Mit Vakuum-Flachkollektoren, bei denen der Absorber mittels VSI gegenüber der Hülle isoliert ist, können im Stillstand Stagnationstemperaturen von 300°C und mehr erreicht werden. Diese Temperatur ist für Anlagen an Wohnhäusern deutlich zu hoch. Trotzdem gehen wir davon aus, dass derartige Kollektoren nicht nur für industrielle Prozesse sondern auch für das Einfamilienhaus interessant sind.

Die Eintrittstemperatur in den Speicher sollte nicht höher als 120°C sein, da der Speicher grundsätzlich auf eine max. Temperatur von 90°C ausgelegt ist. Dies kann man ausnutzen, um mit Vakuum-Flachkollektoren wesentlich weniger Kollektorfäche (= wesentlich niedriger Gesamtpreis) zu benötigen als mit konventionellen Kollektoren (Beharrungstemperatur typisch 170°C).

Die notwendige Temperaturreduktion auf die zulässigen 120°C am Speichereingang lässt sich fast ohne Energieverlust erreichen, indem beispielsweise kurz vor dem Eintritt das heiße Wasser mit entsprechend viel kühlem Wasser gemischt wird, welches mittels eines kurzen Rohrs aus dem Speicher geholt wird.

1.1.9 Leitungsrohre

Leitungsrohre mit VSI sind bekannt für den Transport kryogener Flüssigkeiten und werden in dieser Sparte als VIP (Vacuum Insulated Piping) bezeichnet. Eine Massen-Anwendung zeichnet sich vor allem im Bereich von verflüssigtem Erdgas (liquefied natural gas, LNG) ab, das bei Temperaturen von $< -161^\circ\text{C}$ flüssig ist. Höchstwertige, sehr aufwändig aufgebaute und damit sehr teure VSI-Rohre erreichen in dieser Branche für mindestens 10 Jahre garantierte U-Werte von $0.025 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Wir gehen nicht nur davon aus, dass ähnlich tiefe U-Werte mit deutlich weniger aufwändigen Konstruktionen erreichbar sein können, sondern vor allem, dass mit sehr einfachen und preiswerten VSI-Rohren U-Werte erreicht werden können, die mit beispielsweise $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ - bei kleinem Platzbedarf - immer noch um ein Vielfaches unterhalb der Werte von heute im Hausbau verwendeten isolierten Rohren liegen.

1.1.10 Gehäuse Klimaanlagen usw.

Klimageräte und ähnlich Anlagen werden häufig in aussenliegenden, nicht beheizten Bereichen - wie beispielsweise auf Flachdächern - installiert. VSI können eine platzsparende, preiswerte Alternative zur hochwirksamen thermischen Isolation derartiger nicht beheizter Bereiche darstellen, wenn sie U-Werte $< 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ realisieren.

1.2 Stand der Technik und Potenziale durch VSI

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der heute üblichen U-Werte für die oben besprochenen 10 Anwendungen sowie die U-Werte die mit VSI (Vakuumspalt-Isolation) angestrebt werden müssen damit eine Halbierung der über die Isolation entweichenden Energie oder zumindest (Gebäudehülle) substanziale Raumgewinne resultieren.

		U [W/m ² K]	Bemerkungen, allfälliger Nutzraumgewinn
Thermoblock Kaffeemaschine	unisoliert	7.40	hohe U-Werte wegen Platzmangel und grossen Randeffekten
	10 mm PU	2.30	
	VSI soll	< 1.20	
Backofen	Gerät mit Label A heute	3.5 - 4.0	hohe U-Werte wegen Platzmangel und hohen Temperaturen. Nutzraumgewinn (>10%) möglich
	VSI soll	< 0.5	
Kühlschrank	A++ heute	0.14	zusätzlich hoher Nutzraumgewinn (>40%) mit VSI und dadurch Senkung des spez. Verbrauchs von 0.04 auf 0.015 W/Liter
	VSI soll	0.08	
Waschmaschine / Tumbler	heute	?	vermutetes Potential noch nicht bestätigt
	VSI soll	?	
Boiler	sehr guter heute	0.40	Nutzraumgewinn bis 20% möglich
	VSI soll	< 0.10	
saisonaler Wärmespeicher	im Haus (Jenni)	0.15 - 0.2	ähnlicher Deckungsgrad wie mit Speicher im Hausinnern mit VSI-Speicher im Freien oder integriert in die Nordwand eines Gebäudes
	VSI soll im Freien	0.08	
	VSI soll in Hauswand	0.08	
Gebäudehülle	Normalwert	0.50	statt 450 mm Mineralwolle für Passivhaus-Nord maximal 25 mm mit VSI => Raumgewinn 0.42 m ² /lfm Wand
	Minergie	0.25	
	Passivh. Nord = VSI soll	0.08	
Sonnenkollektoren	heute	0.50	Vakuum-Flachkollektor mit VSI machbar
	VSI soll	< 0.15	
Leitungsrohre	isoliert heute	0.6 - 1.2	
	VSI soll	< 0.15	
Gehäuse Klimaanlagen usw.	heute	0.5 - 1.0	
	VSI soll	< 0.15	

Tab. 1 Wärmedurchgangskoeffizienten U heute und potenziell erreichbare Verbesserungen mit VSI

1.3 Lastenheft VSI

Aus der Diskussion in Abschnitt 1.1 und aus Tabelle 1 lässt sich das folgende - provisorische - allgemeine Anforderungsprofil für VSI ableiten:

verallgemeinerter Anwendungsfall	U [W/m ² K]	Dicke VSI [mm]
VSI für hohe Temperaturen	0.5 - 1.0	< 25
VSI für durchschnittliche Ansprüche	< 0.15	< 25
VSI für hohe Ansprüche	< 0.08	< 15
VSI für kryogene Anwendungen	< 0.05	< 25

Tab.2 Anforderungen an VSI

Festzuhalten ist, dass diese Anforderungen auch für grosse zu isolierende Flächen gelten, bei welchen die gesamte Isolation aus einzelnen VSI-Bauteilen zusammengesetzt werden muss. Dies bedeutet, dass den zusätzlichen Energieverlusten an den Rändern der VSI-Bauteile so Rechnung getragen werden muss, dass der Gesamt-U-Wert den in Tabelle 2 angegebenen Wert nicht überschreitet.

Zur Dicke der VSI ist zu sagen, dass die in Tabelle 2 angegebenen Werte so zu verstehen sind, dass auch allfällige nach aussen stehende Verrippungen der VSI-Wände darin beinhaltet sind.

2. System-Überlegungen VSI für grosse Volumina

Grosse Volumina bzw. grosse Flächen können - wie mit den wohlbekannten VIP - mit VSI nur so realisiert werden, dass die gesamte Isolationsfläche aus einzelnen VSI-Bauteilen zusammengesetzt wird.

Zur Vermeidung grosser Energieverluste über die Ränder sind erstens schwach wärmeleitende Randverbunde notwendig, auf die wir in Abschnitt 6 eingehen werden. Zweitens ist das Überlappungsprinzip geeignet Randverluste zu minimieren. Eine kostengünstige Realisierung desselben ist mittels eines modularen Systems denkbar.

2.1 Überlappungsprinzip

Figur 1 zeigt eine Prinzipskizze des Überlappungsprinzips. Durch gegenseitige Überlappung zweier angrenzender Teile wird eine sehr grosse Verlängerung der Wärmetransportlänge über den Rand erreicht. Dank der Tatsache, dass bei VSI die Summe der Wärmedurchgangskoeffizienten durch das Restgas U_g und durch Strahlung U_s unabhängig von der Höhe des Spalts ist, entsteht auch in einem sehr stark abgedünnten überlappenden Randbereich keine Kälte- bzw. Wärmebrücke. Im Gegenteil, im Bereich Überlappungstiefe ist der Wärmefluss dank der beiden Vakumschichten halbiert, was dazu beiträgt, den Verlust über die Festkörper-Wärmeleitung am Rand zu minimieren.

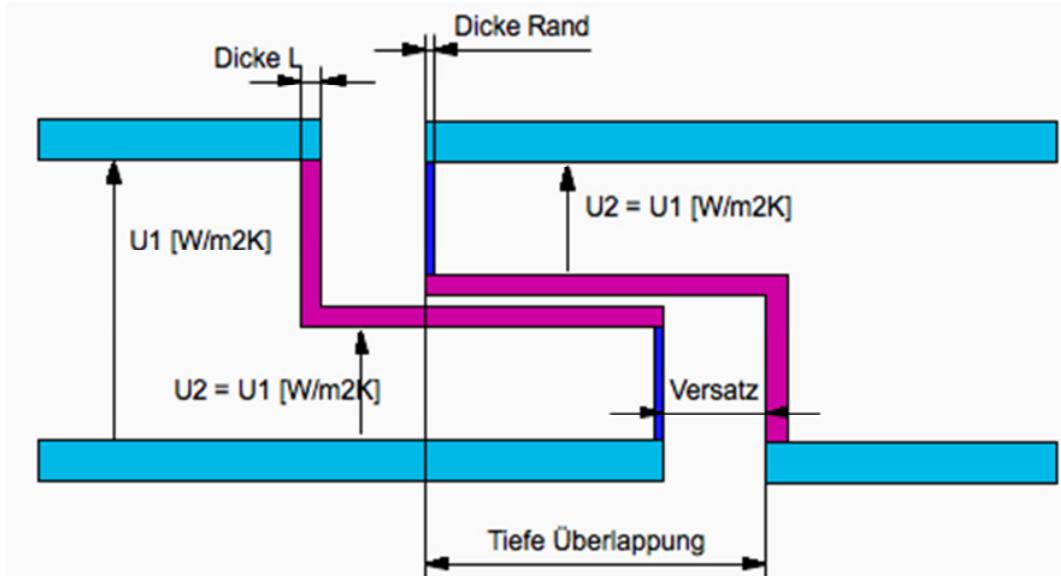


Fig. 1 Minimierte Randverluste durch Überlappung

Tabelle 3 zeigt die Resultate von mit FEM abgeschätzten Wärmedurchgangskoeffizienten U_{tot} von aneinanderstossenden VSI-Panels mit verschiedenartigen Randaufbauten. Die gesamte Dicke des Panels wurde mit 15 mm angenommen. Alle in der Berechnung verwendeten Materialien sind rostfreier Stahl mit Wärmeleitfähigkeit 15 W/mK. Die Wärmeleitfähigkeit des Restgases im Panel wurde entsprechend einem Restdruck von 10^{-4} mbar bestimmt. Zur Berechnung des Wärmetransports durch Wärmestrahlung wurden Emissionsgrade von 0.3 für die Grenzwände und von 0.04 für 3 im Vakuum vorhandene Aluminiumfolien angenommen. Der Abstand zwischen den aneinanderstossenden Panels wurde mit 0.5 mm und als mit stehender Luft gefüllt angenommen. Die Stärke des L-förmigen Randbereichs bei Überlappung ist in Tabelle 3 mit Stärke horiz. | Stärke vertikal angeschrieben.

Die in den Berechnungen verwendete Stahlstärke des Randes von nur 0.02 mm lässt sich mittels den im Schlussbericht zum BfE-Projekt "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte, Technologieabklärung für Vakuumpanels, 2011" beschriebenen Randdistanzhaltern nach dem Parallel-Filament-Prinzip oder dem Ball-Prinzip realisieren.

Bezeichnung	Überlapp-Tiefe mm	Inoxstärke Rand mm	Inoxstärke L-hor L-vert mm	U_{tot} W/m ² K	U_{rand} W/m ² K	$U_{\text{rand}} / U_{\text{tot}}$ %
Panel-Mitte (ohne Rand)				0.057		
Gerader Rand		0.02		0.127	0.070	55%
Überlappung, Versatz 0 mm	100	0.02	0.1 0.02	0.089	0.031	35%
Überlappung, Versatz 0 mm	200	0.02	0.1 0.02	0.060	0.002	4%
Überlappung, Versatz 0 mm	200	0.02	0.1 0.1	0.068	0.010	15%
Überlappung, Versatz 0 mm	200	0.02	0.2 0.2	0.086	0.028	33%
Überlappung, Versatz 50 mm	200	0.02	0.1 0.1	0.088	0.031	35%

Tab. 3 Berechnete Wärmedurchgangskoeffizienten U von aneinanderstossenden VSI-Panels mit verschiedenartigen Randaufbauten

Als Basis wurde zunächst der Wärmedurchgangskoeffizient $U_{\text{tot}} = U_g + U_s$ eines randlosen - und damit nur Wärmefluss durch Gastransport und Strahlung beinhaltenden - unendlich grossen Panels berechnet.

Bei allen anderen Berechnungen ist $U_{\text{tot}} = U_g + U_s + U_{\text{rand}}$ womit sich U_{rand} durch Subtraktion des für das randlose Panel berechneten U_{tot} bestimmen lässt.

Wenn ein aufwendiger Aufbau mit 0.02 mm Stahlstärke am äussersten Rand und im vertikalen Schenkel der L-förmigen Randverengung sowie einer Stahlstärke von 0.1 mm im 200 mm langen horizontalen Schenkel realisiert wird, lässt sich der Wärmeverlust über den Rand fast völlig eliminieren.

Auch ein deutlich vereinfachter Aufbau bei dem der gesamte 200 mm lange L-förmige Randbereich aus Stahl der Stärke 0.1 mm besteht bringt eine sehr grosse Reduktion der Wärmeverluste über den Rand.

Selbst wenn zwei Panels mit 200 mm langem L-förmigen Randbereich aus Stahl der Stärke 0.1 mm um 50 mm gegeneinander versetzt werden, bleibt eine substanzielle Reduktion der Wärmeverluste über den Rand. Dies eröffnet die Möglichkeit die Gesamtlänge sich überlappender Panels durch gegenseitige Verschiebung an die Länge des zu isolierenden Objekts anzupassen.

2.2 Modularität

Figur 2 zeigt die Prinzipskizze eines modularen VSI-Aufbaus, der aus 6 unterschiedlichen Ebenen oder abgewinkelten Modulen besteht.

Durch Addition und gegenseitige Verschiebung dieser 6 Module können prinzipiell beliebig grosse VSI-Hüllen aufgebaut werden.

Der obere und untere Abschluss kann beispielsweise mit kastenartigen Modulen sichergestellt werden, die entweder als "dicke" VSI realisiert sind oder die aus einem konventionellen Dämmstoff wie beispielsweise PU bestehen.

Dank der konsequenten Umsetzung des Überlappungsprinzips und der dadurch erreichten Minimierung der Randverluste entspricht der totale Wärmedurchgangskoeffizient U der entstehenden Hülle dabei nahezu demjenigen eines einzelnen VSI-Moduls.

Es sei nochmals betont, dass hier nur ein Prinzip skizziert ist.

Realisierungen dieses Prinzips bedürfen ausführlicher Entwurfsphasen unter Berücksichtigung der Eigenheiten des Anwendungsfalles.

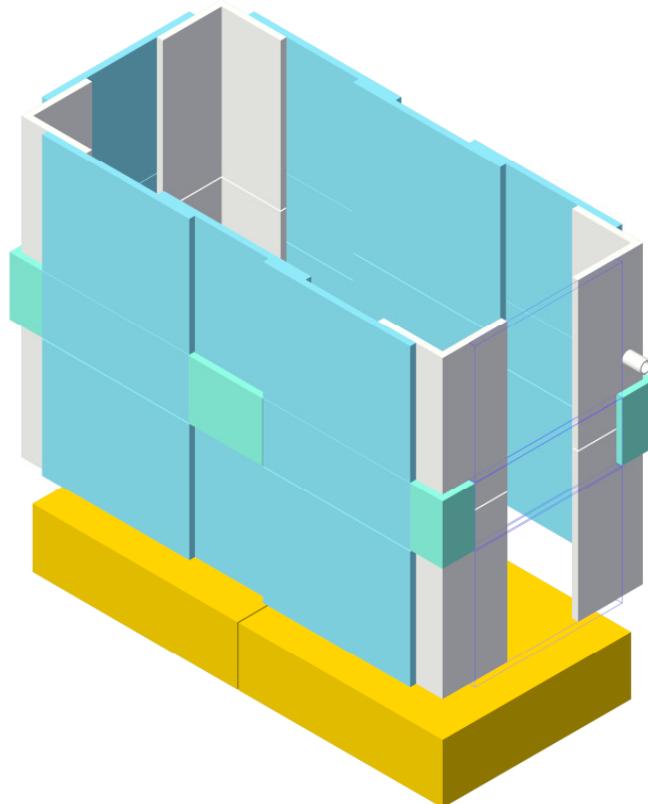


Fig. 2 Prinzipskizze modularer VSI-Aufbau

3. Grenzwände des Vakuums

Die das Vakuum begrenzenden Wände (Grenzwände) einer VSI sind nicht nur entscheidend für die mechanische Festigkeit der VSI und die Langzeitstabilität des Vakuums sondern auch für den Preis der VSI.

Da sie mehreren, sich teilweise konkurrenzierenden Anforderungen genügen müssen, beinhaltet ihre Konstruktion eine anspruchsvolle Optimierungsaufgabe.

Figur 3 zeigt die Anforderungen an VSI-Grenzwände und die von uns bis zum Zeitpunkt dieses Berichts verfolgten Lösungsansätze.

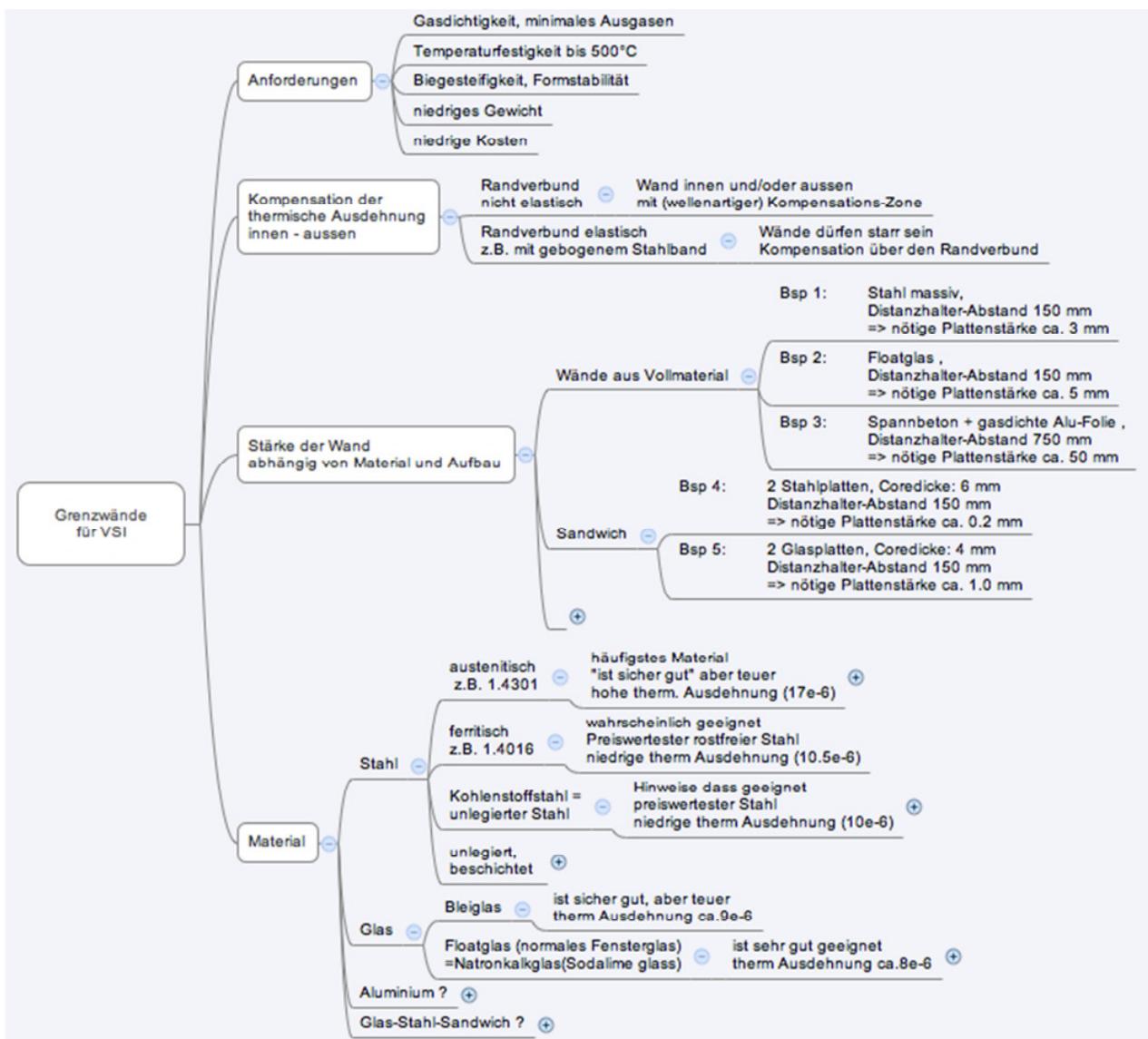


Fig. 3 Anforderungen an VSI-Grenzwände und Lösungsansätze

Die Anforderungen "höchste Gasdichtigkeit", "minimales Ausgasen" und "Temperaturfestigkeit" schränken die Auswahl möglicher Materialien auf Metalle und Glas ein.

Unter den Stählen sind die austenitischen Edelstähle bewährt in der Vakuumtechnik. Aufbauten wie Vakuumkammern und Beschleuniger-Rohre werden fast ausschliesslich mit diesen Materialien hergestellt.

Als relativ hoch legierte Stähle sind sie aber so teuer, dass sie - nach unseren bisherigen Erkenntnissen - für den massenhaften Einsatz von VSI nur dann in Frage kommen, wenn Wandkonstruktionen mit sehr dünnen Blechstärken (z.B. in Summe pro Wand < 0.4 mm) realisiert werden können.

Auch ferritische Stähle, z.B. 1.4016, finden Einsatz in der Vakuumtechnik. Sie sind als niedrig legierte Edelstähle deutlich billiger als die austenitischen und weisen einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf, der relativ nahe bei dem von Glas liegt. Sie werden deshalb häufig dort verwendet wo Glas und Stahl kombiniert werden müssen.

In letzter Zeit haben wir Hinweise gefunden, nach denen in bestimmten industriellen Massenprodukten bei denen VSI zum Einsatz kommt, sich "normale", sehr preiswerte Kohlenstoffstähle (C-Stähle) über lange Zeiträume hinweg bewährt haben. Da auch C-Stähle niedrige thermische Ausdehnungskoeffizienten aufweisen und deshalb gut zur Kombination mit Glas geeignet sind, werden wir diesen Hinweisen vertieft nachgehen.

Unter den Gläsern sind die relativ teuren, eine sehr niedrige Gasdurchlässigkeit aufweisenden Bleigläser genauso gut bewährt für die Vakuumtechnik wie austenitische Stähle.

Erfreulicherweise stehen diesen aber die massenhaft als Fensterglas zum Einsatz kommenden Natron-klalgläser (Floatgläser) bezüglich Gasdichtigkeit und Ausgasen nur wenig nach (4). Mit Floatglas steht damit ein sehr preiswertes Massenprodukt zur Verfügung, das bezüglich der Langzeitstabilität von Vakuum höchsten Ansprüchen zu genügen vermag.

In der folgenden Tabelle 4 haben wir die uns zugänglichen Preise für die interessantesten Grenzwand-Materialien zusammengestellt. Wir betonen, dass es sich hier nicht um "verbindliche" Angebots-Preise, sondern nur um plausible Vergleichswerte handelt.

Material	ca. Weltmarktpreis inkl. Leg'zusschl. + Transport (Mengen > 20 t) [\$/t]	spez. Gewicht [t/m ³]	ca. Preis pro m ² & mm Stärke [\$]	ca. Preis pro m ² VSI-Wand bei Sandwich-Bauweise (core+Bau = 5 \$/m ²) [\$]
Stahl austenitisch (Bsp. 1.4301)	5800.00	7.9	46.00	42.00
Stahl ferritisch (Bsp. 1.4016)	3400.00	7.8	27.00	27.00
C-Stahl	1000.00	7.8	8.00	11.00
Floatglas	520.00	2.5	1.30	10.00

Tab. 4 ungefähre Weltmarktpreise für vakuumtaugliche Stähle und Floatglas, Stand 2012

In der letzten Spalte von Tabelle 4 sind die aus den Materialpreisen der Spalte 1 resultierenden Schätz-werte der Materialkosten für 1 m² VSI-Wand in Sandwich-Bauweise dargestellt. Für das Core-Material und das Zusammenfügen des Sandwichs haben wir bei allen Fällen Kosten von 5 \$/m² angenommen. Für ein Stahl-Sandwich mit 6 mm Corestärke sind, analytisch abgeschätzt, 2 Stahlplatten à 0.2 mm Wandstärke notwendig damit bei einem Distanzhalterabstand von 150 mm Durchbiegungen < 0.5 mm auftreten. Total sind also für die beiden Wände des VSI 0.8 mm Stahl zu verbauen. Entsprechend sind für ein Glas-Sandwich mit 4 mm Corestärke 2 Glasplatten à 1 mm Wandstärke, total also 4 mm Glas notwendig.

Es ist deutlich, wenn man daran interessiert ist, VSI (Vakuumspalt Isolation) für Massenprodukte zum Durchbruch zu verhelfen, muss man daran arbeiten, die Grenzwände nicht aus dem sicher guten aber sehr teuren austenitischen Stahl herzustellen, sondern - im Sinne von Lebensdauer des Vakuums und der mechanischen Festigkeit - genügend gute Lösungen unter Verwendung von C-Stahl und Floatglas zu entwickeln.

Figur 4 zeigt einen Eventualansatz hierfür, der die, bezüglich der Lebensdauer des Vakuums hervorragenden Eigenschaften von Floatglas mit den guten Festigkeitswerten von C-Stahl kombiniert.

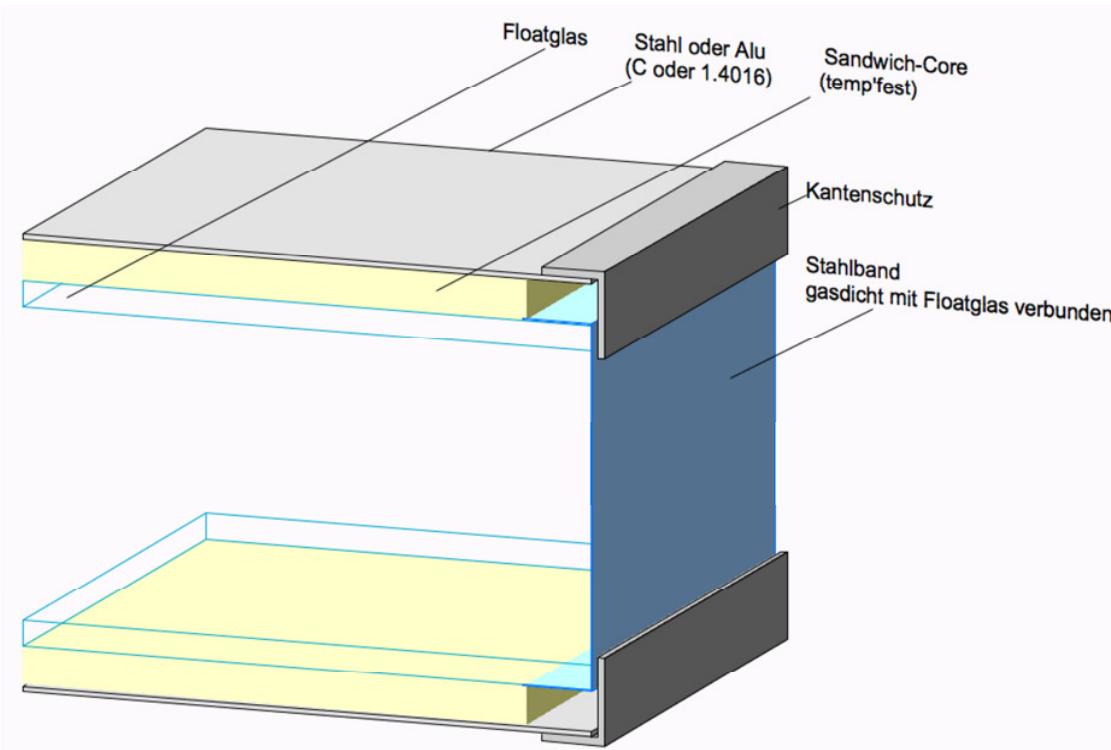


Fig. 4 Denkbarer Ansatz einer VSI mit Glas/C-Stahl Sandwich Grenzwänden

Grosse Temperaturunterschiede treten zwischen den Aussenseiten (Stahl) der oberen und unteren Sandwich-Platte auf. Der hierfür notwendige Längenausgleich kann problemlos vom Randverbund mit dünnem Stahlband aufgenommen werden.

Offensichtlich sind in der Skizze von Figur 4 weder die punktuell zwischen den Grenzwänden notwendigen Distanzhalter noch der für die Stützung des dünnen Randbandes aus Stahl notwendige Randdistanzhalter dargestellt. Auf diese wird in den Abschnitten 4, 5, 6 dieser Arbeit eingegangen.

Offensichtlich ist auch, dass für einen Aufbau gemäss Figur 4 - notabene kostengünstige - gasdichte Verbindungsmethoden zwischen Floatglas und Stahlband zur Verfügung stehen müssen. Allenfalls geeignete derartige Methoden werden wir im Abschnitt 7 dieses Berichts diskutieren und im weiteren Verlauf dieses Projekts eingehend bearbeiten.

4. Aufbau Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip

In einem vorgängigen Projekt (1) haben wir Ball-Distanzhalter (BD) als Gebilde definiert, in welchen ein fliessfähiges Füllmaterial in einer gasdurchlässigen, zugfesten Hülle eingeschlossen ist. Wird ein solches Gebilde unter Druck gesetzt, wandelt das fliessfähige Füllmaterial diesen in Zugkräfte um, die im Hüllmaterial wirken. Für VSI soll der Durchmesser eines BD im Bereich von 5 - 15 mm und seine Höhe zwischen 5 bis 30 mm liegen. Bei Distanzhalterabständen von 100 bis 200 mm können die Distanzhalter Durchmesser damit so gewählt werden, dass der Luftdruck Drücke um 50 N/mm^2 auf die Distanzhalter ausübt.

4.1 Füllmaterial

Da Distanzhalter in VSI notwendigerweise eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen müssen, muss dies natürlich auch für das fliessfähige Füllmaterial eines Ball-Distanzhalters (BD) im evakuierten Zustand zutreffen. Außerdem muss das Füllmaterial hohem Druck widerstehen können ohne zu kollabieren.

Wohlbekannte Materialien, welche diese Anforderungen erfüllen sind die Kernmaterialien von VIP (Vakuum-Isolations-Panels), also beispielsweise pyrogene Kieselsäure, welche bei Unterdrücken $< 1 \text{ mbar}$ eine Wärmeleitfähigkeit $< 4 \text{ mW/mK}$ aufweist und bekanntlich unter hohem Druck verpresst werden kann. Die-

se Materialien sind sehr teuer, was aber für den Aufbau von Ball-Distanzhaltern unerheblich ist, da hierfür nur sehr kleine Mengen notwendig sind.

Wir haben uns deshalb im Verlauf dieser Arbeit (und vermutlich auch in Zukunft) nicht um Alternativen zu den VIP-Kernmaterialien gekümmert, sondern die kleinen Mengen dieses Materials beschafft, welche notwendig sind, um einige Tausend Ball-Distanzhalter aufzubauen.

4.2 Hüllmaterial

Das Hüllmaterial eines Ball-Distanzhalters muss gasdurchlässig sein, damit das Füllmaterial bei der Evakuierung der VSI ebenfalls evakuiert wird. Weiter muss es in der Lage sein, die durch das Füllmaterial ausgeübten Zugkräfte zu übernehmen. Zusätzlich muss das Hüllmaterial eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

In einer früheren Arbeit (1) ist gezeigt worden, dass als Standard-Produkte am Markt erhältliche Glasflechtschläuche diese Anforderungen zu erfüllen vermögen.

In der laufenden Arbeit haben wir uns deshalb auf diesen Hüllentyp beschränkt. Untersucht wurde und wird in dieser Arbeit welche Durchmesser und Geflechtstärken für unsere Zwecke am besten geeignet sind.

Zu diesem Zweck haben wir 12 unterschiedliche Schlauchtypen mit nominellen Durchmessern zwischen 1 und 10 mm und Geflechtstärken von 0.2 mm und 0.3 mm beschafft. Mit diesen Schläuchen wurden in Vorversuchen von Hand Ball-Distanzhalter hergestellt und anschliessend mit einem Druck von deutlich mehr als 50 N/mm^2 gepresst.

Es hat sich sehr schnell gezeigt, dass die Herstellung von Ball-Distanzhaltern mit Schlauchdurchmessern < ca. 4 mm von Hand nicht gelingt, weil die Distanzhalter unter Druck in diesem Falle unkontrollierbar knicken. Dies schliesst aber nicht aus, dass die Herstellung von Ball-Distanzhaltern auch mit derart kleinen Durchmessern möglich ist, wenn mit einer entsprechenden genauen Vorrichtung gearbeitet wird.

4.3 Bisherige Resultate

Als Resultat der bisher durchgeföhrten Versuche kann folgendes festgehalten werden:

- Es lassen sich Ball-Distanzhalter herstellen, bei welchen die Höhe deutlich grösser ist als der Durchmesser, d.h. die eine fast säulenförmige Gestalt haben. Figur 5 zeigt das Beispiel eines solchen Distanzhalters nachdem dieser mit ca. 80 N/mm^2 in - in Figur 5 horizontal verlaufenden - Längsrichtung belastet wurde. Dabei wird das Füllmaterial zu einem "festen" Körper gepresst, der die Form welche er unter Druck angenommen hat auch ohne Druck beibehält.
- Der Durchmesser der gepressten Distanzhalter ist deutlich grösser als der Durchmesser der Hüllschläuche im unbelasteten Zustand. Diese Durchmesserzunahme ist (selbstverständlich) abhängig von der Geflechtstärke. Beispielsweise stellt sich ein Durchmesser des Ball-Distanzhalters von ca. 9 mm ein, wenn derselbe mit einem Schlauch des Durchmessers 6 mm und der Geflechtstärke 0.2 mm hergestellt und mit ca. 80 N/mm^2 gepresst wurde.



Fig. 5 säulenförmiger "gepresster" Ball-Distanzhalter

4.4 Weiteres Vorgehen

Für die weiteren Versuche mit Ball-Distanzhaltern beschränken wir uns im Verlauf dieses Projekts auf die Verwendung von 2 Schlauchtypen:

1. Schlauch-Ø 6 mm mit Geflechtstärke 0.2 mm resultierend in einem Distanzhalter-Ø von ca. 9 mm
2. Schlauch-Ø 10 mm mit Geflechtstärke 0.3 mm resultierend in einem Distanzhalter-Ø von ca. 15 mm

Unter Verwendung dieser Schläuche ist eine Versuchsreihe vorbereitet, bei welcher für Ball-Distanzhalter mit unterschiedlichen Durchmessern und Höhen folgendes gemessen werden soll:

1. Verlauf des Verformungsweges in Funktion des Drucks bis zum Platzen der Hülle
2. Messtechnische Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit an Luft
3. Messtechnische Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit im Vakuum

Eine einfache Vorrichtung zur reproduzierbaren Herstellung der Ball-Distanzhalter in kleinen Mengen ist konzipiert und wird bis Ende Jahr zur Verfügung stehen.

Die Gerätschaften zur Durchführung der oben genannten Versuche stehen bereit oder sind in Vorbereitung:

- für die Druckfestigkeits-Prüfung steht ein Standardgerät zur Druck-, Zugfestigkeits-Prüfung bereit.
- Für die Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit an Luft kann ein selbstgebautes Gerät aus einer früheren Arbeit (1) verwendet werden.
- Zur Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit im Vakuum befindet sich ein von Helbling selbst gebauter Rezipient gemäss Figur 6 im Umbau.

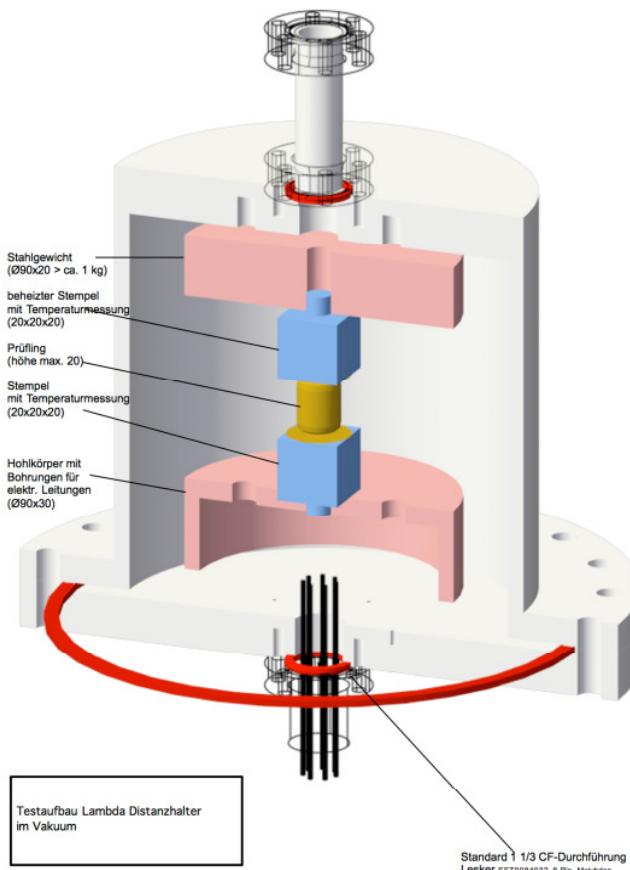


Fig. 6 Aufbau zur Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Distanzhalter im Vakuum

5. Aufbau Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip

5.1 Aufbau

Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip (PFD) wurden in der vorgängigen Arbeit (1) vorgeschlagen und prinzipiell getestet.

Sie bestehen aus einem Kern von vielen 10'000 parallel verlaufenden, endlosen Glasfilamenten, deren Wärmeleitfähigkeit quer zur Längsrichtung der Filamente im Vakuum ca. bei 3 mW/mK liegt.

Herstellbar ist ein solcher Kern relativ einfach durch das Zusammenführen am Markt erhältlicher schwerer Glasfilament- oder Basaltfilament-Rovings, die - wie gewünscht - aus zahlreichen parallel verlaufenden Filamenten mit Filamentdurchmesser < 10 µm bestehen. Führt man beispielsweise ca. 30 Rovings mit Gewicht 2'400 tex (1 tex = 1 Gramm pro Kilometer) zusammen, so erhält man einen Kern von ca. 8 mm Durchmesser.

Für die Herstellung unserer Testmuster haben wir die notwendige Menge an Glasfilament- und Basaltfilament Rovings beschafft.

Wenn ein solcher Kern in Querrichtung der Filamentlänge unter Druck gesetzt wird würde er ohne weitere Massnahme vollständig flach gedrückt. Um dies zu vermeiden muss der Kern mit einem zugfesten Material umwunden werden, wobei diese Umwindung eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen muss.

Nach einigen fehlgeschlagenen Versuchen mit Draht aus Edelstahl des Durchmessers 50 µm haben wir uns auch für das Umwindungsmaterial auf die Verwendung von Glas- oder Basaltfilamenten konzentriert.

Mit einem erheblichen zeitlichen Aufwand ist es gelungen 5 unterschiedliche Umwindungsmaterialien zu beschaffen.

In Vorversuchen haben wir bis zum heutigen Zeitpunkt zwei dieser Materialien eingesetzt. Die andern Varianten werden wir - je nach Bedarf - in den geplanten weiteren Versuchen verwenden.

Die PFD werden zunächst als langer Strang hergestellt. Um die gewünschten punktuellen Distanzhalter zu erhalten muss dieser Strang in beispielsweise 1 cm lange Teilstücke zertrennt werden.

Als sehr einfaches - auch für eine allfällige Produktion grosser Stückzahlen - geeignetes Trennverfahren hat sich in den, von uns von Hand durchgeführten, Versuchen das Zersägen mit einer dünnen Diamant-Trennscheibe erwiesen. Eine entsprechende Trennvorrichtung ist momentan im Bau.

Ohne weitere Massnahme würde sich die Umwindung beim oder nach dem Zertrennen des PFD-Strangs in Teilstücke wieder lösen. Es ist deshalb unabdingbar notwendig, die Umwindung vor dem Zertrennen zu fixieren. Da diese Fixierung schlussendlich mit in das Vakuum der VSI eingebracht wird, muss sie nicht nur den Temperaturen (z.B. 300°C, 2h) beim Evakuieren der VSI widerstehen, sondern sie darf nachher im Vakuum nur minimal ausgasen. Unsere bisherigen Erkenntnisse und Versuche weisen sehr stark darauf hin, dass es sinnvoll ist einen Hochtemperatur-Klebstoff als Fixierung zu verwenden.

Leider hat sich die Befürchtung bestätigt, dass die absolut nicht ausgasenden keramischen Klebstoffe nicht hierfür geeignet sind, da diese nach dem Aushärten sehr spröde werden und deshalb beim Zersägen förmlich zerbröseln.

In bisherigen Versuchen haben sich Polyimid-Klebstoffe, gefüllte Acryl-Klebstoffe oder bestimmte Silikone bezüglich Festigkeit, Zertrennbarkeit und Temperaturbeständigkeit als sehr vielversprechend erwiesen. Da auch die von den Herstellern gemachten Aussagen bezüglich des Ausgasens gut klingen, gehen wir davon aus mit einem dieser Klebstoff-Typen zum gewünschten Ziel zu gelangen.

5.2 Vorrichtung für Herstellung kleiner Mengen

Die Hauptschwierigkeit für die Herstellung von PFD ist das Umwinden des zum Kern zusammengeführten sehr schweren Roving-Bündels, welches ein Gewicht von 80'000 tex und mehr aufweist.

Wir haben eine ausführliche Suche nach allenfalls hierfür zur Verfügung stehenden industriellen Verfahren durchgeführt und sind nicht fündig geworden.

Unsere Diskussionen mit Umwindungs-Fachleuten der Textil-Industrie haben gezeigt, dass die dort - hauptsächlich zur Herstellung von elastischen Garnen - eingesetzten Umwindungsverfahren sich üblicherweise auf ein Gewicht von 200 tex und im äussersten Fall auf 2'000 tex beschränken und damit mindestens einen Faktor 40 unterhalb unserer Anforderungen liegen.

Auch eine entsprechende Suche bei den Herstellern von Seilen war fruchtlos. Es werden dort zwar sehr schwere Kerne mit im Wesentlichen parallel verlaufenden Fäden in einen Mantel eingehüllt (Bergseile), wobei die Hülle aber reine Schutzfunktion hat. Da solche Seile bei einer hohen Druckbelastung in Querrichtung fast beliebig flach gedrückt werden können ist diese Art von Mantel nicht für unsere Zwecke geeignet.

Da auch Diskussionen mit Wickel-Spezialisten aus dem Bereich der Herstellung elektrischer Spulen zu keinem Resultat führten, haben wir uns entschlossen eine entsprechende Umwindevorrichtung selbst zu bauen.

Figur 7 zeigt einen Vorversuchs-Aufbau mit welchem wir den Grundgedanken für eine solche Vorrichtung verifiziert haben.

Wir "missbrauchen" eine Drehbank. Das nicht drehende Roving-Bündel wird durch die drehende Hohlspindel der Drehbank geführt, an deren Ausgang eine mitdrehende Scheibe befestigt ist. Auf dieser Scheibe ist eine - bezüglich der Scheibe drehbare - Spule mit dem Umwindungsmaterial befestigt, von welcher das Umwindungsmaterial um das Roving-Bündel gewickelt wird. Mittels einer einfachen Bremse (im Bild ein Gummi-Element) kann die Spule so gebremst werden, dass die gewünschte Zugkraft des Umwindungsmaterials entsteht.

Die Erzeugung des mit der Drehzahl im gewünschten Verhältnis synchronisierten Vorschubs des Roving-Bündels wird - in Figur 7 nicht sichtbar - gewährleistet indem das Roving-Bündel am Werkzeug-Schlitten der Drehbank fixiert ist, welcher auf den gewünschten Vorschub beispielsweise im Bereich von 0.015 bis 5 mm/Umdrehung eingestellt ist.

Die Vorversuche haben gezeigt, dass eine nach diesem Prinzip arbeitende Vorrichtung brauchbar ist.

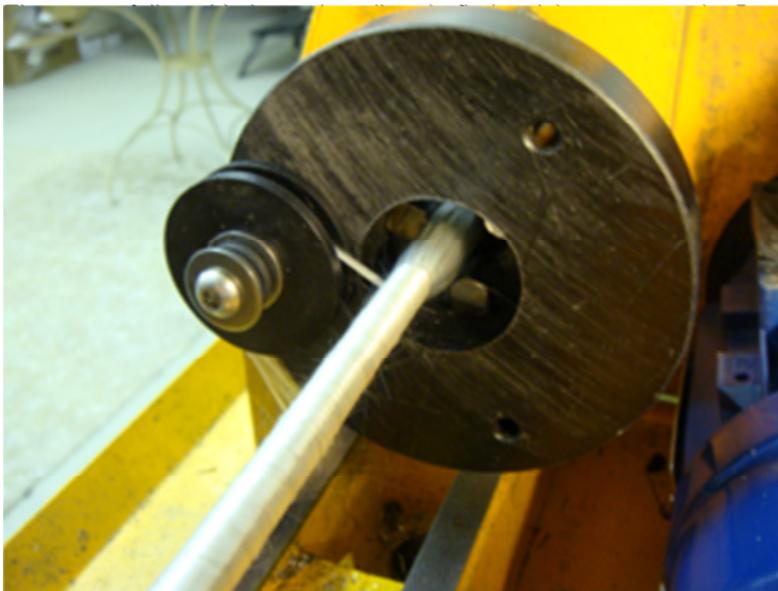


Fig. 7 Vorversuchs-Aufbau zur Umwindung von Parallel-Filament Distanzhaltern

5.3 bisherige Resultate

Mit der in Figur 7 gezeigten Umwinde-Vorrichtung wurden die vier in Figur 8 auf rotem Hintergrund gezeigten Vormuster von PFD-Strängen hergestellt.

Es ist deutlich sichtbar, dass (von unten nach oben) eine zunehmende Dichte der Umwindung realisierbar ist. Die erkennbare Unregelmässigkeit der Umwindeabstände in Figur 8 erklärt sich aus einer Unzulänglichkeit des Vorversuch-Aufbaus, die leicht zu beheben ist.



Fig. 8 PFD-Stränge aus Vorversuchen

Die schwarz sichtbare Fixierung der Umwindung wurde mit einem wenig ausgasenden Hochtemperatur Silikon realisiert.

Bezüglich der Druckfestigkeit der PFD sind bisher noch keine Aussagen erarbeitet worden.

5.4 Weiteres Vorgehen

Für die weiteren Versuche mit PFD werden wir im Verlauf dieses Projekts nach dem Bau der verbesserten Umwinde-Vorrichtung PFD-Muster mit verschiedenen Umwindungen herstellen.

Die so hergestellten Muster werden in der in Abschnitt 4-4 besprochenen Versuchsreihe mit untersucht werden.

6. Randverbund

Der Randverbund, d.h. der Abschluss zwischen den Grenzwänden einer VSI am Rand, hat vor allem die Aufgabe eine gasdichte Verbindung herzustellen, welche - mindestens während der vorgesehenen Lebensdauer der VSI - einen Unterdruck von höchstens 10^4 mbar sicherstellt.

Eine zweite, sehr wichtige Forderung ist die Realisierung einer möglichst geringen Wärmeleitung über den Rand.

Eine zusätzliche - untergeordnete - Anforderung ist der Wunsch, dass der Randverbund einen Teil der auf eine VSI wirkenden Druckkräfte übernehmen kann.

6.1 Aufbau Prinzipien

Figur 9 zeigt Prinzipskizzen von, die obigen Anforderungen erfüllenden Randverbunden.

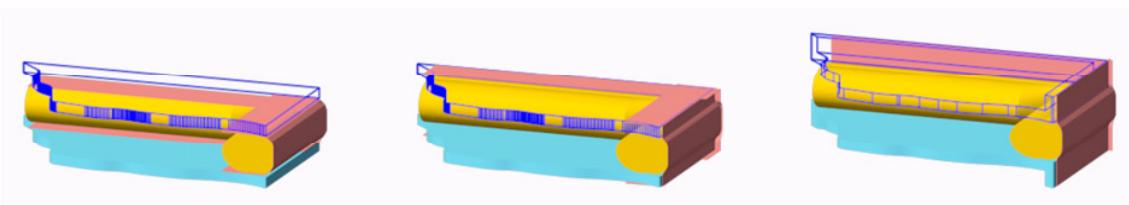


Fig. 9a

Fig. 9b

Fig. 9c

Bei allen 3 skizzierten Randverbunden wird die Gasdichtigkeit des Randes mittels eines dünnen gasdichten Randbandes (rot skizziert) sichergestellt. Ein beispielsweise nach dem Parallel-Filament Prinzip aufgebauter (gelb skizziert) Randdistanzhalter kann den am Rand herrschenden Druck zwischen den beiden Grenzwänden (blau) aufnehmen und stellt sicher, dass das dünne Randband sich unter Luftdruck anlegen kann und nicht zerrissen wird.

Weil auf diese Art nicht nur die Gasdichtigkeit sondern auch eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit über den Rand sichergestellt werden kann, gehen wir im Folgenden immer von einem entsprechenden Aufbau des Randverbundes aus.

Die 3 gezeigten Varianten unterscheiden sich lediglich in der Art, wie das gasdichte Randband von Grenzwand zu Grenzwand geführt ist.

In Figur 9a verläuft das Randband um den Randdistanzhalter herum auf die dem Vakuum zugewendete, innere Seite der beiden Grenzwände und ist dort gasdicht mit denselben verbunden. Kurze Vorversuche haben aber gezeigt, dass ein solcher Aufbau verbindungstechnisch sehr schwer zu realisieren ist.

Figur 9b skizziert ein Randband, welches um den Randdistanzhalter herum quasi U-förmig von Außenseite zu Außenseite der beiden Grenzwände verläuft. Diese Variante ist sowohl fertigungstechnisch als auch verbindungstechnisch relativ einfach realisierbar und wird deshalb im Verlauf dieser Arbeit weiter verfolgt.

Figur 9c skizziert eine Lösung bei welcher die Problematik des "um die Ecke führen" des Randbandes deutlich entschärft ist, was aber auf Kosten der Einfachheit der Grenzwände und der Gesamtdicke der VSI geschieht. Diese sind in diesem Falle nämlich wattenförmig ausgeführt, so dass ein hoher Rand entsteht, entlang welchem das Randband quasi flach um die gesamte VSI herumgeführt werden kann. Des relativ hohen Fertigungsaufwandes wegen, gehen wir diese Variante im laufenden Projekt nicht an.

1.1 Randdistanzhalter

Der Randdistanzhalter hat allenfalls die Aufgabe den am Rand herrschenden Druck zwischen den beiden Grenzwänden aufnehmen. Vor allem hat er aber sicherzustellen, dass das Randband sich unter Luftdruck anlegen kann und nicht zerrissen wird.

Dabei ist es von äusserster Wichtigkeit, dass er in Richtung Grenzwand zu Grenzwand einen möglichst geringen Wärmefluss zulässt.

Aus diesem Grunde ist es naheliegend, den Randdistanzhalter prinzipiell gleich aufzubauen, wie die punktuellen Distanzhalter im Innern der VSI.

Von Vorteil ist hier die Tatsache, dass die durch Luftdruck auf den Randdistanzhalter ausgeübten Querkräfte durch entsprechende Positionierung der punktuellen Distanzhalter so niedrig wie gewünscht gehalten werden können.

Dies ermöglicht es einen in Querrichtung relativ weichen Randdistanzhalter nach dem Ballprinzip, also einen Strang bestehend aus einem mit pyrogener Kieselsäure gefüllten Glasflechtschlauch, einzusetzen.

Es ist aber auch möglich einen Randdistanzhalter nach dem Parallel-Filament Prinzip zu verwenden, dessen Kern nur mit wenigen Windungen eines Gasfilament-Garnes umwunden ist und damit eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit in der gewünschten Richtung aufweist.

In beiden Fällen sollte der von den Grenzwänden ausgeübte Quer-Druck auf den Randdistanzhalter aber gross genug sein, dass dieser unter dem vom Randband ausgeübten Druck nicht verschoben wird. Damit kann die Notwendigkeit einer - beispielsweise durch Verklebung erreichten - zusätzlichen Fixierung des Randdistanzhalters vermieden werden.

1.2 Randband

Als Randbänder kommen wegen der geforderten hohen Gasdichtigkeit nur Metallbänder in Frage. Da zudem die Forderung einer geringen Wärmeleitung über das Randband erfüllt werden muss, scheiden Aluminiumbänder aus.

Es bleibt lediglich der Einsatz von Edelstahlbändern.

Bänder aus austenitischem Stahl (z.B. 1.4301) sind am Markt bis hinunter zur Stärke von 5 µm erhältlich. Da dieser Stahl eine Wärmeleitfähigkeit von lediglich 15 W/mK aufweist, ist er als Randband sehr gut geeignet und ist auf jeden Fall erste Wahl, wenn es um die Verbindung zweier Grenzwände aus Stahl geht.

Etwas problematischer ist es, zwei Grenzwände aus Glas zu verbinden, weil die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Floatglas (ca. $8.5 \cdot 10^{-6}$ m/mK) und austenitischen Stahl (ca. $17 \cdot 10^{-6}$ m/mK) sehr unterschiedlich sind und deshalb die Verbindung zwischen Glas und Stahlband stark belastet werden kann.

Zwei Möglichkeiten zur Lösung dieser Problematik bieten sich an.

Erstens kann ein Stahlband aus einem Stahl mit geringer thermischer Ausdehnung verwendet werden. Damit wird eine Verbindung unter Verwendung eines spröden Verbindungsmaterials, also beispielsweise mit Glaslot möglich. Eine geringe thermische Ausdehnung weisen sowohl "normaler" Kohlenstoff-Stahl als auch ferritischer Stahl (ca. $10.5 \cdot 10^{-6}$ m/mK) aus, wobei C-Stahl für das Randband seiner höheren Gasdurchlässigkeit und seiner wesentlich höheren Wärmeleitfähigkeit (> 45 W/mK) wegen wegfällt. Ferritische Stahlbänder sind standardmäßig bis hinunter zu einer Stärke von 25 µm erhältlich und weisen eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 21 W/mK auf. Damit ist ein ferritisches Randband offensichtlich etwas schlechter als ein austenitisches aber als Kompromiss immer noch brauchbar.

Die zweite Möglichkeit zum Umgang mit dem thermischen Ausdehnungsproblem ist die Verwendung eines elastischen Verbindungsmaterials, welches die Längenunterschiede auszugleichen vermag. Dies würde dann auch die Verbindung von austenitischen Stahl mit Glas erlauben. Auf Ansätze in dieser Richtung gehen wir im folgenden Abschnitt ausführlich ein.

1.3 Verbindung Randband - Grenzwände

Für die vakuumdichte Verbindung des sehr dünnen ($\leq 25 \mu\text{m}$) Stahl-Randbandes mit den Grenzwänden (Stahl oder Glas) erscheint beim Studium der einschlägigen Literatur einzig das Verfahren Löten in der Form von Hartlöten, Hochtemperatur-Weichlöten oder Glaslöten als praktizierte Möglichkeit.

Um ein Verziehen der Grenzwände zu vermeiden muss dabei fast zwingend ein Löt-Verfahren zum Einsatz kommen, bei dem die notwendigen hohen Temperaturen zum Erschmelzen des Lots nur kurzzeitig lokal auftreten und die Grenzwand als Ganzes im Wesentlichen kühl bleibt.

Die Variante der Verbindung des Stahlbandes mit einer Glas-Grenzwand mittels Glaslot ist - nach unserem Stand der Erkenntnis - nicht erprobt. Nach Aussage von Glaslot-Experten besteht hierfür sicherlich nur dann eine Erfolgschance, wenn - wie oben diskutiert - ferritischer Stahl für das Randband zum Einsatz kommt.

Entsprechende Versuche, bei welchen die Glaslot-Verbindung auch zyklisch hohen Temperaturschwankungen unterworfen werden soll, sind im weiteren Verlauf dieses Projektes geplant. Die entsprechenden Materialien sind - mit sehr grossem Beschaffungsaufwand für ein $25 \mu\text{m}$ 1.4016 Stahlband - seit einigen Tagen vorhanden. Die Lösungen werden von einem Spezialisten für Glaslotungen (Glaslot Hersteller) in den nächsten Wochen für uns durchgeführt und danach in unseren Labors untersucht werden.

Ein anderes Verfahren zum Löten eines Stahlbandes auf Glas hat sich im Erfahrungsbereich unseres Teams bereits Ende der 1990-iger Jahre bewährt. Hierzu wurde im Vakuum eine transiente Metallschicht (unten gut auf Glas haftend und oben gut lötbar) ca. 5 mm breit am Rand der Glaswand aufgesputtert und dann das Stahlband mit einem hochschmelzenden Weichlot darauf verlötet. Die so entstehenden Verbindungen waren an $1 \times 1 \text{ m}$ grossen Vakuumplatten langzeitig vakuumdicht. Es ist offensichtlich, dass ein solches Verfahren nur bei sehr grossen Stückzahlen wirtschaftlich einsetzbar ist. Aus diesem Grund betrachten wir dieses Verfahren zur Verbindung des Stahlbands mit Glas nur als sichere Rückzugs-Möglichkeit.

Da wir daran interessiert sind, die Vakuumspalt-Isolation (VSI) auf breitem Feld, d.h. nicht nur für Massenproduktion sondern auch für mittlere oder gar kleine Stückzahlen, wirtschaftlich umzusetzen, haben wir uns entschlossen im Rahmen des laufenden Projekts eine relativ breite Suche nach allfälligen alternativen Verbindungsverfahren durchzuführen und entsprechende Versuchsreihen durchzuführen.

Wir gehen dabei von der Annahme aus, dass auch - mit in der Vakuumtechnik nicht üblichen - Verbindungsverfahren wie beispielsweise Kleben, eine Chance zur Erzeugung einer vakuumdichten Verbindung besteht. Wir setzen dabei voraus, dass ein breiter und sehr dünner Verbindungsspalt erzeugt wird, der homogen mit dem Verbindungsmaterial gefüllt ist, womit Diffusion durch diesen Spalt minimiert ist.

Figur 10 zeigt das von uns hierfür bearbeitet Feld.

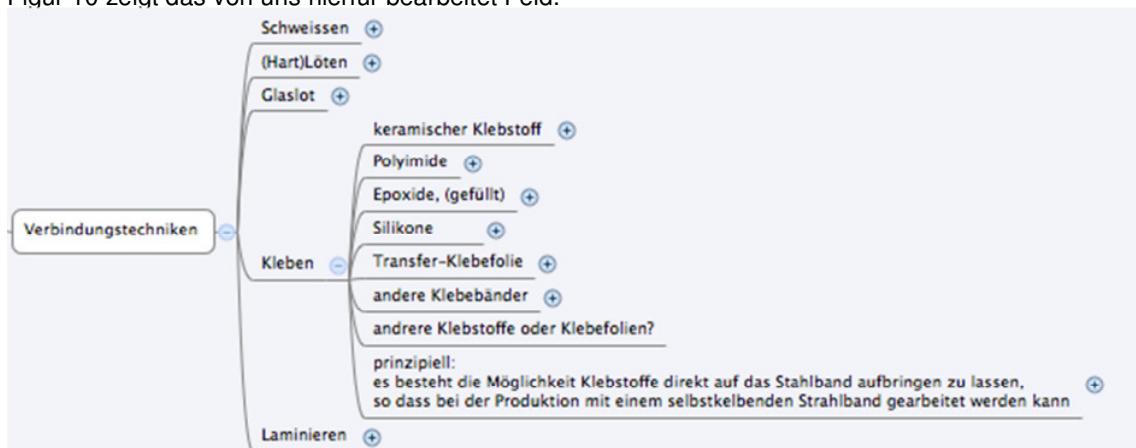


Fig. 10 mögliche Verbindungsverfahren Randband-Grenzwand

Zunächst sind Abklärungen im Gange, ob im Falle der Kombination Stahlband-Stahlwand - entgegen unserer bisherigen Erfahrung - nicht doch ein Schweißverfahren existiert, mit dem ein 10 bis 20 μm dünnes Stahlband verschweisst werden kann. Bisher ist uns, als in diesem Sinne bestes Schweißverfahren, das Laserschweißen bekannt, das aber - in früheren Versuchen erhärtet - Stahlbänder von mindestens 50 μm Stärke benötigt.

Momentan gehen wir aber Hinweisen nach, welche aussagen, dass mit bestimmten Reibschweiß-Verfahren dünne Metallfolien (z.B. 4 μm dünne Aluminiumfolien) in industriellen Prozessen miteinander oder mit dicken Platten verschweisst werden.

Ein breites Feld öffnet sich, wenn man die Verwendung von Klebstoffen ins Auge fasst.

Eine unabdingbare Voraussetzung, welche ein allenfalls in Frage kommender Klebstoff erfüllen muss, ist eine Temperaturstabilität, die es erlaubt den Klebstoff einmalig kurzzeitig (d.h. 2 bis 3 Stunden lang) einer Temperatur von mindestens 200°C besser aber 300°C auszusetzen.

Diese Anforderung ist wegen des bake-outs der VSI während der Evakuierung notwendig, ohne welches die langzeitige Lebensdauer eines Vakuums $\leq 10^{-4}$ mbar nicht sichergestellt werden kann.

Obwohl dies die Auswahl in Frage kommender Klebstoffe drastisch einschränkt, haben wir - mit sehr grossem Zeitaufwand - die in Figur 10 erkennbare Reihe von in Frage kommenden Klebstoffen identifiziert und entsprechende Muster beschafft. Im Verlauf der nächsten Wochen werden wir mit denselben ausführliche, im nächsten Abschnitt näher besprochene Versuche durchführen.

1.3.1 Versuche zur Verklebung Randband - Grenzwände

Figur 11 zeigt die Skizze eines momentan im Bau befindlichen, sehr pragmatisch einfachen Aufbaus mit welchem wir eine erste Aussage zur Gasdichtigkeit einer Klebeverbindung von Stahlband auf Stahl oder Glas erarbeiten wollen.

Auf einen - mit einem Durchgangsloch versehenen - Standard CF-63 Vakuum-Blindflansch aus austenitischem Stahl (1.4301) wird ein 50x50 mm grosses Stahlband aus demselben Stahl mit einem ringsum 10 mm breiten und ca. 50 μm dicken Klebespalt aufgeklebt. Dabei werden natürlich die für eine optimale Aushärtung des Klebstoffes notwendigen Temperaturverläufe eingehalten. Pro zu untersuchendem Klebstoff wird ein derart bestückter Blindflansch gefertigt.

Der grosse Blindflansch wird auf ein (CF-63 zu CF-16) Reduzierstück aufgeschraubt, welches den Anschluss an das bei uns vorhandene Vakuum-Equipment erlaubt.

Danach wird ausgeheizt (bake-out) und abgepumpt, wobei der Verlauf des Drucks bis zum sich einstellenden Beharrungsdruck aufgezeichnet wird. Danach wird das Ventil geschlossen und der nun mehr oder weniger schnell verlaufende Druckanstieg gemessen.

Als Vergleichsbasis wird zunächst derselbe Messablauf mit einem geschlossenen Blindflansch ohne Durchgangsloch durchgeführt.

Der Vergleich der so aufgenommenen Kurven sollte eine erste qualitative Aussage ermöglichen, ob es sich lohnt einer bestimmten Klebeverbindung weiter nachzugehen.

Wenn sich - wie wir annehmen - bei dieser qualitativen Untersuchung herausstellt, dass der zeitliche Verlauf eines Versuchsstückes mit Verklebung nicht wesentlich von dem mit geschlossenem Blindflansch abweicht, wird diese Verklebung zu einer Gruppe von genauer zu untersuchenden Mustern eingereiht.

Ein entsprechender Aufbau und entsprechende erste Messungen sind auch für die Verklebung von dünnem Stahl auf Floatglas im Bau und geplant.

Mit den Mustern, die sich allfällig in dieser pragmatischen Testreihe als vielversprechend erweisen, sind weitere, jeweils aufwändigeren Versuchsschritte mit jeweils genaueren Aussagen bezüglich der langzeitigen Vakuumtauglichkeit der Klebeverbindungen soweit geplant, dass ein Teil dieser Versuche - wenn es sich lohnt - noch im Rahmen der laufenden Arbeit durchgeführt werden kann.

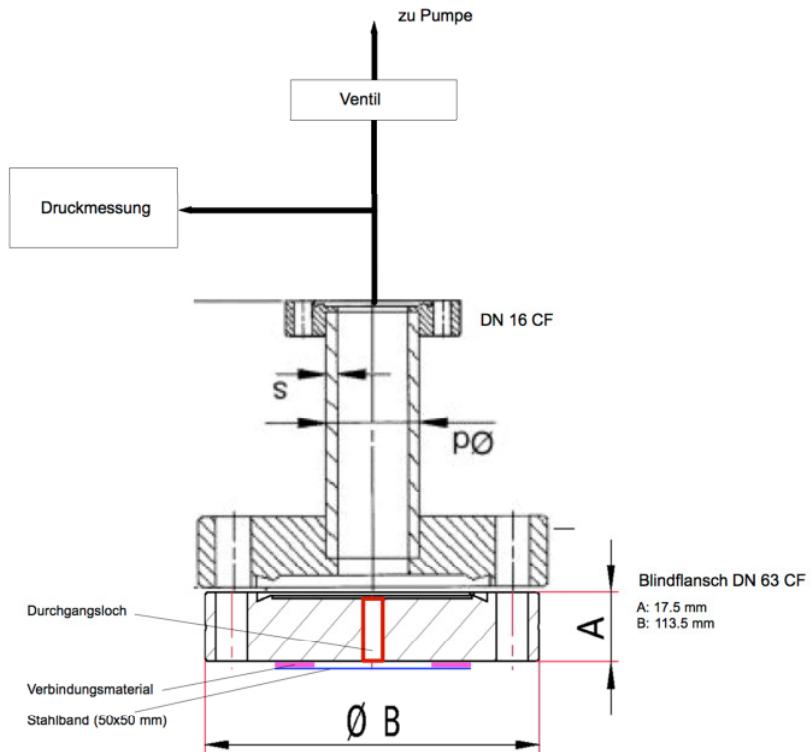


Fig. 11 Skizze des Messaufbaus zur Abschätzung der Gasdichtigkeit von Klebeverbindungen

2. Fixierung Distanzhalter an Grenzwände

Die in Abschnitt 4 und 5 besprochenen punktuellen Distanzhalter müssen beim Bau einer VSI zumindest an einer der beiden Grenzwände so fixiert werden, dass sie eine definierte Lage solange einhalten, bis die zweite Grenzwand sie unter Luftdruck definitiv fixiert.

Im Falle von Parallel-Filament Distanzhaltern (PFD) ist dies kein Problem. Figur 12a zeigt einen PFD der mittels einer Diamanttrennscheibe von einem der in Figur 8 dargestellten Stränge abgetrennt und vorgepresst wurde. Der ca. 12 mm lange PFD nimmt durch das Vorpressen dauerhaft einen Querschnitt an, der auf zwei Seiten eine kleine Ebene besitzt. Auf einer dieser Ebenen kann er in der gewünschten definierten Lage auf einer Grenzwand abgesetzt und - beispielsweise unter Verwendung eines sehr schnell aushärtenden kleinen Tropfens Silikonklebstoff - fixiert werden.

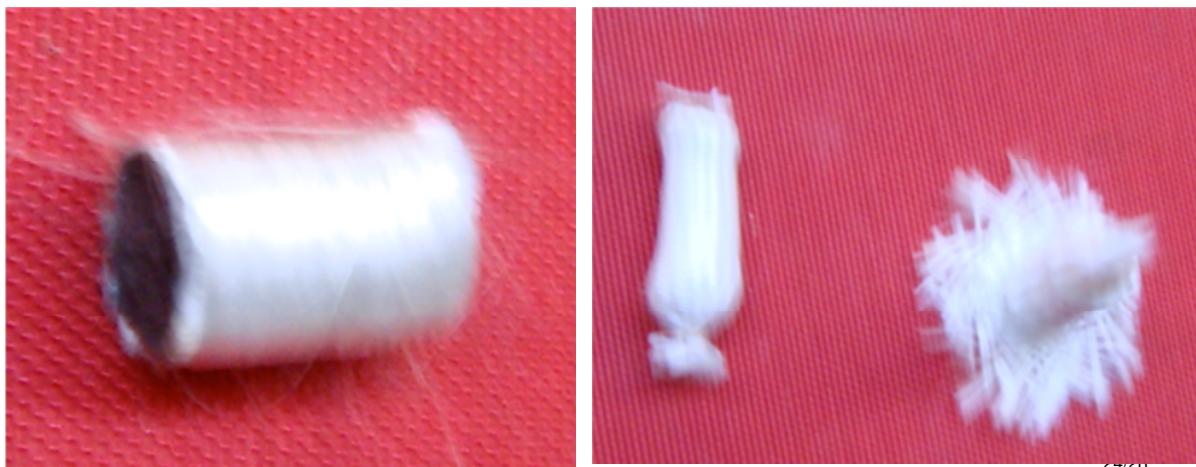


Fig. 12a Parallel-Filament Distanzhalter

Fig. 12b Ball-Distanzhalter

Deutlich schwieriger ist die Situation bei Verwendung von Ball-Distanzhaltern (BD). Wenn BD - nach dem Prinzip der Herstellung von Würsten - mit kurz abgeschnittenen "Wurst-Zipfeln" gefertigt werden (siehe Figur 12b, links) ist es fast unmöglich sie, auf einem dieser Zipfel stehend, in definierter Lage zu fixieren. Aber genau dies muss sein, weil die BD nur in ihrer - von Zipfel zu Zipfel verlaufenden - Längsrichtung belastet werden dürfen.

Wir haben eine zeitaufwändigen Versuchsreihe durchgeführt, bei welcher wir unterschiedliche Methoden und Hilfsmittel zur Herstellung des Zipfels untersucht haben, wobei jeweils versucht wurde das Hilfsmittel so zu gestalten dass es eine Standfläche bildet. Wir haben einige Hilfsmittel im Sinne von Bogenfedern und dergleichen gefunden, welche - bei entsprechender Modifikation - in der Lage wären dies zu gewährleisten. Es ist jedoch offensichtlich, dass ein solches Hilfsmittel auch in grossen Serien gefertigt die Herstellkosten eines BD zu hoch werden lässt.

Nach längerem Experimentieren ist es uns gelungen ein Herstellverfahren für BD zu definieren - und in Vorversuchen zu erproben - mit welchem aus dem, die Hülle des BD bildenden Glasflechtschlauch reproduzierbar eine tellerartige Auflagefläche geformt werden kann (siehe Figur 12b, rechts) auf welcher der BD lagegenau abgestellt und fixiert werden kann.

Eine einfache derartige Anlage, mit welcher wir die einigen 100 BD für die weiteren Versuche im Rahmen dieses Projekts kontrolliert herstellen können, befindet sich momentan im Bau.

3. Strahlungsminderung

Der Wärmestrahlung ist beim Aufbau einer Vakuumspalt-Isolation (VSI) grösste Aufmerksamkeit zu widmen. Als Richtgrösse kann festgehalten werden, dass ein äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmestrahlung zwischen zwei Grenzwänden aus kaltgewalztem, "glänzenden" austenitischen Edelstahl - bei Temperaturen bis ca. 100°C - etwa $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ beträgt. Damit können offensichtlich alle in Tabelle 2 aufgeführten Sollwerte für den Wärmedurchgangskoeffizient (bei weitem) nicht eingehalten werden.

Wird eine einzige, thermisch von den Wänden entkoppelte, Aluminiumfolie in den Spalt eingebracht, oder werden beide Wände mit Aluminiumfolie beschichtet, reduziert sich der äquivalente Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmestrahlung auf ca. $0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit können die in Tabelle 2 für durchschnittliche Ansprüche angegebenen Sollwerte eingehalten werden.

Um die höheren Sollwert-Ansprüche der Tabelle 2 zu erfüllen, sind 3 bis 5 thermisch entkoppelte Aluminiumfolien im Spalt unterzubringen.

3.1 Aufbau Prinzipien

Die Schwierigkeit bei der Realisierung der Strahlungsminderung liegt in der Notwendigkeit, die Aluminiumfolien von der Grenzwand und untereinander thermisch so weit wie möglich zu entkoppeln, d.h. die Festkörper-Wärmeleitung durch die Verbindungselemente zwischen den Folien zu minimieren.

Einen Ansatz, bei welchem eine Folie im Vakuumspalt mittels einigen wenigen "dünnen" Spiralfedern aus Edelstahl in Position gehalten wird, haben wir erfolgreich im Funktionsmuster eines Boilers (3) umgesetzt.

Dieser Ansatz benötigt aber Aluminiumfolien mit einer relativ hohen Eigensteifigkeit, die sich nur bei einer Folienstärke von über 0.2 mm einstellt. Dies bedeutet dass die Aluminiumfolien viel zu teuer werden.

Aus Preisgründen stellen wir die Forderung nach dem Einsatz von Aluminiumfolien mit einer Stärke $\leq 0.01 \text{ mm}$ und sind daher mit quasi biegeschlaffen Folien konfrontiert.

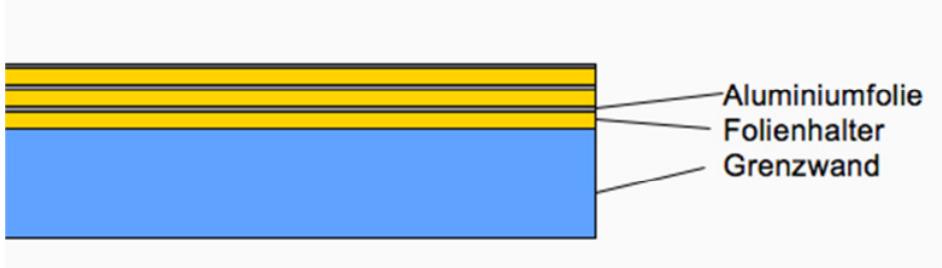


Fig. 13 Prinzipskizze eines Aufbaus zur Strahlungsminderung

Dies bedeutet, dass Folienhalter, welche die Aluminiumfolie gemäss Figur 13 ganzflächig abstützen, zum Einsatz kommen müssen.

3.2 Folienhalter

Der ganzflächige Folienhalter muss - im Vakuum - nicht nur eine extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen, sondern er muss den hohen Temperaturen beim bake-out der VSI standhalten und darf nicht ausgasen.

Naheliegend für diesen Zweck wäre eigentlich die Verwendung von pyrogener Kieselsäure oder von entsprechenden, als Kern von VIP eingesetzten Materialien. Aber da ist der für diesen Zweck viel zu hohe Preis derselben.

Wir haben deshalb mit viel Zeitaufwand mit unterschiedlichsten Ansätzen experimentiert. Als Resultat haben wir - im Sinne einer momentan besten Lösung - ca. 50 m² eines flächigen Gebildes (Figur 14) für unsere Versuche fertigen lassen, das - prima Vista - die obigen Bedingungen erfüllt. Das ca. 2 mm starke Gebilde ist mit textilen Methoden aus Glasfilament-Garnen hergestellt und vermag Temperaturen bis deutlich über 400°C zu widerstehen.

3.3 thermisches Verhalten

Bezüglich des thermischen Verhaltens eines Folienhalters gemäss Figur 14 liegen noch keine wirklich aussagekräftigen Ergebnisse vor. Diese werden im weiteren Verlauf des Projekts erarbeitet werden.

Eine erste sehr grob qualitative Messung hat ergeben, dass die Wärmeleitfähigkeit [W/mK] unseres textilen Folienhalters an Luft deutlich geringer zu sein scheint als diejenige einer EPS-Dämmplatte. Da wir - der dann wegfällenden Wärmeleitung der Luft wegen - erwarten dürfen, dass die Wärmeleitfähigkeit des textilen Folienhalts im Vakuum noch deutlich tiefer ist, ist dies zumindest ermutigend.

4. Gettern

Mit grösster Wahrscheinlichkeit muss zur langzeitigen Erhaltung eines Vakuums $\leq 10^{-4}$ mbar ein, die in den Vakuumspalt eindringen, Gase bindender Getter eingesetzt werden.

Derartige Getter sind auf dem Weltmarkt ohne Probleme zu erhalten, womit sich für uns nur noch die Frage nach der notwendigen Menge und den daraus resultierenden Kosten stellt.

Geht man von einer - erfahrungsgemäss problemlos realisierbaren - konstanten Leck- bzw. Ausgasrate von 10^{-10} mbar*L / (sec*cm²) aus, berechnet sich eine, pro m² VSI, notwendige Menge von weniger als 10 Gramm eines marktüblichen Getters, um das gewünschte Vakuum über Jahrzehnte sicherzustellen. Andere, weniger grobe Berechnungsmethoden, welche von einer Abnahme der Ausgasrate über die Jahre ausgehen, führen zu deutlich kleineren notwendigen Gettermengen.

Da die Weltmarktpreise eines entsprechenden Getters deutlich unterhalb 1 \$/Gramm liegen, darf davon ausgegangen werden, dass der Einsatz eines Getters kein Hindernis zur Realisierung kostengünstiger VSI darstellt.

5. Test VSI-Panel

Hauptsächliche Zielsetzung dieses Projektes ist, den Nachweis der Tauglichkeit der weiter oben diskutierten Bauelemente Distanzhalter und Strahlungsminderung zu erbringen.

Ein weiterführendes Wunschziel, das aber vermutlich den zeitlichen Rahmen dieses Projektes sprengt, ist der Nachweis eines dauerhaft dichten, kostengünstigen Randverbundes.

Beide Zielsetzungen sind mit relativ einfachen Hilfsmitteln erreichbar, wenn unterschiedliche VSI Testpanels mit unterschiedlichen Bauelementen erstellt und jeweils auf Belastbarkeit sowie Wärmeleitfähigkeit mit einem Referenzpanel mit bekannten Eigenschaften verglichen werden.

Für den Nachweis der Tauglichkeit der Distanzhalter und der Strahlungsminderung spielt es dabei keine Rolle, ob die erstellten Test-VSI dauerhaft gasdicht sind. Voraussetzung hierfür ist lediglich, dass bei dauerndem Pumpen ein Unterdruck von $\leq 10^{-5}$ mbar aufrechterhalten werden kann.

Für den Nachweis eines dauerhaft dichten, kostengünstigen Randverbundes müssen mit verschlossenen Test-Panels Langzeitversuche gefahren werden.

Die hierfür notwendigen beispielsweise 1x1 m grossen VSI-Test-Panels sind konzipiert und die notwendigen Materialien sowie die Referenzpanels sind zum grossen Teil beschafft.

Zusätzlich ist ein entsprechender Aufbau zur Durchführung der thermischen Vergleichsmessungen konzipiert.

Bewertung 2010 und Ausblick 2011

Gegenüber dem Projektantrag wurden zusätzlich die Punkte Anwendungsbereiche VSI, Stand der Technik und Potenziale durch VSI, Lastenheft VSI, System-Überlegungen VSI für grosse Volumina, Grenzwände des Vakuums sowie Getter mit teilweise sehr grossem Zeitaufwand bearbeitet. Damit wurden für den Bau von VSI wesentliche Erkenntnisse gewonnen.

Bezüglich der Tauglichkeit der gewählten Ansätze für Distanzhalter und den Randverbund konnten neue Herstellvorrichtung für diese Elemente konzipiert und vorerprobt werden, die notwendigen Materialien wurden beschafft und die entsprechenden Testaufbauten befinden sich im Aufbau. Die eigentlichen Messungen werden im Verlauf von Dezember 2012 und Januar 2013 erfolgen.

Bezüglich kostengünstiger Randaufbauten wurde vor allem eine Anzahl von vielversprechenden Verbindungsmöglichkeiten eines dünnen Stahlbandes an Grenzwände aus Stahl oder Glas aufgefunden. In weiteren Schritten werden diese Verbindungsmöglichkeiten auf ihre Tauglichkeit getestet werden.

Bezüglich eines Aufbaus zur Strahlungsminderung scheint mit dem Auffinden eines ganzflächigen, sehr wenig Wärme leitenden textilen Halters für die Aluminiumfolien ein entscheidender Schritt zur preisgünstigen Umsetzung gelungen zu sein.

In den nächsten Schritten sollen die geplanten Testpanels und Versuchsaufbauten gebaut und in Betrieb genommen werden.

Danach werden bis Projektende die Messungen zur Verifizierung der Tauglichkeit der verschiedenen Bauelemente durchgeführt werden.

Referenzen

- (1) "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte, Technologieabklärungen für Vakuumpanels" (BFE Projekt Nr. SI/500552-03)
- (2) "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte, Kaffeemaschine" (BFE Projekt Nr. SI/500552-01)
- (3) "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte, Zylindrische Anwendungen" (BFE Projekt Nr. SI/500552-02)
- (4) 15. Schweizerisches Status-Seminar «Energie- und Umweltforschung im Bauwesen», Eine umfassende Lebensdaueranalyse für Vakuumisolationsverglasung, Matthias M. Koebel, Heinrich Manz, Abteilung Bautechnologien, Empa, Dübendorf