



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht, 20. September 2013

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.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Abstract	4
Résumé	4
Definition Vakuumpalt-Isolation	5
Projektziele	5
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	7
1. Vorabklärungen	7
1.1 Anwendungsbereiche von Vakuumpalt-Isolation (VSI) im Umfeld Wohnen	7
1.1.1 Thermoblock Kaffeemaschine	7
1.1.2 Backofen	7
1.1.3 Kühlschrank	8
1.1.4 Boiler	8
1.1.5 Saisonaler Wärmespeicher	8
1.1.6 Gebäudehülle	9
1.1.7 Sonnenkollektoren	9
1.1.8 Leitungsrohre	9
1.1.9 Gehäuse Klimaanlage usw.	9
1.2 Stand der Technik und Potenziale durch VSI	10
1.3 Lastenheft VSI	11
2. System-Überlegungen VSI für grosse Volumina	11
2.1 Überlappungsprinzip	11
2.2 Modularität	13
3. Grenzwände des Vakuums	14
4. Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip	17
4.1 Aufbau	17
4.1.1 Füllmaterial	17
4.1.2 Hüllmaterial	17
4.2 Herstellvorrichtung	18
4.3 Messungen	19
4.3.1 Druckfestigkeit der Ball-Distanzhalter (BD)	19
4.3.2 Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Ball-Distanzhalter im Vakuum	20
4.4 Zusammenfassung der Resultate	22
5. Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip	23
5.1 Aufbau	23
5.2 Vorrichtung für Herstellung kleiner Mengen	23
5.3 Messungen	25
5.3.1 Druckfestigkeit der Parallel-Filament Distanzhalter (PFD)	25
5.3.2 Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Parallel-Filament Distanzhalter im Vakuum	25
5.4 Zusammenfassung der Resultate	26
6. Randverbund	27
6.1 Aufbau Prinzipien	27
6.2 Randedistanzhalter	28
6.3 Randband	28
6.4 Verbindung Randband - Grenzwände	29
6.4.1 Ansätze für gasdichte Verbindungen Randband-Grenzwand	29
6.4.2 Versuche zur Verklebung Randband - Grenzwände	31
7. Fixierung Distanzhalter an Grenzwände	37
8. Strahlungsminderung	38
8.1 Aufbau Prinzipien	38

8.2	Folienhalter	39
8.3	thermisches Verhalten	39
9.	Gettern	40
10.	Test des Zusammenwirkens aller Bauelemente: VSI-Testpanel	40
10.1	VSI-Testpanel Aufbau	40
10.2	Messaufbau	42
10.2.1	Messung der Temperaturverteilung	42
10.2.2	Mechanische Stabilität	46
	Bewertung und Ausblick	47
	Referenzen	48

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden zunächst die Punkte Anwendungsbereiche von Vakuumpalt-Isolation (VSI), Stand der Technik und Potenziale durch VSI, Lastenheft VSI, System-Überlegungen VSI für grosse Volumina, Grenzwände des Vakuums sowie Getter bearbeitet. Für den Bau von VSI wurden dadurch wesentliche Erkenntnisse gewonnen. Weiter konnten Herstellvorrichtung für Distanzhalter konzipiert und gebaut werden. Sowohl Ball-Distanzhalter (BD) als auch Parallel-Filament Distanzhalter (PFD) wurden bezüglich ihrer Druckfestigkeit und ihrer Wärmeleitfähigkeit im Vakuum messtechnisch geprüft, wobei sich BD als sehr gut geeignet erwiesen haben. Bezüglich thermisch guter, kostengünstiger Randaufbauten zeigt sich ein ca. 20 µm dickes Stahlband, mit einem weichen Strang aus parallel verlaufenden Glasfasern als Verstärkung, als sehr gut geeignet. Versuche zeigten, dass eine Verklebung von Randband und Grenzwall gasdicht möglich ist, wobei allerdings die "Eck-Problematik" noch nicht gelöst ist. Bezüglich der Strahlungsminderung scheint, mit einem ganzflächigen textilen Halter für die Aluminiumfolien, ein entscheidender Schritt zur preisgünstigen Umsetzung gelungen zu sein.

Abstract

In this work, the following issues of Vacuum Space Insulation (VSI) have been studied at first: application fields, state of the art, potentials, requirements' specifications, system considerations for large volumes, vacuum boundary walls, and getter effect. Essential findings for building a VSI have been thereby found out. Furthermore, a setup for spacers have been designed and constructed. Test measurements have been carried out to check the pressure resistance and thermal conductivity in vacuum for both ball spacers and parallel-filament ones. The ball spacers have been proven to be very suitable. A 20 µm-thick steel band with a soft string of parallel glass fibers for strengthening has been proven to be very appropriate for a thermally good and cost-efficient edge setup. Experiments have shown that it was possible to cement the edge band and the boundary wall gastight. The "corner issue" remains unsolved, though. Concerning the reduction of irradiation, it seems that a whole-surface textile holder for the aluminum foil was a key decision towards a successful cost-efficient implementation.

Résumé

Dans ce travail, différents points de l'isolation à fente sous vide ont été tout d'abord traités : les domaines d'application, l'état de l'art, les potentiels, le cahier de charge, l'analyse du système pour des grands volumes, les parois du vide ainsi que le piège à gaz. Ceci a permis de gagner d'importantes connaissances pour la construction de l'isolation. Par la suite, un dispositif pour les pièces d'écartement a été conçu et construit. La résistance à la pression et la conductivité thermique des pièces d'écartement à balle et à filaments parallèles ont pu être mesurées. Le principe à balle s'est avéré très adéquat. Une bande en acier de 20 µm de large, munie d'une gaine souple et renforcée avec des fibres de verre parallèles, s'est avérée très adéquate pour une structure de bord bon marché et thermiquement convenable. Des expériences ont montré que c'était possible de agglutiner la bande de bord et la paroi d'une façon étanche au gaz. Ceci étant, la « problématique des coins » reste encore à résoudre. Quant à la réduction de la radiation, il s'est avéré que le support en textile sur toute la surface des feuilles en aluminium est une bonne décision pour une réalisation à faible coût.

Definition Vakuumpalt-Isolation

Wir werden im Folgenden - und in zukünftigen Arbeiten - für alle Arten von Aufbauten, welche einen leeren evakuierten Raum zur thermischen Isolation verwenden, den Begriff "Vakuumpalt-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 des vom Bundesamt für Energie mitfinanzierten, vom Dezember 2010 bis Oktober 2011 durchgeführten Projekts "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte - Technologieabklärungen für Vakuumpaneln" (BFE Projekt Nr. SI/500552) (1) konnte bezüglich der, für ebene oder schwach gekrümmte Vakuumpalt-Isolationen (VSI) notwendigen, Distanzhalter folgende Zusammenfassung gemacht werden:

Es zeigt sich, dass Druck in Zug wandelnde Distanzhalter andersartigen Distanzhaltern 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 Vakuumpalt-Isolation (VSI) mit ebenen Wänden - wie Vakuumpaltpanels 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 Vakuumpalt eingebracht werden können.

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

Damit ergeben sich für das vorliegende Projekt folgende Zielsetzungen:

1. Vorabklärung der Anforderungen an Vakuumpalt-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 Vakuumpalts 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 Vakuumpalts.
8. Art des Getterns zur langzeitigen Sicherstellung des notwendigen Unterdrucks im Vakuumpalt.
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 Vakuumpalt-Isolation.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

1. Vorabklärungen

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

Um fundierte Anforderungen an VSI stellen zu können, ist es notwendig, 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 Isolationstiefe keinesfalls grösser als 10 mm sein kann.

Wir haben in Tabelle 1 auch dem nicht isolierten Thermoblock einen Wärmedurchgangskoeffizienten zugeordnet, der sich durch den Wärmeübergang vom Thermoblock durch den Luftraum des Gehäuseinneren 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 eine mögliche Isolationstiefe von ca. 25 bis maximal 30 mm.

Da die Isolation Temperaturen bis 400°C widerstehen muss, steht eine sehr begrenzte Auswahl von Materialien zur Verfügung. Wir sind in unseren Überlegungen davon ausgegangen, dass heute 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 Steinwolle) beträgt.

Ob eine Verkleinerung der thermischen Verluste mittels VSI angesichts der eher sporadischen und kurzen Einsatzdauer von Haushalts-Backöfen überhaupt Sinn macht, ist zu bezweifeln, steht an dieser Stelle aber nicht zur Diskussion.

1.1.3 Kühlschranks

Auch der Themenbereich Energieeinsparung durch verbesserte thermische Isolation bei Kühlschranks 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 - $0.14 \text{ W/m}^2\text{K}$ 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 Wärmeübergangskoeffizienten im Inneren des Kühlschranks mit berücksichtigt werden müssen.

Die in der Tabelle 1 für den U-Wert als VSI-Sollwert angegebenen $0.08 \text{ W/m}^2\text{K}$ 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 Nutzinhalt, womit die spezifische Leistung von 0.04 auf 0.015 W/Liter , also auf weniger als 40% des ursprünglichen Wertes sinkt.

1.1.4 Boiler

Der in Tabelle 1 für einen heutigen sehr guten Boiler angegebene U-Wert von $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ wurde aus dem Bereitschaftsstromverbrauch (0.66 kWh/24h) und der Gesamtoberfläche des besten im Frühjahr 2012 am Markt erhältlichen 80 Liter Boilers berechnet.

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 ist. Da weitere Verbesserungen möglich sind, scheint der angegebene Soll-U-Wert von $< 0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ 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.

1.1.5 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 beiträgt 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 im 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 mit VSI und gegen innen konventionell oder teilweise mit VSI gedämmt ist.

1.1.6 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.

1.1.7 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 ausnützen, um mit Vakuum-Flachkollektoren wesentlich weniger Kollektorfläche (= 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.

1.1.8 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 (liquified 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.

1.1.9 Gehäuse Klimaanlage 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 9 Anwendungen, sowie die U-Werte welche mit VSI (Vakuumspalt-Isolation) angestrebt werden müssen, damit entweder eine Halbierung der über die Isolation entweichenden Energie oder zumindest (Gebäudehülle) substantielle Raumgewinne resultieren.

Anwendung		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	
Boiler	sehr guter heute	0.40	Nutzraumgewinn bis 20% möglich
	VSI soll	< 0.10	
saisonalen 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 Klimaanlage 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 im Umfeld "Wohnen" 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 Kühl-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 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 und 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 Vakuumschichten halbiert, was dazu beiträgt, den Verlust über die Festkörper-Wärmeleitung am Rand zu minimieren.

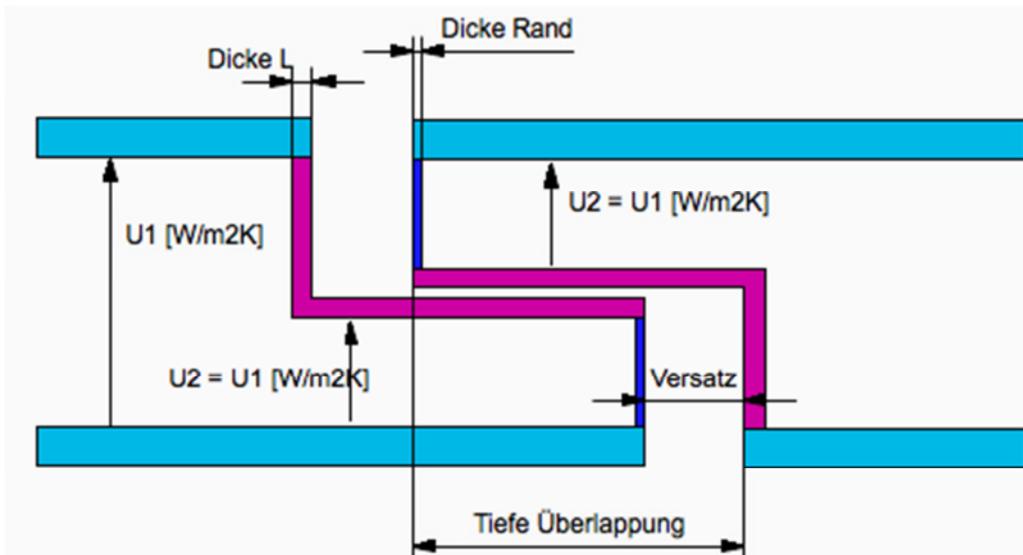


Fig. 1 Minimierte Randverluste durch Überlappung

Tabelle 3 zeigt die Resultate von mit FEM abgeschätzten Wärmedurchgangskoeffizienten U_{tot} von aneinanderschließenden 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.

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 aneinanderschließenden VSI-Panels mit verschiedenartigen Randaufbauten

Der Abstand zwischen den aneinanderschließenden 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 L-hor | L-vert 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.

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-förmige Randbereich aus Stahl der Stärke 0.1 mm um 50 mm gegeneinander versetzt werden, bleibt eine substantielle 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.

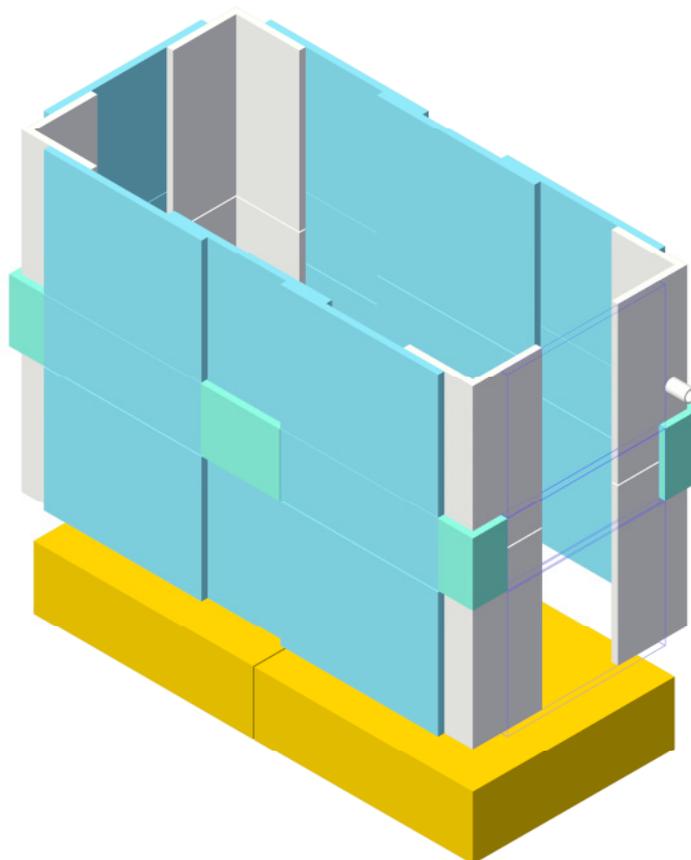


Fig. 2 Prinzipskizze modularer VSI-Aufbau

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 verfolgten Lösungsansätze.

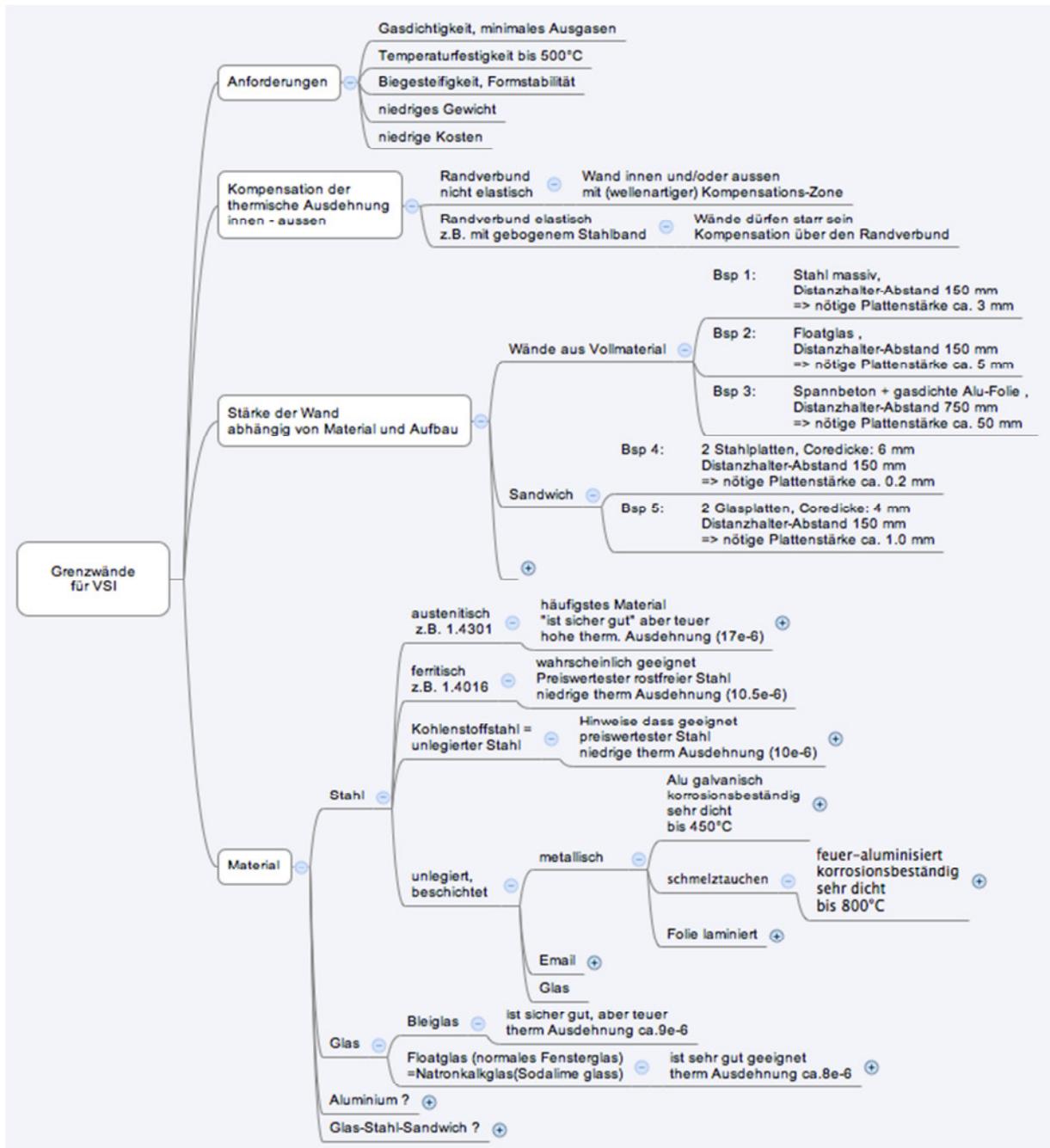


Fig. 3 Anforderungen an VSI-Grenzwände und Lösungsansätze

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 niedrigst 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.

Eine weitere sehr vielversprechende Möglichkeit ist die Verwendung von C-Stählen mit einer nur wenige Mikrometer starken Beschichtung aus Aluminium. Von den beiden Möglichkeiten eine solche Beschichtung herzustellen, dem Galvanisieren und dem Schmelztauchen, erscheint die zweite Möglichkeit aus Gründen des günstigen Leistungs- / Kosten-Verhältnisses besonders vielversprechend. Bei diesen, auch feueraluminisiert genannten Stählen, bildet das Aluminium eine sehr dichte, korrosionsbeständige Schicht, welche bei einigen dieser Stahlsorten einer Dauertemperatur von bis zu 800°C standhält. Preislich liegen diese Stähle zwar deutlich oberhalb von reinen C-Stählen, sind aber nur beispielsweise ca. halb so teuer wie ferritische Stähle. Da sie auf C-Stählen basieren, weisen auch sie niedrige thermische Ausdehnungskoeffizienten auf und sind deshalb gut zur Kombination mit Glas geeignet.

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 Natronkalkgläser (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 austenit. (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, aluminisiert	1600.00	7.8	13.00	18.00
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 (2013)

In der letzten Spalte von Tabelle 4 sind die aus den Materialpreisen der Spalte 1 resultierenden Schätzwerte 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 teurem 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. Hierzu könnten feederaluminisierte Stähle der Ansatz der Wahl sein.

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

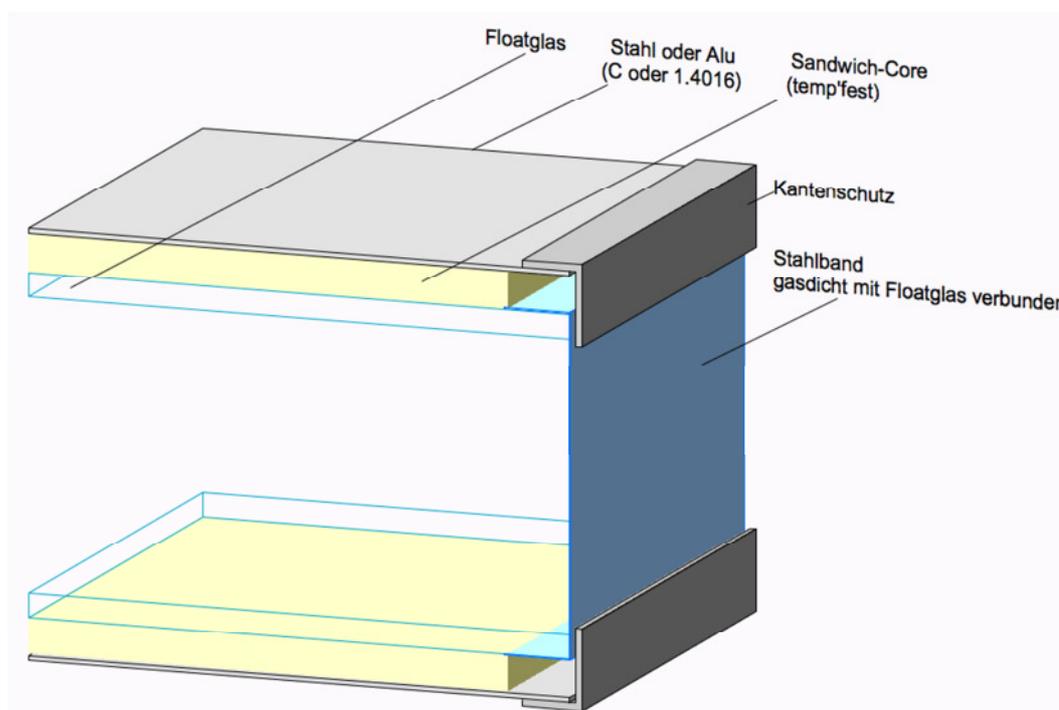


Fig. 4 Denkbarer Ansatz einer VSI mit Glas/C-Stahl Sandwich GrenzWänden

Grosse Temperaturunterschiede treten zwischen der oberen und unteren Sandwich-Platte auf. Der hierfür notwendige Längenausgleich kann 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. 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 Aufbau

4.1.1 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.

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

4.1.2 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 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 35 N/mm^2 gepresst.

Es hat sich sehr schnell gezeigt, dass das Optimum bei Schläuchen mit nominellem Durchmesser von 6 mm und einer Geflechtsstärke von 0.2 mm liegt. Die Herstellung von Ball-Distanzhaltern mit Schlauchdurchmessern $< \text{ca. } 4 \text{ mm}$ ist schwierig, weil die Distanzhalter unter Druck in diesem Falle unkontrollierbar knicken. Schlauchdurchmesser von $> 8 \text{ mm}$ führen zu Balldistanzhaltern von mit Aussendurchmessern von $> 10\text{-}12 \text{ mm}$ und sind deshalb nur in Ausnahmefällen von Interesse. Aus diesen Gründen haben wir uns im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf Glasgeflechtschläuche mit nominellem Durchmesser 6 mm und Geflechtstärke 0.2 mm beschränkt.

4.2 Herstellvorrichtung

Die Figuren 5a und 5b zeigen Prinzipskizzen der verwendeten Herstellvorrichtung, welche ohne grossen Aufwand auch zu einer für Massenfertigung geeigneten Anlage weiterentwickelt werden kann.

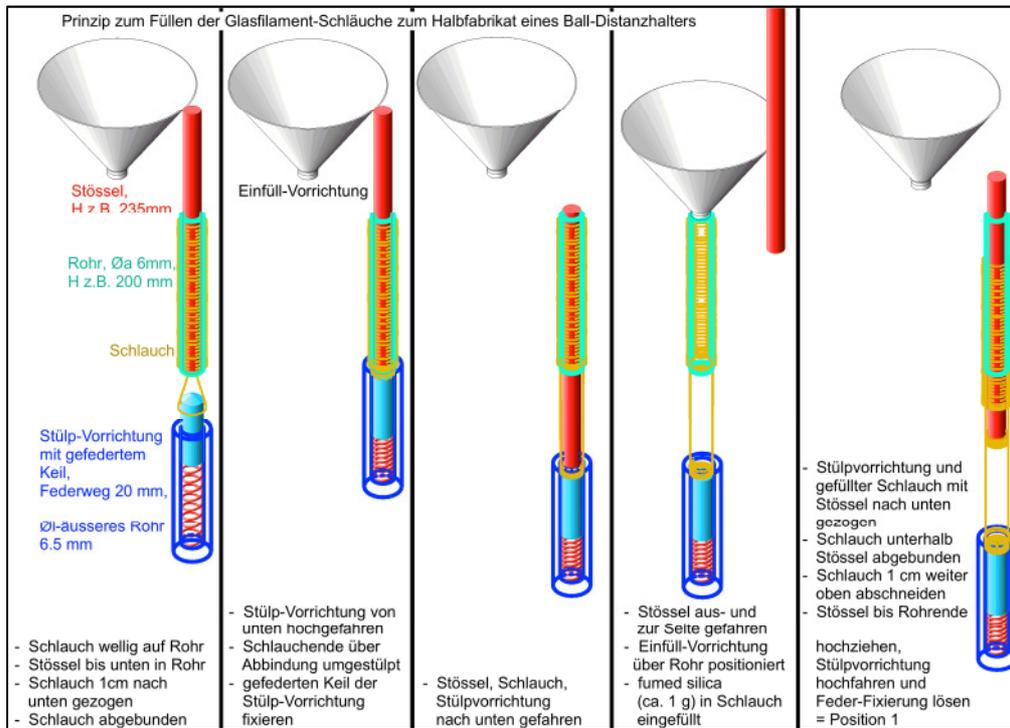


Fig. 5a Prinzipskizze der Füllvorrichtung

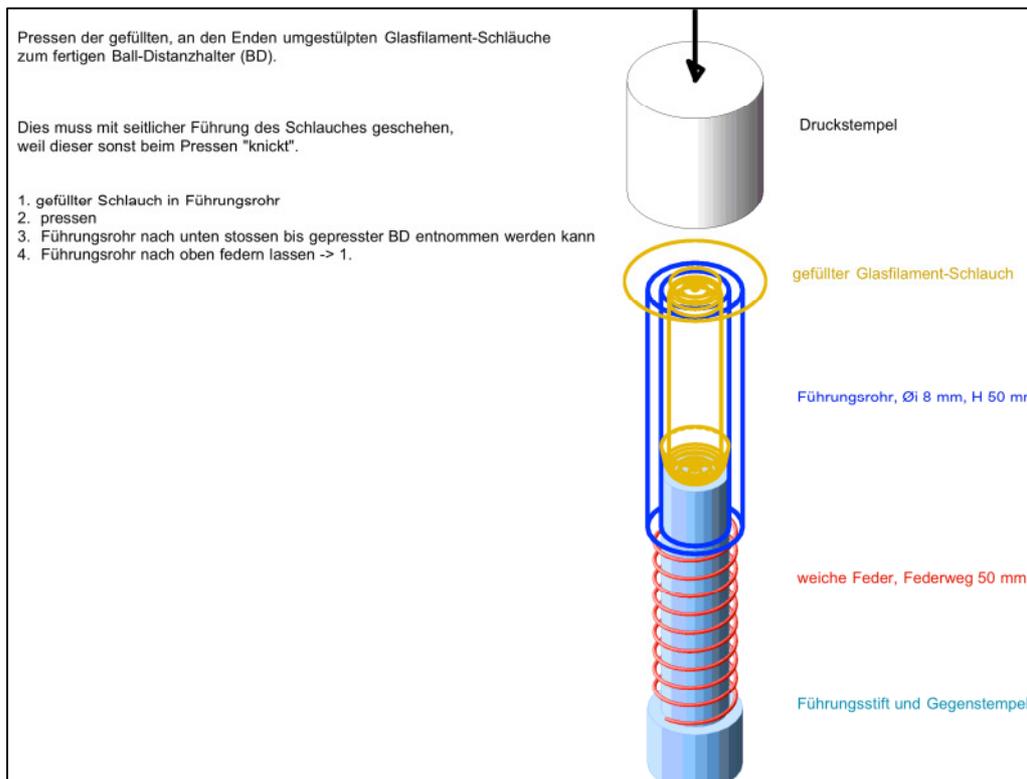


Fig. 5b Prinzipskizze der Pressvorrichtung

Das für den Vorgang des Füllens notwendige Abbinden der beiden Enden des als Hülle dienenden Glasfilament-Schlauchs gelingt problemlos unter Verwendung eines duktilen Drahtes mit beispielsweise Durchmesser 0.1 mm.

Es hat sich gezeigt, dass mit einer derartigen Vorrichtung Ball-Distanzhalter hergestellt werden können, bei welchen die Höhe deutlich grösser ist als der Durchmesser, d.h. die eine fast säulenförmige Gestalt haben. Figur 6 zeigt das Beispiel eines solchen Distanzhalters nachdem dieser in der Pressvorrichtung mit ca. 30 N/mm^2 in - in Figur 6 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.

Trotz der überhaupt nicht Ball-artigen Form der Distanzhalter halten wir am Begriff Ball-Distanzhalter fest, weil das Grundprinzip der Festigkeit eines Balls, ein leicht deformierbares Füllmaterial in einer elastischen, die Form erhaltenden Hülle, nach wie vor stimmt.



Fig. 6 säulenförmiger "gepresster" Ball-Distanzhalter (Pat. Helbling Technik AG)

4.3 Messungen

4.3.1 Druckfestigkeit der Ball-Distanzhalter (BD)

Die so mit $\varnothing 8 \text{ mm}$ (Querschnittsfläche ca. 50 mm^2) hergestellten BD wurden in einer konventionellen Druck-Zug Testanlage solange unter zunehmenden Druck gesetzt, bis das Hüllmaterial platzte. Figur 7 zeigt Beispiele entsprechender Kraft-Weg Diagramme.

Es zeigt sich, dass BD mit $\varnothing 8 \text{ mm}$ unter Einbezug genügender Sicherheit einer Druckkraft von 2500 N (ca. 50 N/mm^2) ausgesetzt werden können.

Dabei werden sie ca. um 4 mm zusammengepresst, d.h. ihre Höhe verringert sich von beispielsweise 14 mm auf 10 mm. Dieser Tatsache ist bei der Herstellung von Ball-Distanzhaltern einer gewünschten Endhöhe Rechnung zu tragen.

Die Druckkraft 2500 N entspricht einem BD-Abstand von ca. 160 mm (49 BD/m^2) im Innern einer VSI. Da bei solchen Abständen schon sehr hohe Anforderungen an die Biegesteifigkeit der VSI-Grenzwände gestellt werden (nötige Stärke Stahlplatte ca. 3.5 mm), ist diese Druckfestigkeit der BD für den Aufbau von VSI genügend. Höhere zulässige Druckkräfte - und damit grössere Distanzhalter Abstände - können mit grösseren Durchmessern der Ball-Distanzhalter realisiert werden.

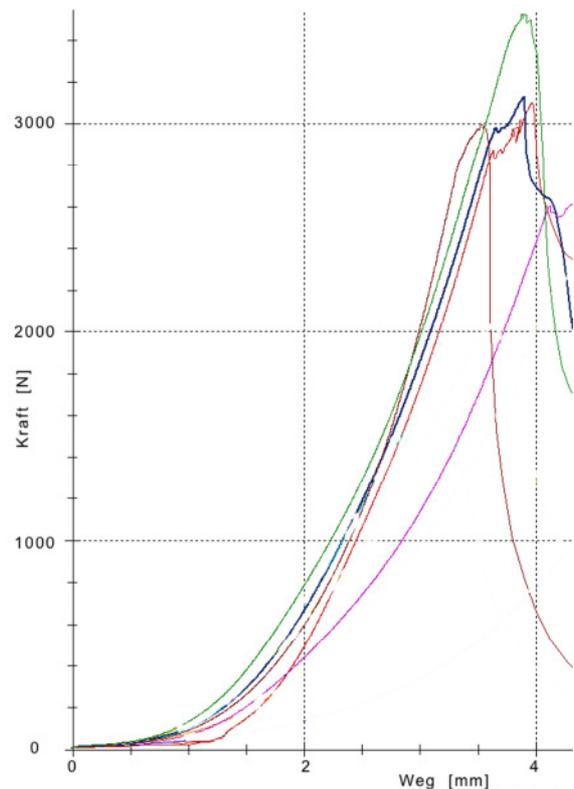


Fig. 7 Kraft-Weg Diagramme einer Reihe von Ball-Distanzhaltern

4.3.2 Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Ball-Distanzhalter im Vakuum

Die Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Ball-Distanzhalter im Vakuum geschah mittels der in Figur 8 skizzierten, von Helbling Technik selbst gebauten, evakuierbaren Vorrichtung. Dabei war klar, dass eine quantitativ genaue Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, besonders für sehr kleine zu messende Bauelemente messtechnisch so aufwändig ist, dass sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht geleistet werden kann. Wir haben uns deshalb darauf beschränkt, eine Messvorrichtung zu bauen, welche es erlaubt, im Vergleich zu wohlbekannten Isolationsmaterialien qualitativ gute und quantitativ vernünftige Abschätzungen zu liefern.

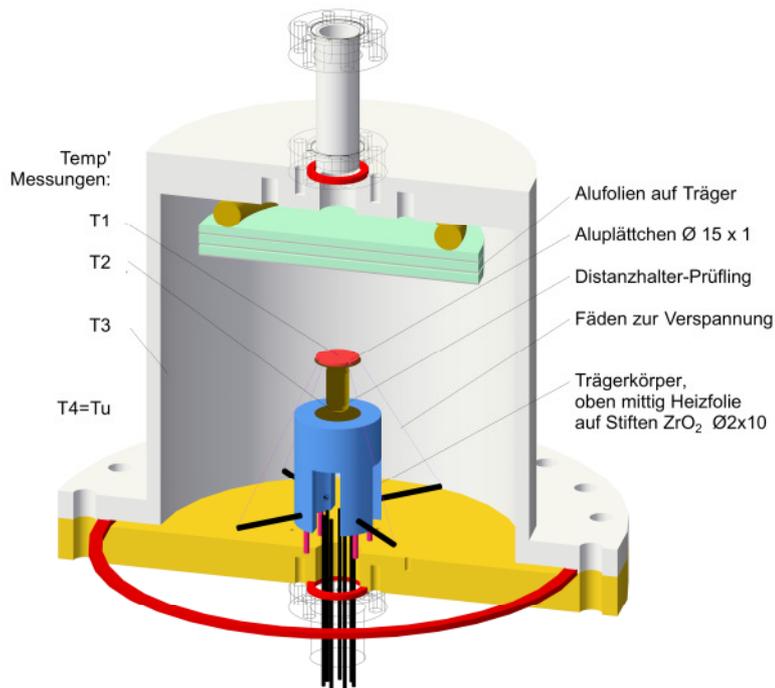


Fig. 8 Aufbau zur Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Distanzhalter im Vakuum

In einem evakuierbaren Rezipienten - mit Durchführungen für die elektrischen Leitungen unten und Absaugstutzen oben - sind die Prüflinge mittels Fadenspannung mit ihrer heissen Seite auf einen Trägerkörper gepresst. Die Zuführung der Heizenergie erfolgt mittels einer unterhalb des Prüflings auf dem Trägerkörper verklebten Heizfolie. Am oberen, freien Ende der Prüflinge ist ein Alu-Plättchen auf den Prüflingen zur gleichmässigen Einleitung der Fadenspannung fixiert. Zur Minderung der das Messresultat beeinflussenden Wärmestrahlung von diesem Plättchen zum Gehäuse sind im oberen Teil des Vakuumraumes mehrlagig Aluminiumfolien vorhanden. Der Vakuumraum wurde auf 10^{-5} mbar evakuiert, womit die Wärmeleitung über das Restgas vernachlässigt werden kann.

Die Heizfolie wurde mit konstanter Leistung betrieben und die Temperaturen an der Heizfolie (T2), am oberen Ende des Prüflings (T1), innen am Gehäuse des Rezipienten (3) und in der Umgebung der Vorrichtung (T4) im Beharrungszustand (steady state) gemessen.

Mit den Ball-Distanzhaltern und dem Referenzmaterial wurden die sich bei geregelter konstanter Heizleistung (3.7 V, 0.16 A, 0.592 W) ergebenden Temperaturen T1 bis T4 in Funktion der Zeit aufgenommen. Als Referenz für die Wärmeleitfähigkeit wurden Prüflinge aus XPS (geschlossenporiges Polystyrol) und zur Kontrolle solche aus PUR (Polyurethan) und POM (Polyoxymethylen) gewählt, deren Wärmeleitfähigkeit in Funktion der Temperatur bekannt ist. Nach Erreichen des Beharrungszustandes (ca. 10 h Heizdauer) wurden, während einer Zeitspanne von ca. 3h, 2000 Einzelwerte der Temperaturen herausgegriffen und die Mittelwerte gebildet. Aufgrund dieser Temperaturen wurden zunächst für die Referenz folgende Wärmeflüsse bestimmt: durch die Referenz-Messprobe, von der Heizfolie durch

den Trägerkörper zum Gehäuse des Rezipienten, vom Trägerkörper durch das Restgas zum Gehäuse und durch die elektrischen Zuleitungen. Mit Hilfe dieser Wärmeflüsse konnten die unbekannt Parameter der Wärmestrahlung zum Gehäuse bestimmt werden. Mit den so bestimmten Parametern und den gemessenen Temperaturen konnte die Wärmeleitung durch die Kontroll-Distanzhalter (PUR, POM) und die Ball-Distanzhalter (BD) und damit deren Wärmeleitfähigkeit mit vernünftiger Genauigkeit abgeschätzt werden. Die so bestimmten Werte für PUR und POM entsprechen mit guter Genauigkeit den aus den Datenblättern bekannten Werten, so dass davon ausgegangen werden kann dass auch die für die Ball-Distanzhalter (BD) abgeschätzte Wärmeleitfähigkeit einigermaßen vertrauenswürdig ist. Tabelle 5 zeigt entsprechende Resultate.

Zu bemerken ist, dass die Werte der BD an Luft (Restdruck 1000 mbar) für VSI nicht interessant sind. Wir haben diese Werte bestimmt um unsere Mess- und Auswertemethoden zu verifizieren.

	Restdruck mbar	Ø od. BxL mm mm ²	H mm	T-warm °C	T-kalt °C	λ (T-m) W/mK	U @49 Disth W/m ² K
Referenz XPS	10 ⁻⁵	8.60	16	73	35	0.048	
Referenz XPS	1000	8.60	16	43	35	0.045	
Kontrolle PUR	10 ⁻⁵	9.30	17	74	35	0.030	
Kontrolle POM	10 ⁻⁵	9.40	17	70	36	0.437	
BD (aus Messung)	10 ⁻⁵	8.70	18	74	37	0.028	0.0045@H=18 >0.008@H=10
BD (rechn.Schätz.)	10 ⁻⁵	8.70	18	74	37	0.029	
BD (aus Messung)	1000	8.70	18	45	37	0.056	
BD (rechn.Schätz.)	1000	8.70	18	45	37	0.046	

Tab. 5 Aus dem Vergleich zur Referenz bestimmte Wärmeleitfähigkeiten von BD

Zur Verifikation dieser auf Messungen basierenden Resultate haben wir zusätzlich eine rechnerische Abschätzung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten von entsprechenden Balldistanzhaltern im Vakuum und an der Luft durchgeführt. Die Resultate beider Abschätzungen stimmen so gut überein, dass wir für die Wärmeleitfähigkeit λ_{BD} von Ball-Distanzhaltern mit nominellem Ø 8 mm festhalten können: **$\lambda_{BD} = \text{ca. } 0.03 \text{ [W/mK] im Vakuum}$**

Aufgrund der in 4.3.1 bestimmten Druckfestigkeit der BD, werden 49 davon pro m² VSI benötigt. Damit ergibt sich ein sehr guter äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient durch die Summe der BD von **$U_{BD} \leq \text{ca. } 0.008 \text{ [W/m}^2\text{K] im Vakuum bei 10 mm Höhe}$**

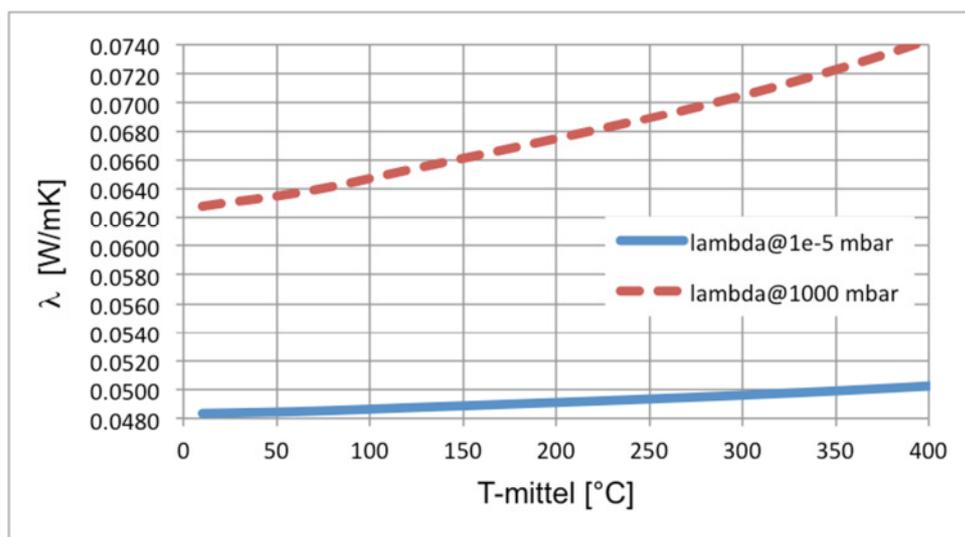


Fig. 9 rechnerisch abgeschätzte Wärmeleitfähigkeit von BD im Vakuum und in Luft

Es mag zunächst erstaunen, dass wir ein λ_{BD} von ca. 0.03 [W/mK] für gut halten, ist dieser Wert doch nur ca. gleich gut wie die Wärmeleitfähigkeit von XPS und beispielsweise deutlich schlechter als dieje-

nige von PU (Poly Uretan Schaum, ca. 0.026@50°C) oder gar pyrogener Kieselsäure im Vakuum (ca. 0.004@50°C).

Der höhere Wert der BD gegenüber diesen und anderen konventionellen Isolationsmaterialien und vor allem gegenüber pyrogener Kieselsäure, die ja als Füllmaterial für die BD dient, stammt von der Hülle aus Glasfasergewebe.

Genau dieser Aufbau stellt sicher, dass BD preiswert hergestellt werden können, mechanisch sehr robust sind, nicht ausgasen und auch bei hohen Temperaturen, kleinem Durchmesser und grosser Höhe die notwendige Druckfestigkeit aufweisen, damit nur 49 BD/m² benötigt werden. Konventionelle thermische Isolationsmaterialien halten dem notwendigen Druck nicht stand und gasen so stark aus, dass sie für Vakuumanwendung nicht geeignet sind.

4.4 Zusammenfassung der Resultate

Als Resultat der durchgeführten Versuche kann folgendes festgehalten werden:

- Es lassen sich Ball-Distanzhalter (BD) herstellen, bei welchen die Höhe deutlich grösser ist als der Durchmesser, d.h. die eine fast säulenförmige Gestalt haben. Figur 6 zeigt das Beispiel eines solchen Distanzhalters nachdem dieser in der Pressvorrichtung mit ca. 30 N/mm² in - in Figur 6 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 BD 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 BD von ca. 8 mm ein, wenn derselbe mit einem Schlauch des Durchmessers 6 mm und der Geflechtstärke 0.2 mm hergestellt und in der Pressvorrichtung mit ca. 30 N/mm² gepresst wurde. Die Höhe des entsprechenden BD lässt sich, abhängig von der Menge des verwendeten Füllmaterials im Bereich von ca. 6 mm bis ca. 20 mm variieren.
- Mit einer geeigneten Fertigungsvorrichtung lassen sich die fast säulenförmigen BD so herstellen, dass an ihren Enden eine quasi fächerförmige ebene Auflagefläche entsteht, auf welcher sie problemlos an den VSI-Grenzwänden befestigt werden können.
- Es zeigt sich, dass BD mit nominellem Ø 8 mm (Querschnittsfläche ca. 50 mm²) unter Einbezug der entsprechenden Sicherheiten einer Druckkraft von 2500 N, d.h. einem Druck von ca. 50 N/mm², ausgesetzt werden können. Dies entspricht einem Distanzhalterabstand von 160 mm (49 BD/m²) im Innern einer VSI. Höhere zulässige Druckkräfte - und damit grössere Distanzhalter Abstände - können mit grösseren Durchmessern der Balldistanzhalter realisiert werden.
- Die Wärmeleitfähigkeit der BD liegt zwischen 0.045 und 0.05 W/mK, was zu einem äquivalente Wärmedurchgangskoeffizienten U_{BD} durch die Summe der BD von ≤ 0.015 W/m²K bei 10 mm Höhe führt, und damit das angestrebte U_{total} von ≤ 0.08 W/m²K nicht verunmöglicht.

5. 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 liegen sollte. 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 $< 10 \mu\text{m}$ 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, weil die parallel verlaufenden Filamente in Querrichtung relativ leicht gegeneinander verrutschen können. 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 $50 \mu\text{m}$ haben wir uns auch für das Umwindungsmaterial auf die Verwendung von Glas- oder Basaltfilamenten konzentriert.

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 das Zersägen mit einer dünnen Diamant-Trennscheibe erwiesen.

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 hierfür nicht geeignet sind, da diese nach dem Aushärten sehr spröde werden und deshalb beim Zersägen förmlich zerbröseln. In Vorversuchen haben sich Polyimid-Klebstoffe, gefüllte Acryl-Klebstoffe oder bestimmte Silikone bezüglich Festigkeit, Zertrennbarkeit und Temperaturbeständigkeit als sehr vielversprechend erwiesen. Zur Herstellung der Versuchsmuster haben wir uns auf die Verwendung von Hochtemperatur Silikon beschränkt.

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 Quer-

richtung aufgrund des sehr flexiblen Mantels 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 einfache Umwindvorrichtung zur Herstellung von Versuchsmustern selbst zu bauen.

Figur 10 zeigt einen Versuchs-Aufbau mit welchem wir den Grundgedanken für eine solche Vorrichtung verifiziert und Versuchsmuster von PFD hergestellt haben. Wir "missbrauchen" eine kleine 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 Umwindungsmaterial befestigt, von welcher aus das Umwindungsmaterial um das Roving-Bündel gewickelt wird. Mittels einer 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



Fig. 10 Versuchs-Aufbau zur Umwindung von Parallel-Filament Distanzhaltern

des Roving-Bündels wird gewährleistet, indem das Roving-Bündel am - in Figur 10 nicht sichtbaren - Werkzeug-Schlitten der Drehbank fixiert ist, welcher auf den gewünschten Vorschub beispielsweise im Bereich von 0.015 bis 5 mm/Umdrehung eingestellt ist.

Mit der in Figur 10 gezeigten Umwind-Vorrichtung wurden u.a. die vier in Figur 11 auf rotem Hintergrund dargestellten Muster von PFD-Strängen hergestellt.

Als Umwindungsmaterial wurde - nach erfolglosen Vorversuchen mit anderen Materialien - ein Glas-filament Roving mit ca. 240 tex verwendet.

Es ist deutlich sichtbar, dass (von unten nach oben) eine zunehmende Dichte der Umwindung von 2, 1, 0.5 und 0.2 mm/Umdrehung realisiert wurde. Die erkennbare Unregelmässigkeit der Umwindeabstände in Figur 11 erklärt sich aus einer Unzulänglichkeiten des Versuch-Aufbaus, die leicht zu beheben ist.

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



Fig. 11 PFD-Stränge mit unterschiedlichen Umwindungen

5.3 Messungen

5.3.1 Druckfestigkeit der Parallel-Filament Distanzhalter (PFD)

Zur Messung der Druckfestigkeit der nach dem obigen Vorgehen gefertigten Parallel-Filament Stränge mit $\varnothing 9$ mm, wurden von diesen zur Erzeugung von Distanzhaltern 20 mm lange Teilstücke abgetrennt. Dies ergibt eine Querschnittsfläche von $9 \times 20 = 180 \text{ mm}^2$ und eine Höhe unter Druck von ca. 7 mm. Für grössere Höhen der PFD können zwei oder drei derartige Teilstücke aufeinander angeordnet werden.

Dies geschah nach einigen andern, nicht erfolgreichen Versuchen, mit einer sehr feinen Diamant-Trennscheibe.

Da dieses Trennverfahren sich als unproblematisch und mit kurzer Bearbeitungszeit durchführbar erwiesen hat, gehen wir davon aus, dass es auch für eine (Klein-) Serienproduktion derartiger Distanzhalter geeignet ist.

Figur 12 zeigt die Kraft-Weg Diagramme zweier unterschiedlicher so hergestellter Distanzhalter.

Die hellblau dargestellte Kurve wurde mit einem Distanzhalter erzeugt, bei welchem das als Umwindungsmaterial verwendete 240 tex Roving mit einer Steigung von 1 mm/Umdrehung aufgebracht wurde.

Die schwarze Kurve stammt von einem Distanzhalter mit einer Umwindungs-Steigung von 2 mm/Umdrehung.

Es ist nicht erstaunlich, dass der enger umwundene PFD einer deutlich höheren Kraft ausgesetzt werden darf als der weniger eng umwundene. Die quer zu den parallel verlaufenden Filamenten wirkende Druckkraft will die Filamente gegeneinander verschieben und erzeugt so eine Zugkraft auf die Umwindung.

Weil der mit Steigung 1 umwundene PFD die doppelte Materialmenge in der Umwindung enthält als der mit Steigung 2 gefertigte, kann dessen Mantel theoretisch auch die doppelte Zugkraft aufnehmen. Dies wird durch die beiden in Figur 12 dargestellten Messresultate bestätigt. Die aus Figur 12 ersichtlichen maximalen Druckkräfte sind unter Berücksichtigung der notwendigen Sicherheit ca. 3000 N (17 N/mm^2) bzw. 1500 N (8 N/mm^2), was maximal erlaubten PFD-Abständen von 173 mm (36 PFD/m^2) bzw. 122 mm (81 PFD/m^2) entspricht.

5.3.2 Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Parallel-Filament Distanzhalter im Vakuum

Um besser mit den Ball-Distanzhaltern vergleichbare Werte zu erhalten, wurden zur messtechnischen Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit, zwei der in Abschnitt 5.3.1 geschilderten PFD mit Umwindungssteigung 1 mm/Umdrehung aufeinander liegend angeordnet, so dass sich ein PFD mit Querschnittsfläche 180 mm^2 und Höhe 14 mm ergab.

Mit der in Abschnitt 4.3.2 geschilderten Messvorrichtung und entsprechenden Auswertungs-Methoden ergibt sich Tabelle 6, wobei auch hier zu sagen ist, dass die Werte an Luft nur zur Verifikation unserer Mess- und Auswertemethoden bestimmt wurden.

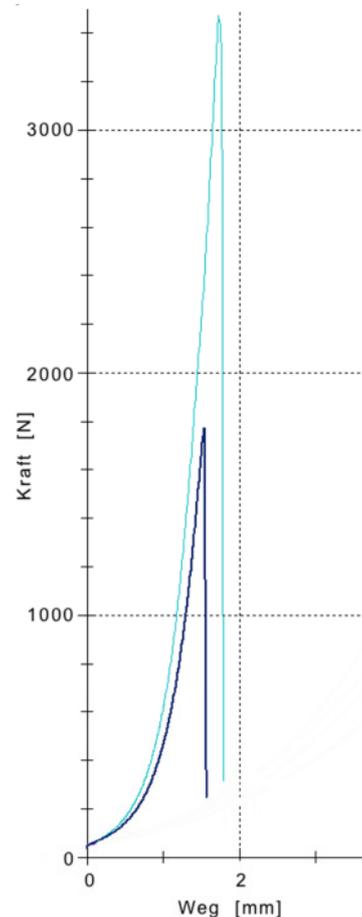


Fig. 12 Kraft-Weg Diagramm zweier Parallel-Filament Distanzhalter

	Restdruck mbar	Ø od. BxL mm mm ²	H mm	T-warm °C	T-kalt °C	λ (T-m) W/mK	U @49 Disth W/m ² K
Referenz XPS	10 ⁻⁵	8.60	16	73	35	0.048	
Referenz XPS	1000	8.60	16	43	35	0.045	
Kontrolle PUR	10 ⁻⁵	9.30	17	74	35	0.030	
Kontrolle POM	10 ⁻⁵	9.40	17	70	36	0.437	
2 PFD aufeinander	10 ⁻⁵	9x20	14	70	33	0.028	0.0130@H=14 >0.018@H=10
2 PFD aufeinander	1000	9x20	14	39	31	0.054	

Tab. 6 Aus dem Vergleich zur Referenz bestimmte Wärmeleitfähigkeit von PFD im Vakuum und bei Normaldruck

Wir können für die Wärmeleitfähigkeit λ_{PFD} von 2 aufeinander liegenden Parallel-Filament Distanzhaltern (PFD) mit Querschnittsfläche 180 mm² und Umwindung aus 240 tex Roving mit Steigung 1 mm/Umdrehung festhalten: **$\lambda_{\text{PFD}} \leq \text{ca. } 0.03 \text{ [W/mK] im Vakuum}$**

Aufgrund der in 5.3.1 bestimmten Druckfestigkeit der BD, werden 36 davon pro m² VSI benötigt. Damit ergibt sich ein guter äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient durch die Summe der PFD von

$$\mathbf{U_{\text{PFD}} \leq \text{ca. } 0.02 \text{ [W/m}^2\text{K] im Vakuum bei 10 mm Höhe}$$

Es ist offensichtlich, dass wir bezüglich PFD noch vom erreichbaren Optimum entfernt sind. Hierzu müssten in einer relativ grossen Versuchsreihe PFD mit unterschiedlichen Umwindungsmaterialien und Umwindungssteigungen auf Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit und dem sich daraus ergebenden äquivalenten Wärmeleitkoeffizienten untersucht werden.

In der vorliegenden Arbeit haben wir darauf verzichtet. Dies aus Zeitgründen, aber vor allem ausgehend von der Tatsache, dass es gelungen ist, alle Schwierigkeiten bei der Fertigung von preiswerten und leicht montierbaren Ball-Distanzhaltern zu überwinden und deshalb PFD nur noch als willkommene zweite Lösungsmöglichkeit betrachten werden können.

5.4 Zusammenfassung der Resultate

- der eigentliche Vorgang des Umwindens ist mit der geschilderten oder einer ähnlichen Vorrichtung problemlos und kostengünstig auch in Serienfertigung durchführbar. Auch die Trennung der so gefertigten PFD-Stränge in z.B. 2 cm lange Teilstücke ist problemlos realisierbar.
- Die geforderte Druckfestigkeit eines PFD in Querrichtung von ca. 50 N/mm² ist mit dünnem Umwindungsmaterial, wie beispielsweise 66 tex Glasfilament-Fäden aus s2-Glas, nicht erreichbar. Es hat sich gezeigt, dass mit einer Umwindung aus 240 tex Glasfilament-Roving mit einer Steigung von 1 mm/Umdrehung lediglich eine Druckfestigkeit von knapp 20 N/mm² resultiert.
- Aufgrund dieser relativ kleinen Druckfestigkeit ergeben sich mit PFD in Summe deutlich höhere äquivalente Wärmedurchgangskoeffizienten [W/m²K] als mit BD, so dass PFD - zumindest momentan - nur zweite Wahl sind.

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 13 zeigt Prinzipskizzen von, die obigen Anforderungen erfüllenden, möglichen Randverbunden.

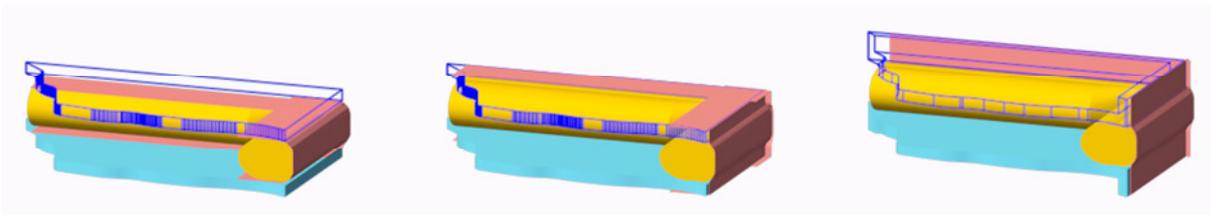


Fig. 13a

Fig. 13b

Fig. 13c

In allen 3 Prinzipskizzen sind die beiden Grenzwände blau gezeichnet, wobei jeweils die obere Grenz- wand durchsichtig dargestellt ist.

Bei allen 3 skizzierten Randverbunden wird die Gasdichtigkeit des Randes mittels eines dünnen gas- dichteten Randbandes (rot skizziert) sichergestellt. Ein beispielsweise nach dem Parallel-Filament Prinzip aufgebauter (gelb skizzierter) Randdistanzhalter kann erstens den am Rand herrschenden Druck zwischen den beiden Grenzwänden (blau) aufnehmen und stellt zweitens sicher, dass das dünne Rand- band sich unter Luftdruck anlegen kann und nicht zerrissen wird. Die Funktion dieses Randdistanz- halters kann sich - bei entsprechender Anordnung der in den Skizzen nicht gezeigten inneren lokalen Dis- tanzhalter - aber auch darauf beschränken, dass sich das dünne Randband unter Luftdruck anlegen kann und nicht zerrissen wird. In diesem Falle ist es möglich sehr weiche Randdistanzhalter zu verwen- den. Bei Verwendung eines PFD-Strangs als Randdistanzhalter bedeutet dies, dass eine sehr dünne und weite Umwindung verwendet werden darf und damit die Wärmeleitfähigkeit des PFD-Strangs klein wird. Es ist in diesem Falle aber auch möglich, einen ganz anderen Aufbau des Randdistanzhalters zu wählen, also beispielsweise einen mit pyrogener Kieselsäure gefüllten gasdurchlässigen Schlauch.

Weil mit diesem Gesamtaufbau nicht nur die Gasdichtigkeit sondern auch eine sehr niedrige Wärmeleit- fähigkeit über den Rand sichergestellt werden kann, gehen wir im Folgenden immer von einem entspre- chenden Aufbau des Randverbundes aus.

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

In Figur 13a verläuft das Randband um den Randdistanzhalter herum auf die dem Vakuum zugewende- te, innere Seite der beiden Grenzwände und ist dort gasdicht mit denselben verbunden. Kurze Vorver- suche haben aber gezeigt, dass ein solcher Aufbau verbindungstechnisch sehr schwer zu realisieren ist.

Figur 13b skizziert ein Randband, welches um den Randdistanzhalter herum quasi U-förmig von Aus- senseite zu Aussenseite der beiden Grenzwände verläuft. Diese Variante ist sowohl fertigungstechnisch als auch verbindungstechnisch relativ einfach realisierbar, wobei allerdings das "um die Ecke führen" des U-förmig gefalteten Randbandes - durch nicht vermeidbare Doppellagigkeit und allfälliges Reißen des Randbandes - Probleme bereitet. Trotzdem haben wir im Verlauf dieser Arbeit diesen Ansatz weiter

verfolgt und versucht, für die Eckproblematik eine genügend gute Lösung zu erarbeiten, was aber (noch) nicht gelungen ist.

Figur 13c 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 geschieht. Die Grenzwände sind in diesem Falle nämlich wannenförmig tiefgezogen, so dass ein hoher Rand entsteht, entlang welchem das Randband quasi flach um die gesamte VSI herumgeführt werden kann.

6.2 Randdistanzhalter

Der Randdistanzhalter hat die Aufgabe, den am Rand herrschenden Druck zwischen den beiden Grenzwänden aufzunehmen. 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 im Inneren der VSI 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, sodass dieser - unter dem vom Randband ausgeübten Druck - nicht verschoben wird. Damit kann die Notwendigkeit einer - beispielsweise durch Verklebung erreichbaren - zusätzlichen Fixierung des Randdistanzhalters vermieden werden.

6.3 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 austenitischem 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 sehr dünne Randband

seiner höheren Gasdurchlässigkeit und seiner wesentlich höheren Wärmeleitfähigkeit ($> 45 \text{ W/mK}$) wegen wegfällt. Ferritische Stahlbänder sind standardmässig bis hinunter zu einer Stärke von $25 \mu\text{m}$ 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 austenitischem Stahl mit Glas erlauben. Auf Ansätze in dieser Richtung gehen wir im folgenden Abschnitt ausführlich ein.

6.4 Verbindung Randband - Grenzwände

6.4.1 Ansätze für gasdichte Verbindungen Randband-Grenzwand

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 zwingend ein Löt-Verfahren zum Einsatz kommen, bei dem die notwendigen hohen Temperaturen zum Erschmelzen des Lots nur kurzzeitig lokal auftreten und die Grenzwannd als Ganzes im Wesentlichen kühl bleibt. Zu diesem Zwecke muss das Lot vor dem Aufbringen des Randbandes bereits am Rand der Grenzwannd aufgebracht sein, was beispielsweise mittels Auftragen einer geeigneten Lotpaste geschehen kann. Während der lokalen Erhitzung muss dann das Randband an der entsprechenden Stelle angepresst werden, so dass ein genügend kleiner und definierter Lötspalt entsteht.

Wir betrachten diese Art der Verbindung eines dünnen Stahlbandes mit einer Stahl-Grenzwannd als beherrschte Technik und untersuchen sie im Verlauf dieser Arbeit nicht weiter.

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

Zu Beginn dieser Arbeit hatten wir uns vorgenommen auch die Glaslotverbindung von Stahlband und Glas-Grenzwannd näher zu untersuchen. Versuche, bei welchen die Glaslot-Verbindung auch zyklisch hohen Temperaturschwankungen unterworfen werden sollte, waren im Verlauf dieses Projektes geplant. Die entsprechenden Materialien sind - mit sehr grossem Beschaffungsaufwand für ein $25 \mu\text{m}$ 1.4016 Stahlband - beschafft worden. Eine Bestätigung der vielversprechenden Resultate eines kurzen Vorversuchs muss aber - bei Bedarf - noch durchgeführt werden.

Ein völlig 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 1x1 m grossen Vakuumplatten langzeitig vakuumdicht. Es ist aber 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.

Wir sind daran interessiert, die Vakuumsplatt-Isolation (VSI) auf breitem Feld, d.h. nicht nur für Massenproduktion sondern auch für mittlere oder gar kleine Stückzahlen, wirtschaftlich umzusetzen. Deshalb 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 - d.h. pinhole frei - mit dem Verbindungsmaterial gefüllt ist, womit Diffusion durch diesen Spalt minimiert ist.

Figur 14 zeigt das von uns hierfür bearbeitet Feld.

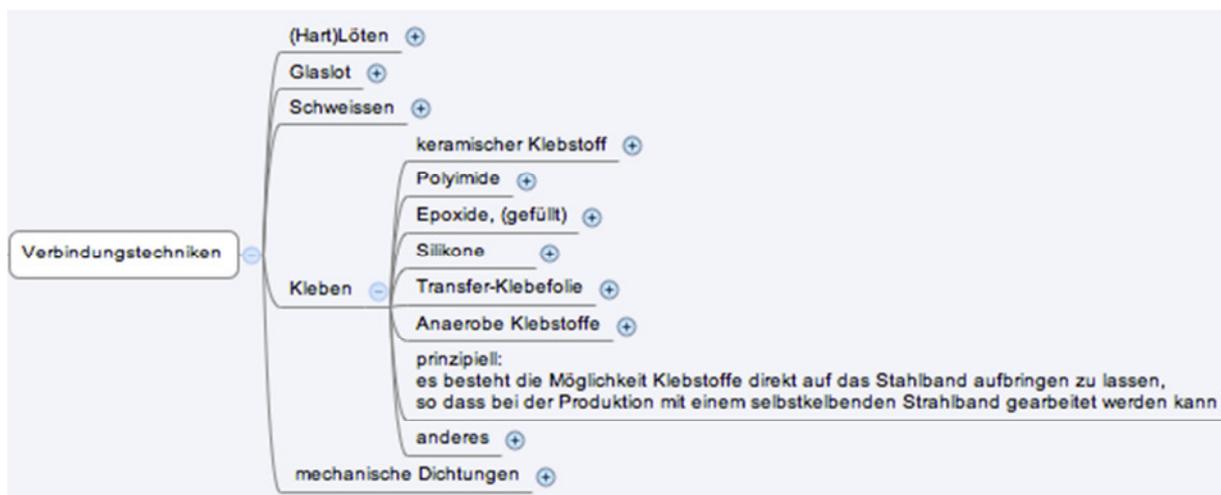


Fig. 14 mögliche Verbindungsverfahren Randband-Grenzwand

Neben den oben bereits diskutierten Verbindungsmaterialien "Metall-Lot" und "Glaslot" haben wir - wieder einmal - Abklärungen durchgeführt, ob im Falle der Kombination Stahlband-Stahlwand - entgegen früherer Erfahrung - nicht doch ein Schweissverfahren existiert, mit dem ein 10 bis 20 µm dünnes Stahlband auf eine Stahlwand verschweisst werden kann.

Hinweise nach welchen mit bestimmten Reibschweiss-Verfahren dünnste Metallfolien in industriellen Prozessen miteinander oder mit dicken Platten verschweisst werden können, haben sich aber nach Rücksprache mit den Herstellern entsprechender Schweissgeräte als illusorisch erwiesen.

Auch das - im Internet - erfolgsversprechend erscheinende CMT-Schweissverfahren hat sich nach Rücksprache mit der Firma Fronius AG, die dieses Schweissverfahren entwickelt hat, für diesen Fall als nicht geeignet herausgestellt.

Bei beiden Verfahrensarten muss davon ausgegangen werden, dass die dünnen Stahlbänder beim Schweissvorgang teilweise zerstört werden.

Damit bleibt als in diesem Sinne bestes Schweißverfahren, das Laserschweißen, das aber - in früheren Versuchen erhärtet - Stahlbänder von mindestens 50 µm Stärke benötigt.

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 15 erkennbare Reihe von in Frage kommenden Klebstoffen identifiziert, entsprechende Muster beschafft und die im nächsten Abschnitt näher besprochene Versuche durchgeführt.

6.4.2 Versuche zur Verklebung Randband - Grenzwände

Figur 15 zeigt eine Übersicht der getesteten Klebstoffe und der durchgeführten Prüfungen

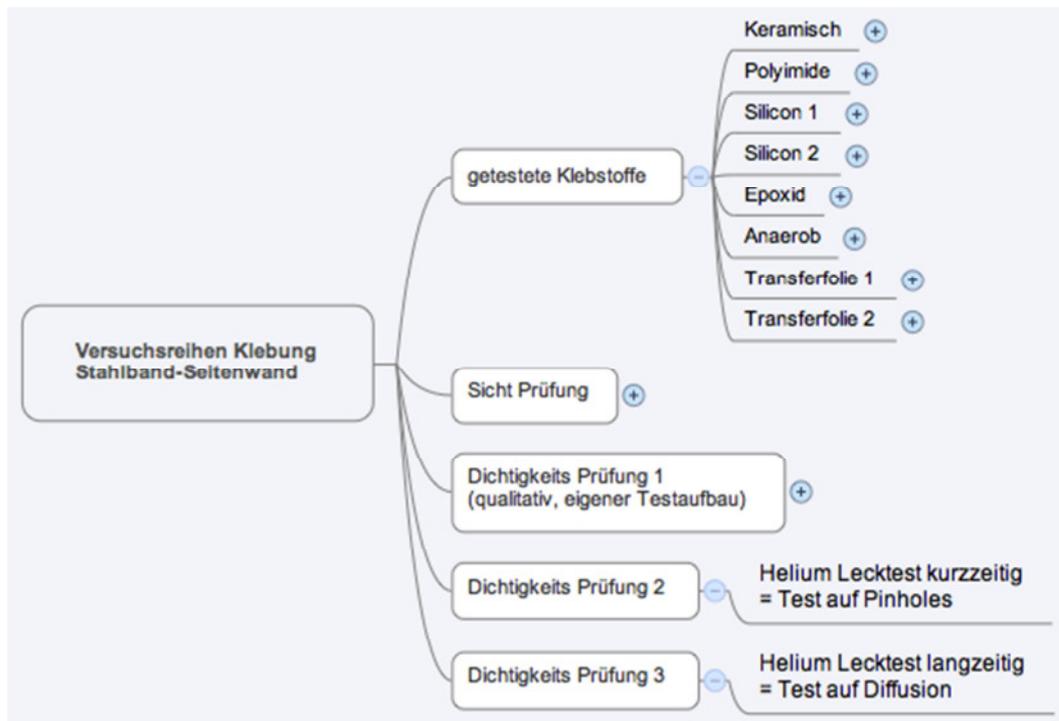


Fig. 15 Übersicht der Klebstoff-Tests

Nach einer aufwändigen Auswahl aufgrund von Datenblättern und Gesprächen mit Experten wurden insgesamt 8 unterschiedliche Klebstoffe getestet.

6.4.2.1 Sichtprüfung

In einem ersten Vortest wurde mit jedem der Klebstoffe ein Stahlband auf eine Glasscheibe geklebt und das Resultat einer Sichtprüfung unterzogen. Klebstoffe welche diese Prüfung nicht bestanden, wurden in den folgenden Prüfungen nicht weiter untersucht. Figur 16 zeigt das von uns gewählte Vorgehen für die Sichtprüfung und die Klebstoffe mit negativem Ergebnis in diesem Test.

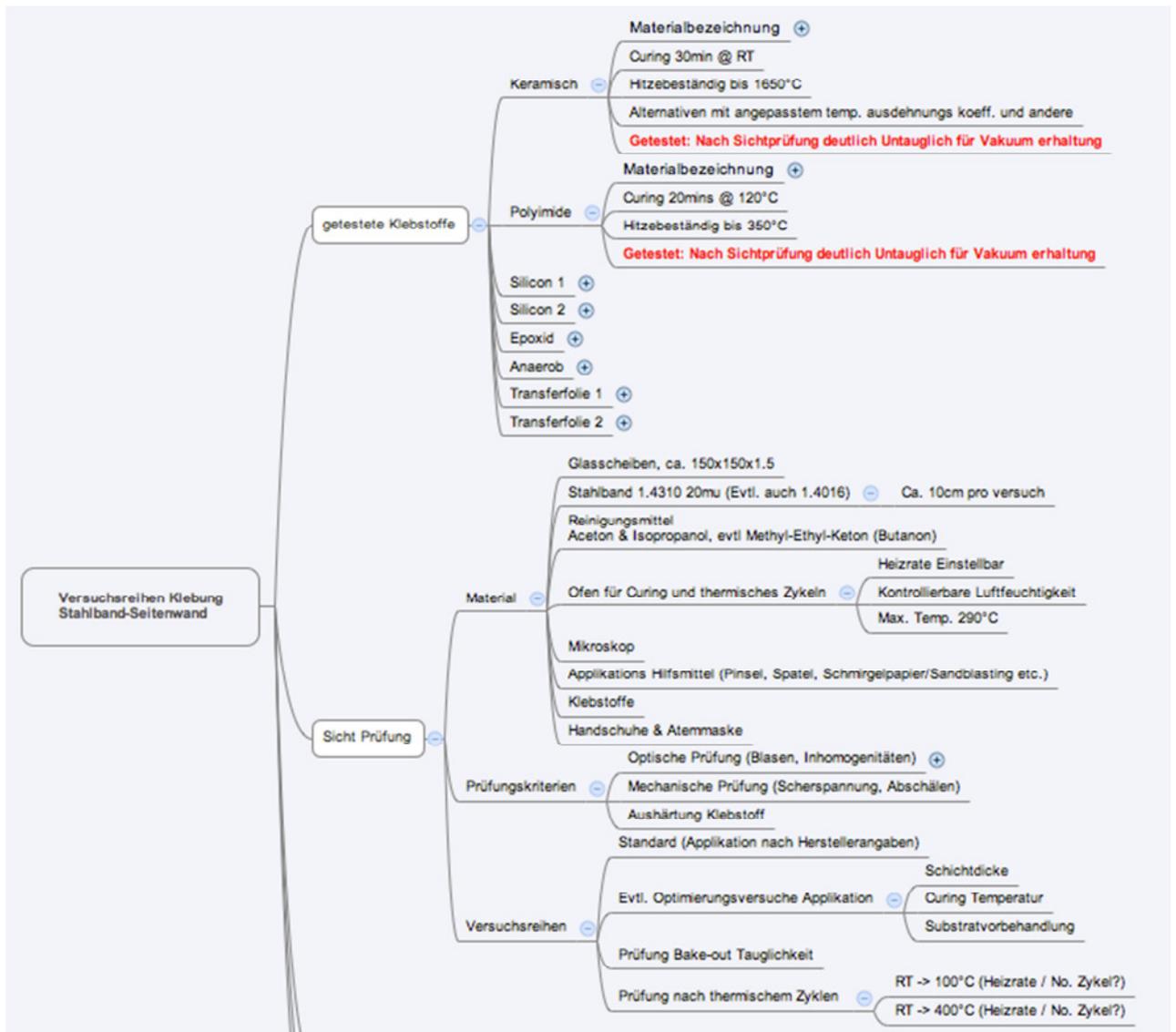


Fig. 16 Vorgehen, Kriterien und negative Resultate der Sichtprüfung

Es hat sich gezeigt, dass zwei der Klebstoffe mit - an und für sich erwünschter - hoher Temperaturbeständigkeit deutlich sichtbar keine dichten Verklebungen ermöglichen. Im Falle des keramischen Klebstoffes ist dies auf die Grobkörnigkeit des Materials zurückzuführen. Im Falle des Poyimids auf den hohen Gehalt an Lösungsmittel im Klebstoff, welches beim Aushärten mit aufwändigen Temperaturschritten (30min bei 80°C, dann 20min bei 120°C, dann 20min bei 150°C, dann 30min bei 275°C) nicht aus dem engen und breiten Klebspalt entweichen kann und infolge dessen grosse durchgängige Blasen bildet.

6.4.2.2 Dichtigkeitsprüfung 1

Figur 17 zeigt die Skizze eines pragmatisch einfachen Aufbaus, mit welchem die restlichen Klebstoffe der Dichtigkeitsprüfung 1 unterzogen wurden.

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 Klebspalt aufgeklebt (siehe Figur 18). 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 aufgezeichnet wird. Nach Erreichen eines Unterdruckes von $\leq 10^{-5}$ mbar wird das Ventil geschlossen und der weitere Druckverlauf aufgezeichnet.

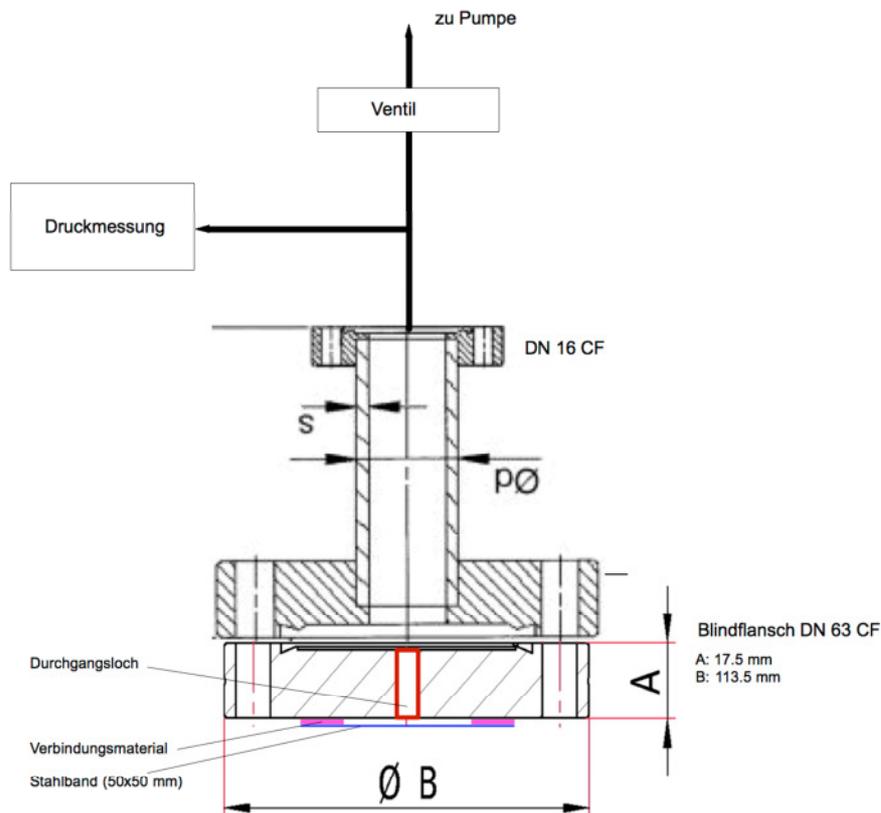


Fig. 17 Skizze des Messaufbaus zur Abschätzung der Gasdichtigkeit von Klebeverbindungen

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

Der Vergleich der so aufgenommen Kurven ermöglicht eine zweite qualitative Aussage, ob es sich lohnt einer bestimmten Klebeverbindung weiter nachzugehen.

Wenn sich 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.

Figur 19 zeigt entsprechende Druckverläufe der Verklebungen, welche diese Prüfung bestanden haben.



Fig. 18 CF63-Flansch mit Durchgangsloch im Zentrum und aufgeklebtem Stahlband

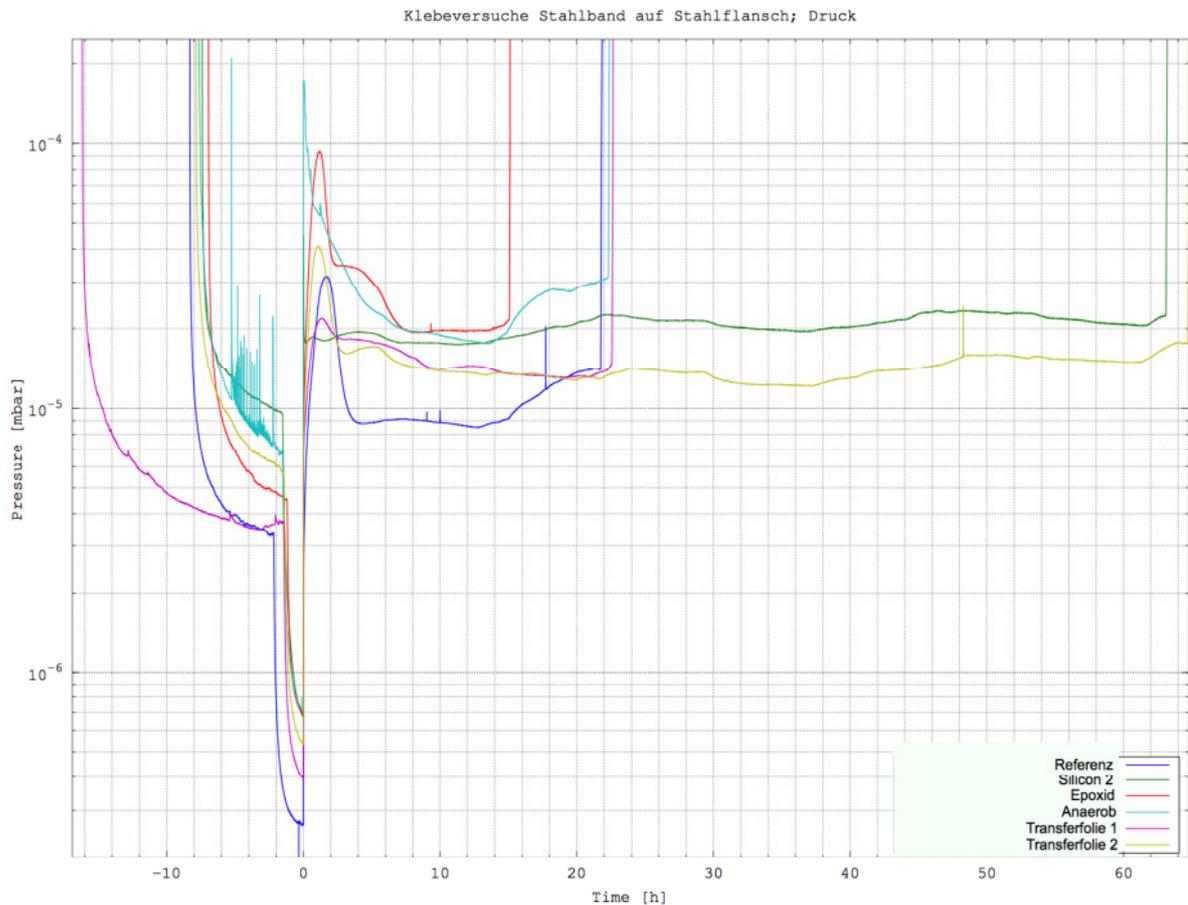


Fig. 19 Druckverläufe des Referenzflansches und der 5 guten Verklebungen

Der Kurvenverlauf bei negativ angeschriebenen Zeiten entspricht der Abpump- und Ausheizungs-Zeitspanne, derjenige bei positiver Zeit dem Druckverlauf bei geschlossenem Ventil. Ein Druckanstieg bei geschlossenem Ventil würde bedeuten, dass die Verklebung nicht dicht ist.

Die Herkunft der markanten Druckschwankungen beim Schliessen des Ventils zum Zeitpunkt "0" können wir nicht plausibel erklären. Da diese aber auch bei dem als Referenz gemessenen Blindflansch - der mit absoluter Sicherheit dicht ist - auftreten, handelt es sich um ein unserem Aufbau inhärentes Phänomen, welches wir ignorieren dürfen. Entscheidend ist, ob die Kurven bei positiver Zeit genau so flach verlaufen wie die Referenz-Kurve und ob sie dies bei einem Druck tun, der mit dem Referenzdruck vergleichbar ist.

Es hat sich gezeigt, dass lediglich das sehr kostengünstige und sehr einfach zu verarbeitende Silicon 1 keine dichte Verklebung im Sinne dieses Tests erzeugt. Der entsprechende, in Figur 19 nicht dargestellte Druckverlauf steigt nach dem Schliessen des Ventils innerhalb von 20 Stunden auf ca. 10^{-1} mbar an.

Die restlichen 5 Klebstoffe zeigen sehr vielversprechende Resultate. Alle Kurven verlaufen ebenso flach wie diejenige der Referenz und auch die Drücke unterscheiden sich von demjenigen der Referenz - in unserem Sinne - nicht signifikant. Es lohnt sich, diese Klebstoffe weiter zu untersuchen.

Figur 20 zeigt eine Übersicht über die Klebstoffe, deren wichtigste Eigenschaften und die Resultate der Dichtigkeitsprüfung 1.

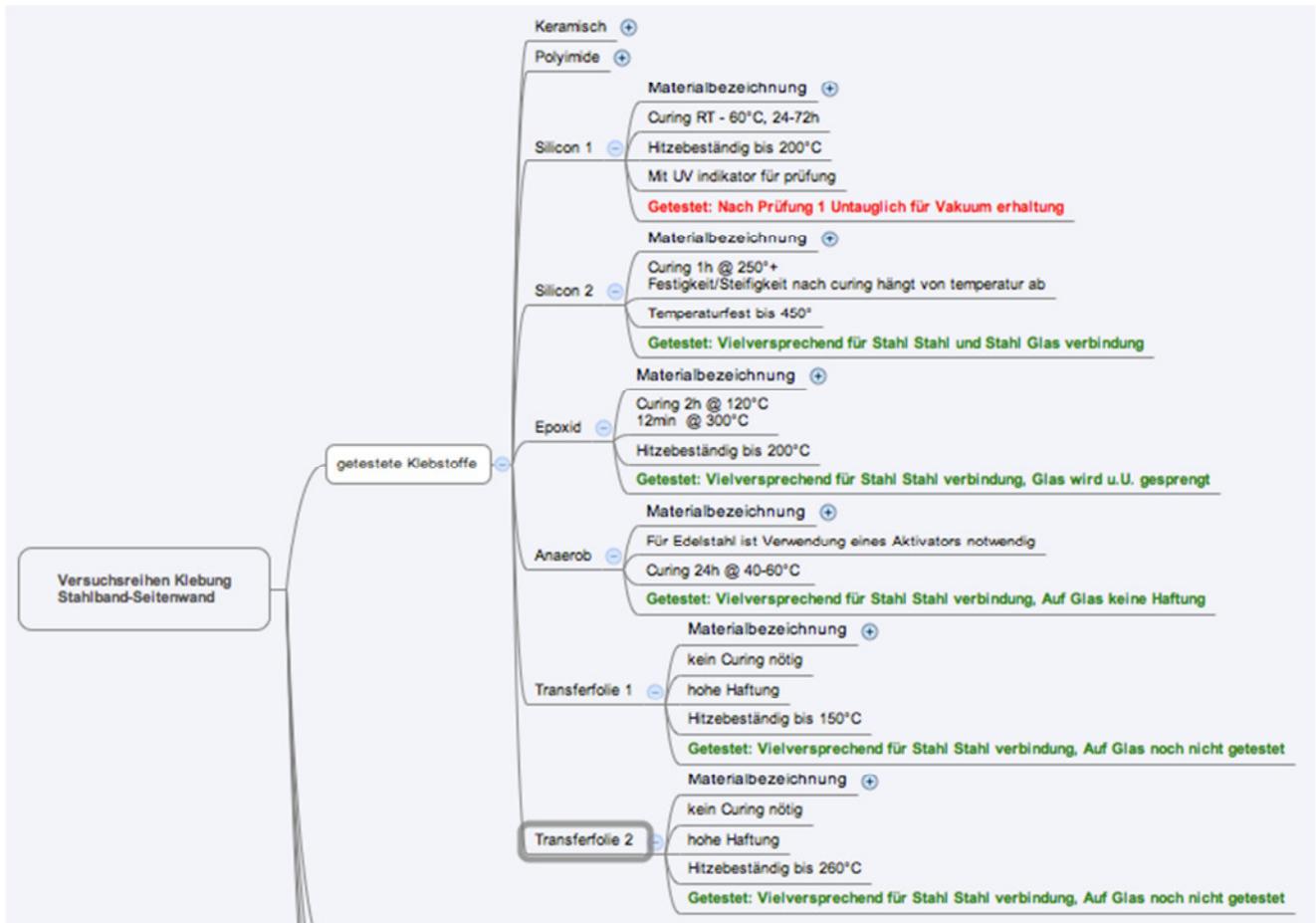


Fig. 20 Eigenschaften der Klebstoffe und Resultate der Dichtigkeitsprüfung 1

6.4.2.3 Dichtigkeitsprüfung 2

Zur Verifizierung der - an und für sich sehr aussagekräftigen - Resultate der Dichtigkeitsprüfung 1 wurden die Verklebungen welche ein positives Resultat gezeitigt hatten einem kurzzeitigen Helium-Lecktest unterzogen, der bestätigen sollte, dass keine Pinhole-artigen Undichtigkeiten vorhanden sind.

Ein Helium-Lecktestgerät besteht im Wesentlichen aus einem auf Helium eingestellten Massenspektrometer in Kombination mit einem Vakuumsystem, das mittels Vorpumpe, und Hochvakuumpumpe einen Unterdruck von $\leq 10^{-4}$ mbar erreicht. Mehrere Flansche und Ventile ermöglichen den Anschluss des zu testenden Volumens, welches nach Erreichen des Unterdruckes im Testsystem von aussen her mit Helium begast wird.

Sämtliche in Figur 20 positiv gekennzeichneten Verklebungen überstanden auch diesen Test im positiven Sinne.

6.4.2.4 Dichtigkeitsprüfung 3

Die beiden bis dahin durchgeführten Dichtigkeitstest erlauben nur die qualitative Aussage, dass eine bestimmte Verklebung sicher nicht geeignet ist, oder aber dass es sich lohnt diese Art der Verklebung näher zu untersuchen.

Quantitative Aussagen im Sinne von der Menge eindiffundierenden Gases pro Zeiteinheit sind mit einem Helium-Lecktest möglich, bei welchem der Verlauf der Massenspektrometer-Messung über mehrere Tage aufgezeichnet wird.

Die in Abschnitt 10 diskutierten Resultate an Testpanels haben ergeben, dass die Verklebung des Randbandes mit den Grenzplatten im Bereich der Panelecken sehr problematisch sein kann. Aufgrund dieser Erkenntnis haben wir beschlossen, Langzeittest der Gasdichtigkeit erst dann durchzuführen, wenn diese Problematik gelöst ist.

7. Fixierung Distanzhalter an Grenzfläche

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

Im Falle von Parallel-Filament Distanzhaltern (PFD) ist dies kein Problem. Figur 21a zeigt einen PFD der mittels einer Diamanttrennscheibe von einem der in Figur 10 dargestellten Stränge abgetrennt und vorgepresst wurde. Der ca. 12 mm lange PFD nimmt durch das Vorpresen 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 Grenzfläche abgesetzt und - beispielsweise unter Verwendung eines sehr schnell aushärtenden kleinen Tropfens Silikonklebstoff oder mittels Sekundenkleber - fixiert werden.



Fig. 21a Parallel-Filament Distanzhalter



Fig. 21b 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 21b, 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 zeitaufwändige 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 das in Abschnitt 4, Figur 5 besprochene Herstellungsverfahren für BD zu definieren und mit der Herstellung von ca. 200 derartigen BD zu erproben. Mit diesem Verfahren kann aus dem, die Hülle des BD bildenden, Glasflechtschlauch reproduzierbar eine tellerartige Auflagefläche geformt werden (siehe Figur 21b, rechts).

Auf einer derartigen Auflagefläche kann der BD problemlos mittels eines Tropfens Klebstoff fixiert werden.

8. Strahlungsminderung

Der Wärmestrahlung ist beim Aufbau einer Vakuumpalt-Isolation (VSI) grösste Aufmerksamkeit zu widmen. Als Richtgrösse kann festgehalten werden, dass ein äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmestrahlung zwischen zwei Grenzänden aus kaltgewalztem, "glänzenden" austenitischen Edelstahl (Emissionsgrad 0.2 - 0.5) bei Temperaturen bis ca. 400°C etwa 1 W/m²K 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 (Emissionsgrad 0.03 - 0.05) in den Spalt eingebracht, oder werden beide Wände mit Aluminiumfolie beschichtet, reduziert sich der äquivalente Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmestrahlung auf ca. 0.1 W/m²K. 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.

8.1 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 Vakuumpalt 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 ≤ 0.01 mm und sind daher mit quasi biegeschlaffen Folien konfrontiert.

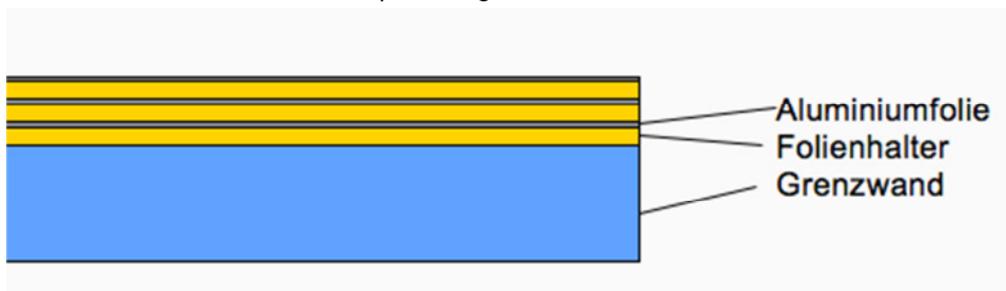


Fig. 22 Prinzipskizze eines Aufbaus zur Strahlungsminderung

Dies bedeutet, dass Folienhalter, welche die Aluminiumfolie gemäss Figur 22 ganzflächig oder nahezu ganzflächig abstützen, zum Einsatz kommen müssen.

8.2 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.

Naheliegender für diesen Zweck wäre eigentlich die Verwendung von pyrogener Kieselsäure oder von entsprechenden, als Kern von VIP eingesetzten Materialien. Dies ist aber aufgrund des, für diesen Zweck viel zu hohen, Preises derselben nicht sinnvoll.

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 23) 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.



Fig. 23 textiles Glasfasergebilde als Folienhalter

8.3 thermisches Verhalten

Eine erste qualitative Messung hat ergeben, dass die Wärmeleitfähigkeit [W/mK] unseres textilen Folienhalters an Luft deutlich geringer ist als diejenige einer EPS-Dämmplatte. Da wir - der dann wegfallenden Wärmeleitung der Luft wegen - erwarten dürfen, dass die Wärmeleitfähigkeit des textilen Folienhalts im Vakuum noch deutlich tiefer ist, ist kann davon ausgegangen werden, dass die gewählte Art des Folienhalters nicht nur eine gute mechanische Fixierung der dünnen Aluminiumfolie, sondern auch ein annähernd vollständige thermische Entkoppelung der Folien sicherstellt.

Diese Annahme hat sich durch die Auswertung der in Kapitel 10 besprochenen Messresultate eines VSI-Testpanels bestätigt.

9. Gettern

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

Derartige Getter sind auf dem Weltmarkt ohne Probleme zu erhalten, womit sich für uns nur 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.

10. Test des Zusammenwirkens aller Bauelemente: VSI-Testpanel

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

Ein weiterführendes Ziel ist, mit dem Aufbau eines möglichst wenig Wärme leitenden, gasdichten kostengünstigen Randverbundes Erfahrungen zu sammeln.

Beide Zielsetzungen sind mit relativ einfachen Hilfsmitteln erreichbar, wenn VSI-Testpanels erstellt und 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 genügend guter Unterdruck aufrechterhalten werden kann

10.1 VSI-Testpanel Aufbau

Damit die Wärmeleitung über den Rand die Einflüsse der anderen Parameter nicht völlig überdeckt, müssen diese Panels erstens eine genügende Grösse aufweisen und zweitens muss das zur Anwendung kommende Randband aus Stahl genügend dünn sein. Wir haben uns entschlossen, ein 1x1 m grosses Panel, unter Verwendung eines 20 µm starken Edelstahl-Randbandes aufzubauen. Den Abstand zwischen den Grenzplatten haben wir auf 10 bis 15 mm festgelegt.

Es hat sich erwiesen, dass die Realisierung eines gasdichten Randes mit diesen Dimensionen keine triviale Aufgabe ist, gehen aber davon aus, dass nach einer entsprechend sorgfältigen Prozessentwicklung ein kostengünstiger, industriell beherrschter Prozess hierfür zur Verfügung gestellt werden kann.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes ist uns der Aufbau eines genügend dichten Panels erst im fünften Anlauf gelungen. Dabei hat jeder einzelne Versuch, der immer wieder notwendigen Denkpausen und Beschaffungszeiten wegen, mehrere Wochen Zeit in Anspruch genommen.

Für den letztendlich erfolgreichen Versuch haben wir einen Aufbau gewählt, welcher einer Modifikation der in Abschnitt 6.1 geschilderten Variante c entspricht. Dort skizziert Figur 13c eine Lösung, bei welcher die Problematik des "um die Ecke führen" des Randbandes deutlich entschärft ist. Die Grenzwände sind in diesem Falle wannenförmig tiefgezogen, so dass ein hoher Rand entsteht, entlang welchem das Randband quasi flach um die gesamte VSI herumgeführt werden kann. Für das Testpanel haben wir zusätzlich an den Panelecken einen Edelstahlwinkel mit den Abmessungen 25x25x1.5 zwischen die beiden Grenzplatten eingeschweisst und so von vorneherein gasdichte Panelecken realisiert. Dies hat den fertigungstechnischen Vorteil, dass das dünne Randband nicht um die Ecken geführt werden muss, womit vermieden wird, dass dasselbe Falten wirft und damit gasdurchlässig wird.

Figur 24 zeigt die Fotografie einer noch offenen, d.h. noch nicht mit Randband versehenen Ecke des Testpanels.

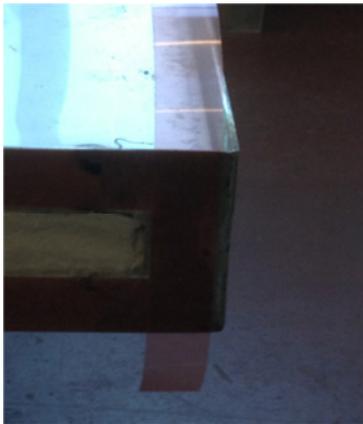


Fig. 24 Offene Ecke des VSI-Testpanels

Zwischen die beiden Grenzplatten wurden 64 Ball-Distanzhalter eingebracht, die unter Druckbelastung einen Durchmesser von ca. 10 mm und eine Höhe von ca. 12 mm aufweisen. Zusätzlich wurde eine auf einen textilen Folienhalter aufgeklebte, dünne Aluminiumfolie eingebracht, welche an den Orten der Distanzhalter mit Durchgangslöchern versehen ist. Figur 25 zeigt ein Foto der unteren der beiden jeweils 1x1 m grossen, 2 mm starken Grenzplatte aus austenitischem Stahl mit Distanzhaltern und Aluminiumfolie.

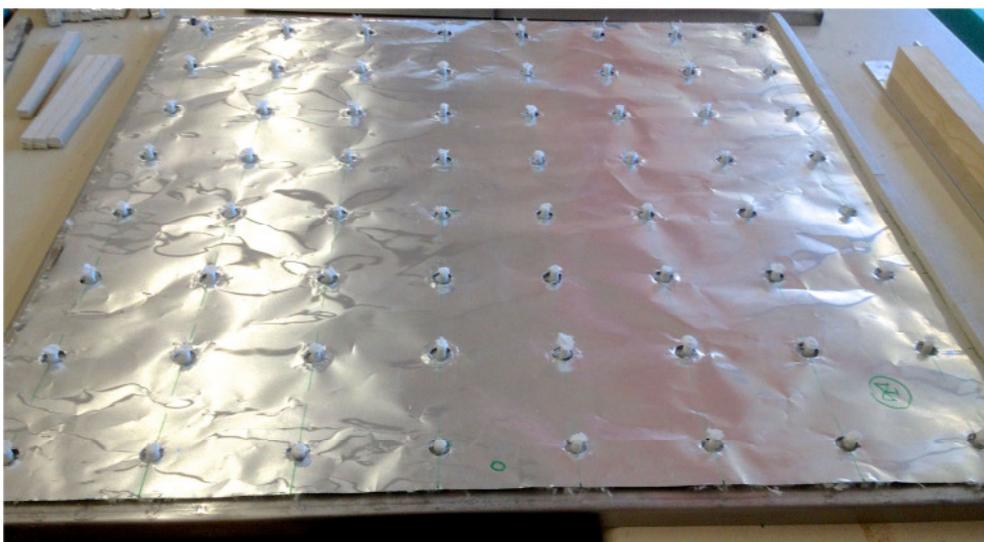
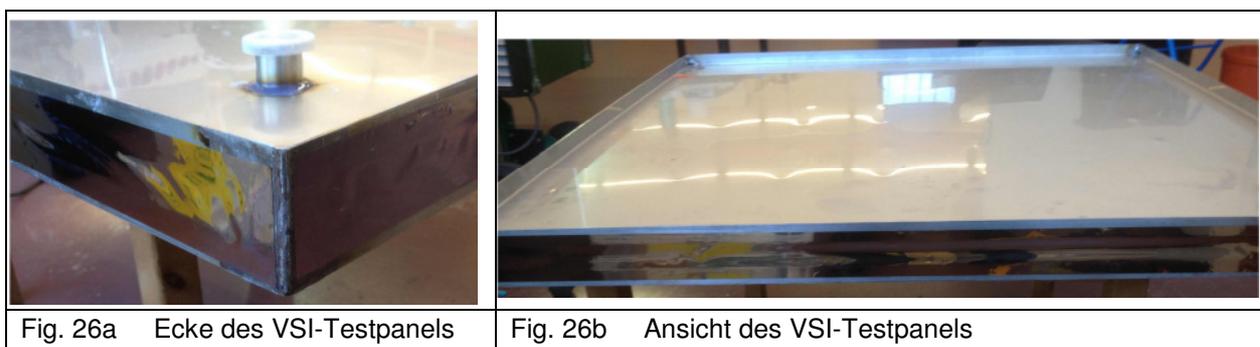


Fig. 25 Foto zur Verdeutlichung des Aufbaus der 1x1 m grossen VSI-Testpanels

Die Ball-Distanzhalter sind im Inneren der VSI so angeordnet, dass der Rand des VSI-Testpanels keine vom Luftdruck erzeugten Kräfte übernehmen muss. Da der Randdistanzhalter deshalb nur die Funktion

der Abstützung des als gasdichtes Randband dienenden, 20 µm starken Stahlbandes übernehmen muss, kann er beispielsweise in Form eines weichen Stranges aus Glasfilamenten aufgebaut sein.

Auf die Ränder der Grenzplatten wurden die 20 µm starken und 50 mm breiten Edelstahlbänder mittels eines im Verlauf dieser Arbeit erprobten Transferklebebands (siehe Abschnitt 6) so aufgeklebt, dass sie jeweils von Ecke zu Ecke laufen. Figur 26a zeigt die Ecke eines auf diese Weise geschlossenen Randes und Figur 26b das entsprechende gesamte VSI-Testpanel. Zusätzlich ist in Figur 26a der zur Evakuierung des Panels notwendige Absaugstutzen mit CF-Flansch sichtbar.



10.2 Messaufbau

Folgende Messungen und auf Messresultaten beruhende rechnerische Abschätzungen und allfällige Verbesserungsmöglichkeiten wurden durchgeführt:

- Messung der Temperaturverteilung im Beharrungszustand an folgenden 1x1 m grossen, einseitig mit konstanter Leistung beheizten Panels:
 - o als Referenz, ein 30 mm dickes VIP-Panel mit bekannter Wärmeleitfähigkeit
 - o das geschilderte VSI-Testpanel
- Rechnerische Abschätzung des gesamten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert, [W/m²K]) der Panels
- Rechnerische Abschätzung der Wärmeleitung durch die Distanzhalter und den Randverbund
- Rechnerische Abschätzung der Wärmeleitung aufgrund der Strahlung
- Daraus resultierend Abschätzung der Wirksamkeit unserer Massnahmen zur Strahlungsminderung
- Rechnerische Abschätzung der Wärmeleitung über den VSI-Rand
- Qualitative Beurteilung der mechanischen Stabilität der VSI-Panels

10.2.1 Messung der Temperaturverteilung

Figur 27 zeigt das Prinzip des verwendeten Messaufbaus zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Beharrungszustand. Ein Block aus XPS-Schaum (1000x1000x300 mm) stellt einen definierten, kleinen Wärmefluss gegen unten sicher. Mittig auf diesem Block ist eine mit Heizfolie bestückte Aluminiumplatte (400x400x10 mm) befestigt. Der Wärmefluss von dieser Heizplatte zu den Seiten hin wird mittels entsprechenden Platten aus XPS-Schaum minimiert. Auf diesen Aufbau werden die zu messenden Isolationsplatten fixiert. Zur Minimierung der Wärmeverluste zu den Seiten hin sind zusätzlich rings um den geschilderten Aufbau 200 mm dick XPS-Platten angeordnet (siehe Fig. 28).

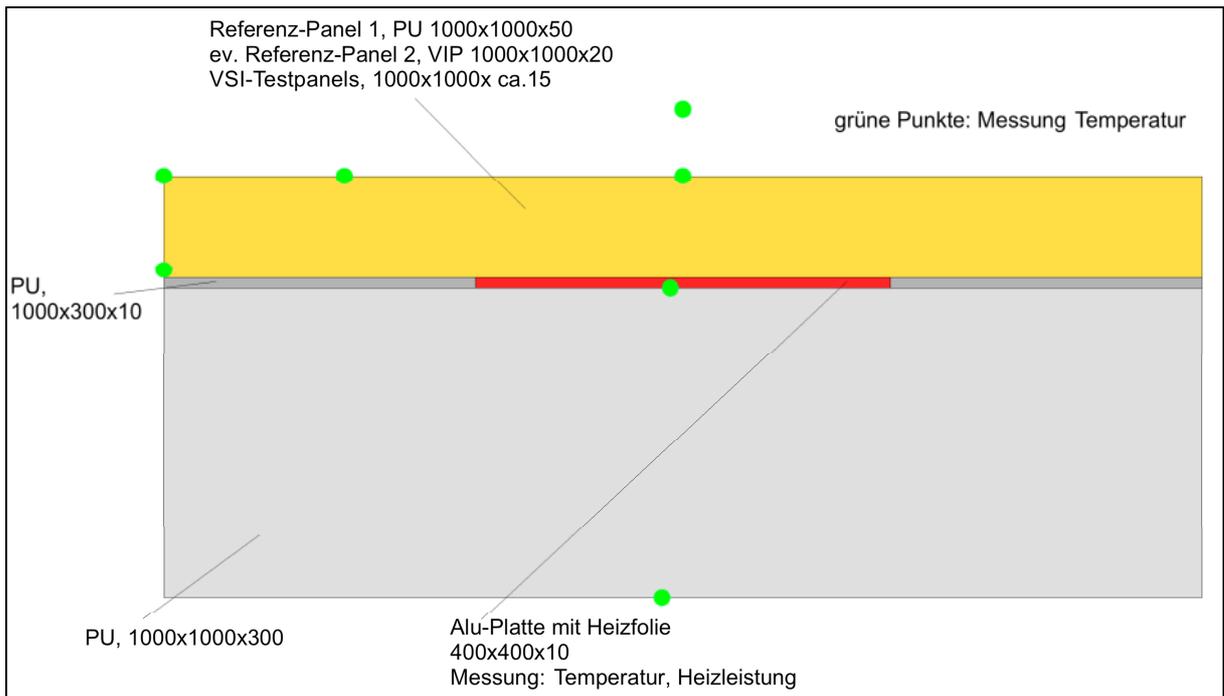


Fig. 27 Prinzipskizze des Messaufbaus "Temperaturverteilung im Beharrungszustand"

Figur 28 zeigt eine Fotografie dieses Messaufbaus mit eingelegtem VSI-Testpanel



Fig. 28 Messaufbau mit VSI-Testpanel

Die Werte, welche mit einem derartigen Aufbau gemessen und aus den Messwerten berechnet werden entsprechen in guter Näherung einer Anordnung von vielen sich gegenseitig um jeweils 300 mm überlappenden VSI bzw. VIP.

Beim Evakuieren des Testpanels konnte nach einigen Stunden Abpumpzeit zunächst ein Restdruck von ca. 10^{-5} mbar erreicht und für ca. eine Stunde aufrecht erhalten werden. Danach erhöhte sich der Restdruck auf $3.4 \cdot 10^{-3}$ mbar und blieb dort während der gesamten Messdauer konstant. Da es problemlos gelungen ist, die in diesem Zustand gemessenen Wert auf den Restdruck $1 \cdot 10^{-5}$ mbar zurück zu rechnen, haben wir auf die zeitintensive Behebung des offensichtlich entstandenen Pinholes verzichtet.

Für die Messung der Temperaturverläufe wurde sowohl beim VSI-Testpanel als auch beim VIP Referenzpanel die Heizleistung so eingestellt und geregelt, dass die Heizplatte eine konstante Temperatur von ca. 65°C beibehält. Figur 29 zeigt entsprechende, am VSI-Testpanel gemessene Temperaturverläufe.

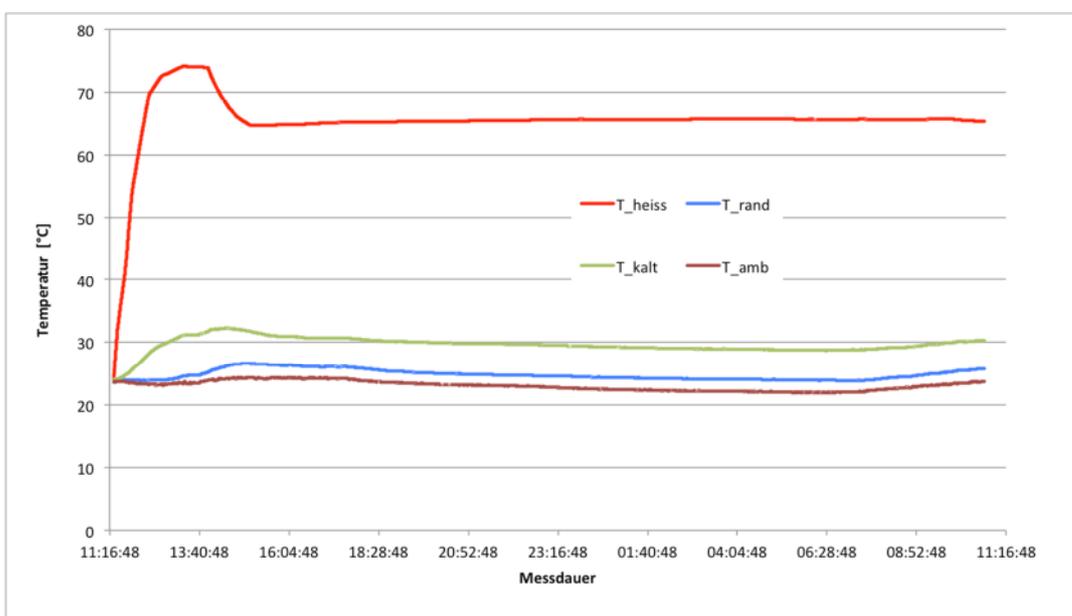


Fig. 29 gemessene Temperaturverläufe am VSI-Testpanel

Die zum Erreichen der Heiztemperatur von 65°C notwendige gesamte Heizleistung betrug im Falle des VIP 2.87 Watt und über das zur Umgebung hin isolierende XPS flossen in diesem Falle 0.22 Watt ab. Bei der Messung des VSI-Testpanels lagen diese Werte bei 16.14 Watt bzw. bei 0.24 Watt.

Tabelle 7 zeigt die als Differenz dieser Werte berechnete Verlustleistungen durch das Innere und über die Ränder des VSI-Testpanel bzw. des VIP, sowie die daraus ableitbaren Wärmedurchgangskoeffizienten U und Wärmeleitwerte λ . Es muss betont werden, dass diese U - und λ -Werte nur von der Größenordnung her mit den der Norm entsprechenden - und im Falle von VIP in Datenblättern ausgewiesenen - Werten verglichen werden können. Unser Messaufbau entspricht keinesfalls einem normgerechten Aufbau, sondern soll nur Vergleichswerte zwischen VIP und VSI liefern.

Der in Tabelle 7 verwendete massgebliche Temperaturunterschied ΔT ist ein Mittelwert aus mit den entsprechenden Flächen gewichteten gemessenen Temperaturen. Der Wärmedurchgangskoeffizient U berechnet sich damit als Quotient der Verlustleistung und diesem massgeblichen ΔT . Der äquivalente Wärmeleitwert wurde berechnet, um die Auswirkung der unterschiedlichen Dicken des VIP und des VSI-Testpanels erkennbar zu machen. Er berechnet sich als Multiplikation von U und der Dicke.

	Dicke	ΔT	Verlust Leistung	Wärmedurchgangskoeffizient U	äquivalenter Wärmeleitwert λ	Bemerkung 1	Bemerkung 2
	[mm]	°C	[W]	W/m ² K	W/mK		
VIP-Messung	30	23.6	2.65	0.112	0.0034		
VSI-Messung (Test-Aufbau)	12	29.3	15.90	0.542	0.0065	Innendruck: $3.4 \cdot 10^{-3}$ mbar	Grenzplatte: 2 mm Inox
VSI-Rechnung (Test-Aufbau)	12	29.3	15.93	0.543	0.0065	Innendruck: $3.4 \cdot 10^{-3}$ mbar	Grenzplatte: 2 mm Inox
VSI-Rechnung (Verbesser. 1)	12	29.3	10.34	0.352	0.0042	Innendruck: 10^{-5} mbar	Grenzplatte: 2 mm Inox
VSI-Rechnung (Verbesser. 2)	12	29.3	2.14	0.096	0.0012	Innendruck: 10^{-5} mbar	Grenzplatte: Sandwich mit 1 mm Glas
VSI-Rechnung (Verbesser. 3)	12	29.3	1.12	0.044	0.0005	Dist'halter und Rand optimiert	3 Alufolien statt einer

Tab 7 Gemessene Verlustleistungen und Temperaturunterschiede und daraus berechnete Werte (U- und λ -Werte nicht normgerecht sondern nur zu Vergleichszwecken)

Es ist nicht erstaunlich, dass das von uns aufgebaute VSI-Testpanel mit Restdruck $3.4 \cdot 10^{-3}$ mbar bei einer Heiztemperatur von 65°C eine 6-mal grössere Verlustleistung aufweist als das gemessene VIP. Wie aus den in Tabelle 8 zusammen gestellten Berechnungen der einzelnen Komponenten der Verlustleistung ersichtlich ist, stammt dieser hohe Wärmetransport zum wesentlichen Teil von der Wärmeleitung über das Restgas und über den - die Grenzplatten enthaltenden - Rand.

Wie in den Tabellen 7 und 8 sichtbar ist, kann das VSI-Panel wesentlich verbessert werden.

Eine erste - selbstverständliche - Verbesserung ist das dauerhafte Einhalten eines Restdruckes von 10^{-5} mbar, womit der Wärmefluss über das Restgas von ca. 5 Watt auf ca. 0.02 Watt reduziert werden kann.

	Verlust Leistung total	Verlust Leistung Restgas	Verlust Leistung Strahlung	Verlust Leistung Dist'halter	Verlust Leistung Rand
	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
VSI-Rechnung (Test-Aufbau)	15.93	5.09	0.82	1.32	8.70
VSI-Rechnung (Verbesserung 1)	10.34	0.019	0.82	1.32	8.70
VSI-Rechnung (Verbesserung 2)	2.14	0.019	0.82	1.32	0.50
VSI-Rechnung (Verbesserung 3)	1.12	0.019	0.30	0.34	0.46

Tab. 8 berechnete einzelne Komponenten der Verlustleistung des VSI-Panels

Eine zweite Verbesserung betrifft den Aufbau der Grenzplatten. Für die in den Tabellen dargestellten Werte sind wir davon ausgegangen, dass die für das VSI-Testpanel eingesetzte 2 mm starke Grenzplatte aus austenitischem Stahl auf der heissen Seite des Panels durch eine Sandwichplatte aus 2x 1mm Glas ersetzt sei. Im Falle der durch unsere Messungen und Berechnungen simulierten Überlap-

pung mehrerer Panels um 300 mm reduziert sich dann der Wärmeverlust über den Rand von 8.7 Watt auf 0.5 Watt, womit die Werte des 30 mm dicken VIP bereits leicht unterschritten wären.

Die dritte berechnete Verbesserung beinhaltet mehrere Massnahmen. Zunächst wurde davon ausgegangen, dass nur 48 statt wie im VSI-Testpanel 64 Ball-Distanzhalter zum Einsatz kommen. Weiter wurde angenommen, die Dimensionen der an den Ecken des VSI-Testpanels eingeschweissten festen Verbindung zwischen den Grenzplatten betragen 15x15x0.5 mm statt 25x25x1.5 mm. Und zusätzlich wurde von 3 strahlungsmindernden Folien statt nur einer ausgegangen. Mit diesen Massnahmen liesse sich die gesamte Verlustleistung auf ca. 1.1 Watt reduzieren.

Bezüglich dem wesentlichen Ziel dieses Projektes, dem Nachweis der Tauglichkeit der weiter oben diskutierten Bauelemente Distanzhalter und Strahlungsminderung, kann folgendes festgehalten werden:

- Die in den Tabellen 7 und 8 zusammengefassten Berechnungen für den Wärmetransport über das Restgas und den Rand sind mit grosser Sicherheit korrekt, weil für diese beiden Komponenten auf wohl bekannte Vergleichswerte und Parameter zurückgegriffen werden kann.
- Damit ist klar, dass sich der durch Wärmestrahlung und Distanzhalter erzeugte Beitrag zum Wärmetransport im erwarteten Rahmen hält.
- Dies bedeutet insbesondere, dass der von uns gewählte Folienhalter die eine, im VSI-Testpanel zur Strahlungsminderung eingebaute Aluminiumfolie thermisch annähernd vollständig von der Grenzwand entkoppelt. Damit ist die Funktionsfähigkeit dieses Aufbaus bewiesen.
- Weiter bedeutet dies, dass auch die Distanzhalter sich im eingebauten und evakuierten Zustand thermisch so wie erwartet verhalten.

10.2.2 Mechanische Stabilität

Im Laufe der Versuche, eine gasdichte Verbindung zwischen dem Randband und den Grenzplatten eines 1x1 m VSI zu erstellen, wurden über kürzere Zeiten (ca. 1 Stunde) Unterdrücke bis zu 10^{-5} mbar und dauerhaft $3.4 \cdot 10^{-3}$ mbar erreicht. Damit sind alle Komponenten des VSI-Testpanels dauerhaft mindestens 99.99967% der durch den Luftdruck erzeugten mechanischen Belastung von 10 Tonnen pro Quadratmeter ausgesetzt.

Alle Komponenten, d.h. die Grenzplatten, die Distanzhalter und das vom Randdistanzhalter abgestützte 20 µm dicke Stahlband, haben nicht nur dem Luftdruck problemlos standgehalten, sondern auch mehrfachen Transporten und 180° Wendungen des Panels.

Es darf festgehalten werden, dass der gewählte VSI Aufbau in Sinne mechanischer Belastbarkeit genügend robust ist.

Bewertung und Ausblick

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 konnten Herstellvorrichtung für diese Elemente konzipiert und gebaut werden. Sowohl Ball-Distanzhalter (BD) als auch Parallel-Filament Distanzhalter (PFD) wurden bezüglich ihrer Druckfestigkeit und ihrer Wärmeleitfähigkeit im Vakuum messtechnisch geprüft.

Für die BD lassen sich die Resultate wie folgt zusammenfassen:

- Es lassen sich Ball-Distanzhalter (BD) herstellen, bei welchen die Höhe deutlich grösser ist als der Durchmesser, d.h. die eine fast säulenförmige Gestalt haben. Beispielsweise können BD mit \varnothing 8 mm und Höhen von ca. 6 mm bis ca. 20 mm hergestellt werden.
- Mit einer geeigneten Fertigungsvorrichtung lassen sich die fast säulenförmigen BD so herstellen, dass an ihren Enden eine quasi fächerförmige ebene Auflagefläche entsteht, auf welcher sie problemlos an den VSI-Grenzwänden befestigt werden können.
- Es zeigt sich, dass BD mit nominellem \varnothing 8 mm (Querschnittsfläche ca. 50 mm^2) unter Einbezug der entsprechenden Sicherheiten einer Druckkraft von 2500 N, d.h. einem Druck von ca. 50 N/mm^2 , ausgesetzt werden können. Dies entspricht einem Distanzhalterabstand von 160 mm (49 BD/m^2) im Innern einer VSI. Höhere zulässige Druckkräfte - und damit grössere Distanzhalter Abstände - können mit grösseren Durchmessern der Ball-Distanzhalter realisiert werden.
- Die Wärmeleitfähigkeit der BD liegt zwischen 0.045 und 0.05 W/mK , was zu einem äquivalente Wärmedurchgangskoeffizienten U_{BD} durch die Summe der BD von $\leq 0.015 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei 10 mm Höhe führt, und damit das angestrebte U_{total} von $\leq 0.08 \text{ W/m}^2\text{K}$ nicht verunmöglicht.
- Diese Werte konnten durch das gebaute und bei einem Unterdruck von $3.4 \cdot 10^{-3}$ mbar ausgemessene VSI-Testpanel bestätigt werden.

Damit hat diese Arbeit den Beweis erbracht, dass BD den Anforderungen einer VSI genügen und mit relativ einfachen Vorrichtungen kostengünstig hergestellt werden können.

Für PFD gelangen wir zu folgenden Resultaten:

- Der für die Herstellung von PFD entscheidende Vorgang des Umwindens der vielen Tausend parallel verlaufenden Glasfilamente mit einem geeigneten Umwindungsmaterial ist mit der von uns gebauten oder einer ähnlichen Vorrichtung problemlos und kostengünstig auch in Serienfertigung durchführbar. Auch die Trennung der so gefertigten PFD-Stränge in z.B. 2 cm lange Teilstücke ist problemlos realisierbar.
- Die geforderte Druckfestigkeit eines PFD in Querrichtung von ca. 50 N/mm^2 ist mit dünnem Umwindungsmaterial, wie beispielsweise 66 tex Glasfilament-Fäden aus s2-Glas, nicht erreichbar. Es hat sich gezeigt, dass mit einer Umwindung aus 240 tex Glasfilament-Roving mit einer Steigung von 1 mm/Umdrehung lediglich eine Druckfestigkeit von knapp 20 N/mm^2 resultiert.
- Aufgrund dieser relativ kleinen Druckfestigkeit ergeben sich mit PFD in Summe deutlich höhere äquivalente Wärmedurchgangskoeffizienten $[\text{W/m}^2\text{K}]$ als mit BD, so dass PFD - zumindest momentan - nur zweite Wahl sind.

Bezüglich thermisch guter und trotzdem kostengünstiger Randaufbauten hat sich gezeigt, dass der Ansatz ein ca. 20 μm dickes Strahlband als gasdichte Verbindung der beiden VSI Grenzwände zu verwenden, prinzipiell richtig ist.

Eine Überbelastung des Stahlbands durch den Luftdruck kann auf kostengünstige Weise erfolgen, indem die punktförmigen Distanzhalter im Innern der VSI (Vakuumpalt-Isolation) so angeordnet sind, dass die Grenzwände am Rand keinen Druck ausüben. Dies ermöglicht es, den auf das Randband wirkenden Luftdruck mittels eines weichen Strangs aus parallel verlaufenden Glasfasern abzufangen und so einen gesamthaft thermisch sehr guten Randverbund zu gewährleisten.

Es konnte gezeigt werden, dass so - in Kombination mit Ball-Distanzhaltern - mechanisch robuste VSI aufgebaut werden können.

Die kostengünstige Verbindung von dünnem Stahlband und Grenzplatten ist noch nicht vollständig gelöst. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Verbindung beim Einsatz von Grenzwänden aus Stahl mittels Hartlöten langfristig gasdicht und auch kostengünstig herstellbar ist. Da aber aus preislichen Gründen Grenzwände, die mindestens teilweise aus Floatglas bestehen, von hohem Interesse sind, sind andere Verbindungsverfahren gesucht, welche auch die Kombination von Glas und Stahl erlauben.

In dieser Hinsicht haben unsere ausführlichen Versuche gezeigt, dass eine Verklebung von Randband und Grenzplatte - unter Verwendung unterschiedlicher Klebstoffe - gasdicht möglich ist. Gelingen ist dies entlang den geraden Kanten einer panelartigen VSI. Noch nicht gelöst hingegen ist die Eck-Problematik, bei welcher bisher eine, von pinhole-artige Gaskanälen verursachte, Gasdurchlässigkeit die VSI versagen lassen.

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

Der Bau und die thermische Messung eines 1x1 m grossen VSI-Testpanels hat gezeigt, dass alle Bauteile den mechanischen Belastungen durch den Luftdruck und den Transport des Testpanels standhalten. In thermischer Hinsicht erfüllen die beiden Komponenten Ball-Distanzhalter und Strahlungsminderung mittels Folienhalter und Aluminiumfolie die Erwartungen. Auch der gewählte Randverbund vermag mit geringfügigen Verbesserungen in thermischer Hinsicht den Erwartungen zu entsprechen.

Hinsichtlich der dauerhaften Gasdichtigkeit des Randverbundes mit einem höchsten 20 µm, besser aber nur 10 µm starken Stahlband ist noch beträchtliche Entwicklungsarbeit zu leisten. Dies gilt in besonderem Masse dann, wenn die mit dem Randband gasdicht zu verbindenden Grenzwände aus thermischen und preislichen Gründen nicht aus Stahl sondern beispielsweise aus Glas sein sollen.

Weitere Entwicklungsarbeit ist in Richtung der Auswahl kostengünstiger und wenig ausgasender Materialien bzw. Materialkombinationen für die Grenzwände zu leisten.

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 Vakuumisoliationsverglasung, Matthias M. Koebel, Heinrich Manz, Abteilung Bautechnologien, Empa, Dübendorf