



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Jahresbericht 26. November 2010

Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte – Technologieabklärungen für Vakuumpanels

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -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-Vertrags- und Projektnummer: SI/500552, SI/500552-03

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

Zusammenfassung

Im Rahmen der vom Bundesamt für Energie mitfinanzierten, vom September 2009 bis Mai 2010 durchgeführten Machbarkeitsstudie "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte" (BFE Projekt Nr. 103290) hat sich ergeben, dass die Weiterverfolgung des Unterprojekts "Hocheffiziente Isolation von kubischen Kühlschränken" prinzipiell lohnenswert ist.

Die dort gemachten Berechnungen sind jedoch rein theoretischer Natur und konnten bis Abschluss der Machbarkeitsstudie nicht durch Messungen verifiziert werden.

Im vorliegenden Projekt soll dies geschehen, und zwar so, dass die Resultate zwar ganz allgemein auf Vakuumpanels anwendbar sind, die für Helbling Technik aber wichtige Anwendung für kubische Kühlschränke mitbetrachtet wird.

Dazu werden die für Vakuum-Panels entscheidenden Bauelemente "Distanzhalter" und "Randverbund" untersucht, wobei man sich auf einen Ansatz beschränkt, bei welchem die hohen Druckbelastungen in Zug umgewandelt werden. Das verfolgte Prinzip ist das Ballprinzip, bei welchem ein durch Druck deformiertes Kernmaterial im Ballinneren den Mantel des Balls unter Zug bringt. Ein entsprechender Gedanke lässt sich auch auf einen neuartigen Randverbund für Vakuumpanels anwenden.

Die innerhalb der bisherigen Projektdauer von ca. einem Monat durchgeführten Arbeiten ergaben sehr viel versprechende Resultate, nach denen davon ausgegangen werden kann, dass die angesprochenen Bauelemente nicht nur sehr kostengünstig hergestellt, sondern auch mit genügender mechanischer Festigkeit bei gleichzeitiger geringer Wärmeleitung realisiert werden können.

Projektziele

Im Rahmen der vom Bundesamt für Energie mitfinanzierten, vom September 2009 bis Mai 2010 durchgeführten Machbarkeitsstudie "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte" (BFE Projekt Nr. 103290) konnte bezüglich der Isolation von kubischen Kühlschränken folgende Zusammenfassung gemacht werden:

Ein neuer Ansatz für die bei einem kubischen Kühlschrank benötigten Distanzhalter im Vakuum-Spalt wurde erarbeitet, bei welchem die hohen Druckkräfte in Zugkräfte umgewandelt werden. Dies war notwendig, weil bei einem Funktionsmuster die auf Druck belasteten Distanzhalter schon bei geringen zusätzlichen Querkräften brachen. Berechnungen mittels analytischen und FEM-Modellen zeigen, dass sich mit geeigneten Zugelementen Kühlschränke aufbauen lassen, bei denen die spezifische Verlustleistung auf 40 bis 50% derjenigen eines mittleren A++-Kühlschranks gesenkt werden kann und die darüber hinaus bei identischen Aussenabmessungen ein um ca. 40% grösseres Nutzvolumen aufweisen.

Damit ist klar, dass die Weiterverfolgung des Unterprojekts "Hocheffiziente Isolation von kubischen Kühlschränken" prinzipiell lohnenswert ist. Dies umso mehr, als sich die Resultate einer entsprechenden Untersuchung auf beliebige panelartige Aufbauten übertragen lassen (im Folgenden ist deshalb nur noch von Vakuumpanels die Rede).

Die angesprochenen Berechnungen sind jedoch insofern rein theoretischer Natur, als die Festigkeits- und Wärmeleitfähigkeitswerte aus entsprechenden Datenblättern stammen und bis Abschluss der Machbarkeitsstudie nicht durch Messungen verifiziert werden konnten.

Im vorliegenden Projekt soll dies geschehen, und zwar so, dass die Resultate zwar ganz allgemein auf Vakuumpanels anwendbar sind, die für Helbling Technik aber wichtige Anwendung für kubische Kühlschränke mitbetrachtet wird.

Im Projektantrag wurde davon ausgegangen, dass Distanzhalter untersucht werden, welche die Form von verspannten Filamenten haben, die wiederum von an den Deckplatten des Vakuumpanels befestigten stempelartigen Elementen unter Zug gesetzt werden.

Ein gründliches Nachdenken in der Zeit zwischen Antragsstellung und Projektbeginn hat uns aber zur Überzeugung gebracht, dass ein anderer Ansatz zur Umsetzung der Idee Wandlung von Druck- in Zugbelastung wesentlich viel versprechender ist, nämlich die Verwendung des Ballprinzips, bei welchem ein durch Druck deformiertes Kernmaterial im Ballinneren den Mantel des Balls unter Zug bringt. Ein entsprechender Gedanke lässt sich auch auf einen neuartigen Randverbund für Vakuumpanels anwenden.

Damit ergeben sich für das vorliegende Projekt folgende Zielsetzungen:

1. Vorbereitende Tätigkeiten

- 1.1 Erarbeitung eines neuen Distanzhalterkonzeptes: "Ball-Distanzhalter"
- 1.2 Literatur- und Patentrecherche, Analyse
- 1.3 Bewertung unterschiedlicher Distanzhalterkonzepte

2. Evaluation des gewählten Konzeptes "Ball-Distanzhalter"

- 2.1 Definition möglicher Materialien
- 2.2 Idee zur industriellen Herstellung
- 2.3 Abklärung der Materialverfügbarkeit und Materialbeschaffung
- 2.4 Vorversuche mit diesen Materialien
- 2.5 Analytische Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit und der Wärmeleitung

3. Evaluation eines entsprechend aufgebauten Vakuumpanels

- 3.1 Konzept neuartiger, entsprechender Randverbund
- 3.2 Vorentwurf eines entsprechenden Panels
- 3.3 Analytische Abschätzung mechanische Festigkeit und Wärmeleitung
- 3.4 Vergleich mit bisher untersuchten Panelaufbauten

4. Versuche

- 4.1 Versuchsaufbauten planen, bauen und in Betrieb nehmen
- 4.2 Physikalische Eigenschaften der Ball-Distanzhalter und, wenn möglich, des neuartigen Randverbundes prüfen
 - 4.2.1 Mechanische Festigkeit in Abhängigkeit der Temperatur
 - 4.2.2 Kriechverhalten bei Einsatztemperatur
 - 4.2.3 Ausgasverhalten unter Vakuum

Zielsetzungen Milestones:

Milestone 1 (25.02.2011)

Die Punkte 1, 2, 3 und 4.1 sind erledigt.

Projektende 19.07.2011

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Folgende Arbeiten wurden seit dem Projektbeginn (29.10.10) durchgeführt:

1. Vorbereitende Tätigkeiten

- 1.1 Erarbeitung eines neuen Distanzhalterkonzeptes: "Ball-Distanzhalter"
- 1.2 Literatur- und Patentrecherche, Analyse
- 1.3 Bewertung unterschiedlicher Distanzhalterkonzepte

2. Evaluation des gewählten Konzeptes "Ball-Distanzhalter"

- 2.1 Definition möglicher Materialien
- 2.2 Idee zur industriellen Herstellung
- 2.3 Abklärung der Materialverfügbarkeit und Materialbeschaffung
- 2.4 Vorversuche mit diesen Materialien
- 2.5 Analytische Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit und der Wärmeleitung

3. Evaluation eines entsprechend aufgebauten Vakuumpanels

- 3.1 Konzept neuartiger, entsprechender Randverbund
- 3.2 Vorentwurf eines entsprechenden Panels
- 3.3 Analytische Abschätzung mechanische Festigkeit und Wärmeleitung
- 3.4 Vergleich mit bisher untersuchten Panellaufbauten

1. Vorbereitende Tätigkeiten

- 1.1 Erarbeitung eines neuen Distanzhalterkonzeptes: "Ball-Distanzhalter"

Die in Bild 1 dargestellte Prinzip-Skizze zeigt ein ballartiges Gebilde mit leicht deformierbarem Kernmaterial und mit zugfestem Mantel, das zwischen zwei plattenförmigen Elementen unter Druck steht. Es ist offensichtlich, dass dieser Druck zu einer Deformation des Kernmaterials führt, das seitlich ausweichen will und damit den Mantel unter Zugbelastung stellt.

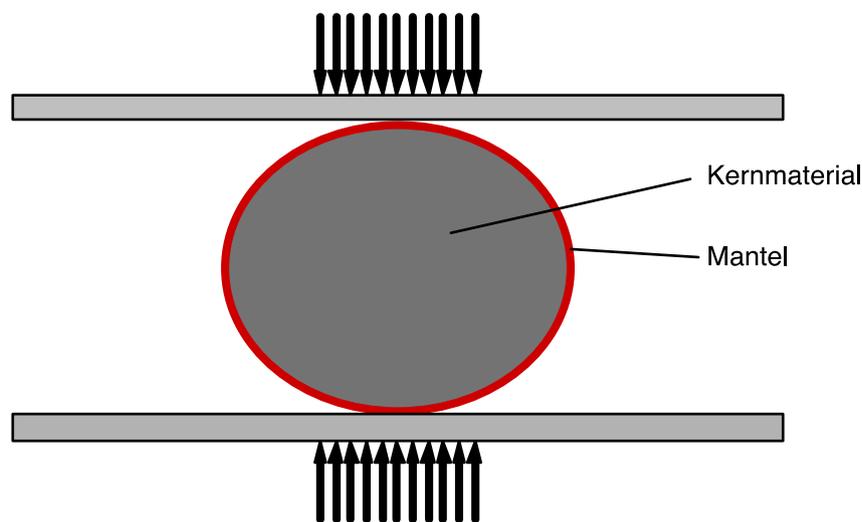


Bild 1: Prinzip-Skizze Ball-Distanzhalter

Die Umwandlung der durch den Luftdruck in einem Vakuumpanel ausgelösten Druckkräfte in eine Zugbelastung ist deshalb von Vorteil, weil sehr viele Materialien existieren, die hohe Zugkräfte aufnehmen können, und weil darüber hinaus bei reinen Zugbelastungen kein Knicken und keine Beulen auftreten. Mit in sich sehr stabilen ballartigen Elementen können diese Vorteile hervorragend genutzt werden.

Es scheint zunächst naheliegend, das Konzept Ball-Distanzhalter so umzusetzen, wie dies beispielsweise in einem Fussball geschieht, nämlich mit einem Gas als Kernmaterial und einer gasdichten Hülle. Vorteilhaft in diesem Falle erscheint natürlich die Verwendung eines Gases mit geringer Wärmeleitfähigkeit, also beispielsweise mit den aus dem Bau moderner Fenster hinlänglich bekannten Gasen Xenon oder Krypton.

Bereits bei nicht allzu ausführlicher Betrachtung verbietet sich diese Art der Umsetzung, weil erstens die Wärmeleitfähigkeit der angesprochenen Gase für unseren Zweck immer noch zu hoch ist, wir zweitens nicht mit knapp werdenden Materialien arbeiten wollen und drittens vor allem die Ball-Distanzhalter im Hochvakuum zum Einsatz kommen sollen und deshalb zu befürchten ist, dass derartige Gas-Bälle ein virtuelles Leck bilden und damit das gewünschte Vakuum nicht über lange Zeit gehalten werden kann. Natürlich könnte ein theoretisch absolut gasdichter Mantel unter Verwendung von Stahlfolien hergestellt werden. Dies wäre aber nicht nur schwierig zu realisieren und vermutlich teuer, sondern es würde eine viel zu hohe Wärmeleitfähigkeit des Mantels resultieren.

Man muss also nach einer anderen, unproblematischen Art der Umsetzung des Konzeptes Ball-Distanzhalter Ausschau halten.

Nach einiger Überlegung drängen sich pulverartige und deshalb genügend leicht deformierbare Kernmaterialien auf. Zusätzlich soll das Kernmaterial in dem Sinne Vakuum-tauglich sein, dass es im evakuierten Zustand eine sehr niedrige Wärmeleitung aufweist, und dass es das Vakuum nicht durch Ausgasen gefährdet.

Damit man diese Eigenschaften nutzen kann, gilt es einen Mantel zu definieren, der nicht nur unter hohem Innendruck nicht reißt und auch das pulverförmige Material zurückhält, sondern der auch völlig gasdurchlässig ist, damit das Kernmaterial bei der Evakuierung des Vakuum-Panels ebenfalls evakuiert wird. Zusätzlich muss der Mantel auch eine sehr geringe Wärmeleitung aufweisen und nicht (stark) ausgasen. Mögliche Lösungen dieser Aufgabe sind in Abschnitt 2.2 beschrieben.

1.2 Patentrecherche und Analyse

Mit den Suchbegriffen refrigerator, vacu* und insul* in Titel oder Zusammenfassung wurden 777 Patente gefunden.

Die zusätzliche Einführung des Begriffs "spacer" führte zu 9 Treffern, die aber in unserem Sinne nicht von Interesse sind.

Mit F16L59/065 (thermal insulation in general, using vacuum) als Klassifikation zeitigte 1455 Treffer. Eine Einschränkung mit "spacer" als Suchbegriff ergab noch 24 Treffer.

500 der gefundenen Patente wurden durchgeblättert und die Wichtigen analysiert.

Es ergab sich folgendes Bild:

In den letzten Jahren wurden – hauptsächlich von japanischen und chinesischen Firmen – sehr viel Ansätze patentiert, bei welchen irgend eine Art von VIPs, also von in sich selbst gasdichten Panels mit einer flexiblen Hülle aus Mehrschicht Kunststoff oder Ähnlichem und geeignetem Kernmaterial, zur Verbesserung der Isolation von Kühlschränken zum Einsatz kommen.

In fast allen Fällen werden für Kühlschränke die VIPs zwischen den Kühlschrankwandungen in Schaumstoff integriert.

Bei vielen dieser Patente werden neuartige Kernmaterialien beschrieben. Favorit hierbei sind Filament-Materialien, bei welchen lange, meist anorganische Filamente in lateraler Richtung des Panels verlaufen, womit in Querrichtung eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit entsteht.

Ansätze mit gasdichter Doppelwandung, bei welchen der Vakuum-Spalt mittels einiger weniger Distanzhalter sichergestellt wird, wurden in den von uns gesichteten Patenten nicht beschrieben. Allerdings sind uns aus langjähriger Erfahrung einige derartige Ansätze bekannt, bei welchen immer rein auf Druck belastete Distanzhalter, beispielsweise dünne Kunststoff-Plättchen, verwendet werden.

Aus der Literatur ist weiter ein Ansatz* bekannt, bei welchem Spannfilamente als Distanzhalter zum Einsatz kommen. In dem zitierten Artikel erwähnt der Autor 20 entsprechende Patentanmeldungen, die aber bisher noch nicht veröffentlicht sind.

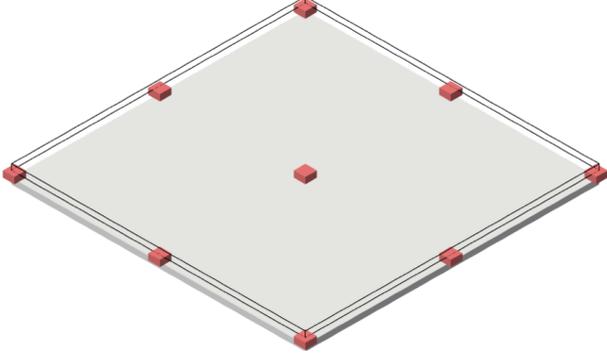
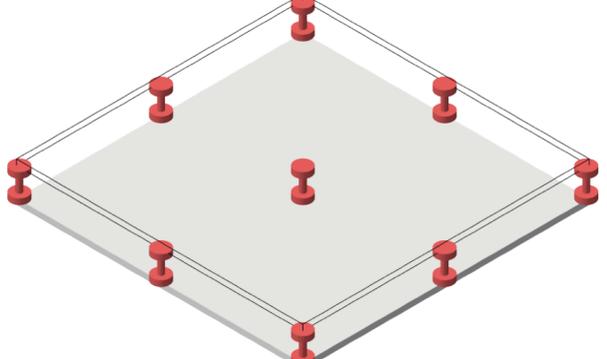
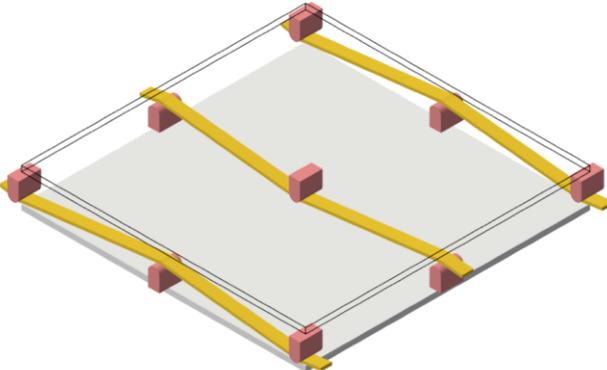
Der Ansatz des Autors ist insofern von hohem Interesse, dass er mit dem von Helbling unabhängig entwickelten, in Vorgängerprojekt HIH1 "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten" dargestellten und im folgenden Abschnitt bewerteten Ansatz mit Spannfilamenten nahezu identisch ist.

Ein Distanzhalter Ansatz, der dem geschilderten Ball-Distanzhalter nahe kommt, konnte in der gesichteten Literatur nicht gefunden werden.

* Viktor Schatz, Zugkraft-Lastenträger für Vakuumisolation, vip-journal.de, Vol.22 Nr.4, August 2010

1.3 Bewertung unterschiedlicher Distanzhalterkonzepte

Um sicher zu stellen, dass es lohnend ist, den beschriebenen neuen Ansatz für Distanzhalter vertieft weiter zu verfolgen, wurde dieser den in Tabelle 1 beschriebenen anderen Varianten gegenüber gestellt.

| | Distanzhalter Variante | Aufbau |
|--|--|--|
| reine Druckbelastung der Distanzhalter | <p>Kunststoff Plättchen</p> <p>zur Querschnittsfläche dünne, tragfähige Plättchen aus schlecht wärmeleitendem Kunststoff, beispielsweise aus PET</p> |  |
| | <p>Schlanke Stäbe</p> <p>sehr schlanke Stäbe beispielsweise aus hoch druckfester Keramik mit geringer Wärmeleitfähigkeit mit plattenartigen Elementen z.B. aus Stahl zur Druckverteilung</p> |  |
| Wandlung von Druck in Zug | <p>Filament-Verspannung</p> <p>stempelartige Elemente drücken auf längs verspannte zugfeste Filamente mit geringer Wärmeleitfähigkeit</p> |  |

| | |
|--|--|
| <p>Bälle</p> <p>ballartige Elemente mit zugfester dünner Hülle und einem verformbaren Kernmaterial, beide Elemente aus Material mit geringer Wärmeleitfähigkeit</p> | |
|--|--|

Tabelle 1: Aufbau der betrachteten Distanzhalter-Varianten

Die in der folgenden Tabelle 2 eingetragenen Werte beruhen zum Teil auf Erfahrungswerten aus industriellen Projekten vom Jahre 1999 und später oder auf Resultaten des Vorgänger-Projektes HIH1 "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten" und weitergeführten Überlegungen. Bezüglich des Ballprinzips nehmen sie die Resultate von später in diesem Bericht geschilderter Untersuchungen vorweg.

| | Kunststoff Plättchen | Wert | schlanke Stäbe | Wert | Filamentverspannung | Wert | Ballprinzip | Wert |
|--|--------------------------|---------|---|---------|-------------------------------|---------|---|---------|
| Beschreibung Distanzhalteraufbau | z.B. gestanzte Plättchen | 0 bis 6 | schlanke Stäbe mit kleiner Wärmeleitfähigkeit | 0 bis 6 | verspannte zugfeste Filamente | 0 bis 6 | ballartige Elemente mit zugfester Hülle | 0 bis 6 |
| Material 1 | 0.5 bis 1 mm PET-Folie | | ZrO2 | | S2-Glas Rovings | | fumed silica Pulver | |
| Wärmeleitung Mat.1 (evakuiert) W/mK | 0.15 | | 2.0 | | 1.24 | | 0.005 | |
| Material 2 | | | hochfester Stahl | | Druckkern aus Stahlblech | | Glasfaser-schlauch | |
| Wärmeleitung Mat.2 W/mK | | | | | | | 0.89 | |
| Abmessung Dist'halter mm | Ø 1.13 | | Ø 2 | | Roving Ø 0.3 | | Ø 4 | |
| Querschnittsfläche mm ² | 1 | | 3.14 | | | | 9.62 | |
| Vakuumpalt-höhe mm | 1 | | 10 | | 15 | | 5 | |
| Wärmeleitweg mm | 1 | | 6 | | 33 | | 5 | |
| Distanzhalterabstand mm | 50 | | 150 | | 33.3 | | 125 | |
| Kraft auf Dist'halter N | 250 | | 2250 | | | | 1562 | |
| Druck bzw. Zug N/mm ² | 250 | 2 | 716 | 6 | 244 | 6 | 622 | 6 |
| theor.max.zul. Druck Zug N/mm ² | 100 (Versuche bis 300) | | 2500 (ZrO2), 1000 (Stahl) | | 1080 | | 1800 (zul max Zug Glasroving) | |
| max. zul. Temperatur °C | 50 | 1 | >600 | 6 | >400 | 6 | >400 | 6 |
| Wärmeleitung W/m ² K | 0.05 | 2 | 0.04 | 3 | 0.01 | 6 | 0.02 | 5 |

| | | | | | | | | |
|--------------------------|------------------------------|------|----------------------|---|-------------------------------------|------|---------------------------------------|------|
| Langzeitverh. Vakuum | unbekannt, eher schlecht | 3 | gut | 4 | problematisch | 3 | gut | 4 |
| Langzeitverh. mechanisch | kriechen!? | 3 | gut | 5 | geringes Kriechen ist problematisch | 1 | Kriechen der Hülle spielt keine Rolle | 6 |
| mechanische Robustheit | sehr gut | 6 | nicht brauchbar | 0 | sehr gut | 6 | sehr gut | 6 |
| Material-Verfügbarkeit | sehr gut | 6 | gut | 4 | schwierig | 2 | sehr gut | 6 |
| Kosten | sehr niedrig | 6 | sehr hoch | 1 | hoch | 3 | niedrig | 5 |
| Patent-situation | nicht patentierbar aber frei | 4 | schwach patentierbar | 5 | von 3ten patentiert | 2 | voll patentierbar | 6 |
| Gesamtwert | | 3.67 | | 0 | | 3.89 | | 5.56 |

Tabelle 2: Bewertung unterschiedlicher Distanzhalter (typische Abmessungen)
(Werte: 0 = unbrauchbar, 6 = sehr gut)

Das Resultat der Bewertung in Tabelle 2 zeigt eine sehr deutliche Überlegenheit des Konzeptes "Ball-Distanzhalter". Damit ist unsere zunächst eher intuitive Entscheidung der schwerpunktmässigen Verfolgung dieses Ansatzes bestätigt.

2. Evaluation ballartiger Distanzhalter

2.1 Definition möglicher Materialien für Ball-Distanzhalter

Nach einiger Überlegung drängt sich als Kernmaterial das von den sogenannten VIP her bekannte fumed silica oder ein entsprechendes Material auf. Dieses Material steht auch in sehr feinkörniger pulverartiger Form zur Verfügung und ist deshalb genügend leicht deformierbar. Seine hervorragenden Eigenschaften im Vakuum sind hinlänglich bekannt und bewiesen: Im evakuierten Zustand hat es eine der niedrigsten bekannten Wärmeleitfähigkeiten (z.B. 0.005 W/mK) und es gast nicht nur nicht aus, sondern wirkt eher als Getter für störende Gase.

Der Preis für fumed silica beträgt zwar ca. 2000 €/m³, fällt aber bei den geringen Mengen, (< 1 cm³) die pro Distanzhalter benötigt werden, mit weniger als 0.3 Rappen pro Distanzhalter nicht wirklich ins Gewicht.

Alternativ kommen auch faserartige, vorzugsweise anorganische Materialien in Frage, wenn dafür gesorgt ist, dass die Faserrichtung quer zur Höhe des Distanzhalters verläuft. Dies ist beispielsweise mit Glasfaser-Rovings machbar, indem ein Roving genügender Breite quasi zickzackartig gestapelt und umhüllt wird. Wie weiter oben festgehalten wurde, finden sich in der Patenliteratur zahlreiche Patente, bei denen derartige Materialien – mit berichteten hervorragenden Eigenschaften – als Kernmaterial für VIPs eingesetzt werden. Auch hier ist ein niedriger Materialpreis zu erwarten. Beim Detailhändler kosten 4'000 m eines entsprechenden Glas-Rovings ca. CHF 100.- bzw. 2.5 Rappen pro Meter. Geht man davon aus, dass pro Distanzhalter ca. 10 cm Rovings benötigt werden, ergibt dies einen Materialpreis von 0.25 Rappen pro Distanzhalter.

Damit man diese sehr guten Vakuum-Eigenschaften des Kernmaterials nutzen kann, gilt es – wie schon oben gesagt – einen Mantel zu definieren, der nicht nur unter hohem Innendruck nicht reisst und auch das pulverförmige Material zurückhält, sondern der auch völlig gasdurchlässig ist, damit das Kernmaterial bei der Evakuierung des Vakuum-Panels ebenfalls evakuiert wird.

Erfreulicherweise kann auch hierfür auf eine marktübliche, bewährte Komponente zurückgegriffen werden, nämlich auf sogenannte Glasflechtschläuche. Diese Gebilde werden aus sogenannten Glas-Rovings hergestellt, innerhalb derer eine Vielzahl von ca. 10 µm dicken Glasfilamenten unversponnen in parallelen flachen Bündeln mit hoher Zugfestigkeit (mindestens 1800 N/mm²) zusammengefasst sind. Da die Wandstärke derartiger Glasflechtschläuche in der Regel kleiner als 0.2 mm ist, und da Glas bekanntlich eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit (ca. 1.25 W/mK) aufweist, resultiert der nahezu ideale Mantel: zugfest, gasdurchlässig und mit vernünftig hoher Wärmeleitfähigkeit.

Der Preis derartiger Glasflechtschläuche ist nicht erschreckend hoch. Beim Detailhändler betragen die Kosten ca. CHF 0.4 pro Laufmeter. Geht man davon aus, dass pro Distanzhalter mit herstellungsbedingtem Abfall höchstens 2 cm benötigt werden, ergeben sich für den Mantel maximale Kosten von 0.8 Rappen pro Distanzhalter.

2.2 Idee für die industrielle Herstellung der "Ball-Distanzhalter"

Ein Brainstorming und die Überarbeitung der Ideen führten zu dem Resultat, dass die gewünschten ballartigen Distanzhalter auch in eher säulenartiger Form, d.h. mit kleinerem Durchmesser als Höhe industriell sehr einfach und kostengünstig hergestellt werden können.

Dabei wird davon ausgegangen, dass das Kernmaterial in pulverartiger Form vorliegt, wobei der Begriff "pulverartig" sehr weit gefasst ist, also beispielsweise auch Stapelfaser-artige Materialien umfasst. Weiter wird davon ausgegangen, dass das Mantelmaterial in Form eines sehr flexiblen Schlauches vorliegt.

Unter diesen Voraussetzungen ist die industrielle Herstellung analog zu der Herstellung von Würsten leicht machbar.

Das schlauchartige Mantelmaterial wird auf eine langgestreckte Düse mit entsprechendem Durchmesser aufgeschoben und gefaltet, so dass eine beispielsweise 2 m lange Düse viele Meter des Mantelmaterials aufnimmt. Das freie Ende des Mantelmaterials wird mit einer geeigneten, vorzugsweise metallischen Klemme abgebunden. Eine gewünschte Menge Kernmaterial wird eingepresst. Dahinter wird an zwei hintereinander liegenden Stellen zweifach mit Klemmen abgebunden und der erste, bzw. xte Distanzhalter wird abgeschnitten.

Selbstverständlich ist die geschilderte Methode auch zur Herstellung kleiner Distanzhalmengen, z.B. für den Bau von Prototypen geeignet.

Wir gehen davon aus, dass mit derartig einfachen Verfahren die Herstellkosten (ohne Materialkosten) für einen Balldistanzhalter in der Grössenordnung eines Rappens zu liegen kommen.

Insgesamt darf also davon ausgegangen werden, dass die Herstell- und Materialkosten den Wert von 2 Rappen pro Distanzhalter nicht überschreiten werden.

Unter der Annahme von 50 Distanzhaltern pro m² resultieren damit für die Distanzhalter Kosten von CHF 1.- pro m² eines entsprechenden Vakuumpannels.

2.3 Materialverfügbarkeit

Glasflechtschläuche sind Standardprodukte, die bei verschiedenen Detailhändlern in Kleinmengen, aber auch in grösseren Mengen problemlos bezogen werden können. Natürlich besteht bei einem späteren Bezug grösserer Mengen die Möglichkeit, direkt vom Hersteller - und damit auch zu günstigeren Bedingungen - zu beziehen. Dann wird auch die Möglichkeit bestehen, die Flechtschläuche durch Verwendung besser geeigneter Glas-Rovings weiter hinsichtlich mechanischer Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit zu optimieren.

Das für VIPs als Kernmaterial verwendete fumed silica kann bei mindestens 3 europäischen Herstellern in grossen Mengen bezogen werden.

Für Testzwecke besteht allerdings eine gewisse Schwierigkeit, kleinste Mengen, also z.B. 1 kg zu beziehen. Für das laufende Projekt - und auch für den Aufbau einiger Testpanels - haben wir ein uns vorliegendes altes VIP "ausgepackt" und das gepresste Kernmaterial zu Pulver zerstampft.

2.4 Vorversuche

Leider war es nicht möglich, in der Kürze der bisherigen Laufdauer des Projektes einen Versuchsaufbau herzustellen, mit welchem wissenschaftlich (oder wenigstens industriell) gesicherte Resultate hätten gemessen werden können.

Es war aber immerhin möglich, unter Verwendung von fumed silica-Pulver und eines Glasflechtschlauches, einige "Ball-Distanzhalter" mit der geschilderten Methode herzustellen und mit hohem Druck zu belasten. Bild 2 zeigt einen solchen ca. 5 mm hohen, nach der Belastung einen Durchmesser von ca. 14 mm aufweisenden Distanzhalter.



Bild 2: Ball-Distanzhalter nach einer Druck-Belastung von über 8500 N

Für die Druckbelastung haben wir eine Bohr-/Fräsmaschine missbraucht, welche eine Kraftübersetzung von 1:11 vom Betätigungshebel für den Spindelvorschub zu der Spindel hin aufweist. Der Hebel wird mit einem Gewicht von über 80 kg belastet und der Ball-Distanzhalter wurde der dadurch entstehenden Presskraft der Spindel von über 8500 N ausgesetzt, was alle dieser Prozedur ausgesetzten Distanzhalter völlig unbeschadet überstanden haben.

Dieses Resultat ist äusserst ermutigend, zeigen doch unsere analytischen Abschätzungen (siehe Tabelle 3), dass bei 14 mm Durchmesser des Distanzhalters ein Abstand derselben von 240 mm erlaubt ist, womit eine Druckkraft pro Distanzhalter von nur 5760 N auftritt. Der theoretisch bei einer derartigen Anordnung insgesamt entstehende Wärmedurchgang durch die 10 pro m² nötigen Distanzhalter ist deutlich kleiner als 0.02 W/m²K.

2.5 Analytische Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit und der Wärmeleitung von Ball-Distanzhaltern

Im Dubbel "Handbuch für Maschinenbau" findet sich für die Zugspannung σ_M kugelförmiger Schalen mit Durchmesser \varnothing_M und Dicke d_M unter Innendruck p :

Zugspannung im Mantel:

$\sigma_M = p \cdot \varnothing_M / (4 \cdot d_M)$, daraus ergibt sich der maximal zulässige Druck in der Kugel zu

$$(2) \quad p_{\text{zul}} = \sigma_{M\text{zul}} \cdot (4 \cdot d_M) / \varnothing_M$$

mit dem Luftdruck und dem Distanzhalterabstand a ergibt sich aus (1) (3) $\sigma_M = (p_{\text{Luft}} \cdot a^2 / (\pi \cdot \varnothing_M^2 / 4)) \cdot \varnothing_M / (4 \cdot d_M)$

damit lässt sich auch ein minimal zulässiger Durchmesser der Kugel bestimmen:

$$(4) \quad \varnothing_{M\text{min}} = (4 \cdot p_{\text{Luft}} \cdot a^2) / (\pi \cdot \sigma_{M\text{zul}} \cdot 4 \cdot d_M)$$

Für den Ball-Distanzhalter lässt sich damit die mit den in Tabelle 3 grau hinterlegten Materialwerten berechnen:

| $\lambda_{\text{Füll}}$ (fumed silica) evakuiert | $\lambda_{\text{e-Glas}}$ | λ_{Mantel} Fasern 45° | Dicke Mantel d_M | min Knick-Ø Dist'zhalt |
|--|---|---|-----------------------|---------------------------|
| W/mK | W/mK | W/mK | mm | mm |
| 0.005 | 1.24 | 0.886 | 0.2 | 2 |
| zul. Zug σ_{Mzul} Mantel (Glasflechtschlauch mit e-Glas Rovings) | $\sigma_{\text{Mzul-s}}$ zul. Zug Sicherheit 2.75 | | | |
| N/mm ² | N/mm ² | | | |
| 1800 | 655 | | | |
| Höhe H Dist'halter mm | 5 | 5 | 10 | 10 |
| Distanzh'abstand mm: | 125 | 240 | 125 | 240 |
| Kraft auf Ball N : | 1562.5 | 5760 | 1562.5 | 5760 |
| Ø_min Dist'h für $\sigma_M \leq \sigma_{\text{Mzul-s}}$ mm : | 4.0 | 14.0 | 4.0 | 14.0 |
| Zug in Mantel N/mm ² | 622 | 655 | 622 | 655 |
| Wärmefluss durch Füllmaterial W/K | 1.3E-05 | 1.5E-04 | 6.3E-06 | 7.7E-05 |
| Wärmefluss durch Hüllmaterial W/K | 4.5E-04 | 1.6E-03 | 2.2E-04 | 7.8E-04 |
| Wärmefluss durch Dis- tanzhalter W/K | 4.6E-04 | 1.7E-03 | 2.3E-04 | 8.6E-04 |
| Anzahl Dist'halter/m ² | 49 | 10 | 49 | 10 |
| Wärmefluss durch Σ Disthalter W/m ² K | 0.0224 | 0.0171 | 0.0112 | 0.0086 |

Tabelle 3: Zugspannungen und Wärmeleitung von Ball-Distanzhaltern

Es ist erkennbar, dass mit den Festigkeits-Werten handelsüblicher Glasflechtschläuche - und mit Berücksichtigung genügender Sicherheit - Ball-Distanzhalter gebaut werden können, deren Wärmedurchgang in Summe bei 5 mm Vakuum-Spalt nur ca. 0.02 W/m²K und bei 10 mm Vakuum-Spalt ca. 0.01 W/m²K beträgt. Damit können hoch effiziente Vakuum-Panels realisiert werden.

3. Evaluation eines entsprechenden Aufbaus für Vakuumpanels

3.1 Konzeption eines neuartigen Randverbundes

Bekanntlich ist der Randverbund eines Vakuum-Panels mit Vakuum-Spalt einer der grossen Problempunkte. Der Verbund muss einerseits absolut gasdicht sein, um einen Restdruck $\leq 10^{-4}$ mbar sicherzustellen. Dies zwingt die Verwendung von Stahl praktisch auf.

Andererseits darf er fast keine Wärme leiten, was besonders für relativ kleine Panels, also beispielsweise bei Kühlschränken, wichtig ist. Dies bedeutet, dass sehr dünne Stahlfolien zum Einsatz kommen müssen, womit der Rand selbst absolut keine Tragfunktion übernehmen kann, sondern der gesamte Luftdruck von den im Inneren des Panels liegenden Distanzhaltern übernommen werden muss.

Nach der Konzeption der Ball-Distanzhalter war es nun naheliegend, denselben Grundgedanken, die Umwandlung von Druck- in Zugkräfte auch für den Randverbund anzuwenden und diesen damit auch zur Übernahme von Druckkräften zu gestalten.

Auch hier gilt es also, ein unter Vakuum sehr wenig Wärme leitendes Kernmaterial mit einem zugfesten Material zu ummanteln. Der Unterschied zum Distanzhalter im Innern des Panels ist, dass der Mantel des Randverbundes zur Aussenseite des Panels hin absolut gasdicht und zur Innenseite des Panels hin gasdurchlässig sein muss.

Ist dieser Gedanke einmal formuliert, ist seine Realisierung einfach. Als Kernmaterial kann eines der in Abschnitt 2.2 angesprochenen Kernmaterialien, also fumed silica oder langgestreckte Fasermaterialien verwendet werden. Als Mantelmaterial kommt aus unserer Sicht nur Folie eines hochlegierten Stahls in Frage.

Die beispielsweise 10 µm dicke Stahlfolie ummantelt einen langgestreckten Kern mit dem Querschnitt von 5 x 5 mm. Auf der Innenseite ist diese Folie mit einer Vielzahl kleinster Löcher perforiert. Wird dieses Gebilde zwischen die zwei Deckplatten des Panels eingelötet oder allenfalls eingeklebt, ist der gewünschte Randverbund entstanden:

Bei der Evakuierung des Panels wird auch das Kernmaterial des Randverbundes evakuiert, womit seine Wärmeleitfähigkeit auf die bekannten 0.005 W/mK oder besser absinkt. Dabei ist das Ganze gegen aussen hin völlig gasdicht. Der auf den Randverbund wirkende Druck wird als Zug an die Hüllfolie abgeleitet, womit der Randverbund voll tragfähig ist.

Die Darstellung eines derartigen Randverbundes findet sich in Bild 3.

3.2 Vorentwurf eines entsprechenden Panels

Bild 3 zeigt die Skizze des Vorentwurfs eines entsprechenden Vakuumpanels. Die beiden Deckplatten des Panels werden von zwei Leichtbau Stahl-Sandwichplatten gebildet, welche von den Ball-Distanzhaltern und dem Randverbund in einem Abstand von beispielsweise 5 mm gehalten werden.

Beide, ein Sandwich bildende Stahlplatten, weisen beispielsweise 0.2 mm Wandstärke und einen Abstand von 6 mm auf und sind an den Stellen, an welchen im Inneren die Ball-Distanzhalter liegen durch Stahlverbinder miteinander verbunden.

Die Abmessung der Ball-Distanzhalter beträgt beispielsweise 5 mm in der Höhe und 4 mm im Durchmesser, ihr Abstand voneinander und vom Rand betragen 125 mm. Das Kernmaterial der Ball-Distanzhalter ist fumed silica, ihr Mantel ein Glasflechtschlauch mit Wandstärke 0.2 mm.

Der Querschnitt des Randverbundes ist 5 x 5 mm, sein Kernmaterial ist fumed silica und seine Stahlfolie ist 10 µm dick.

Um einen möglichst grossen Wärmeleitweg über die Stahlfolie des Randverbundes zu erhalten, ist jeweils die Innere der beiden ein Sandwich bildenden Stahlplatten L-artig gegen aussen hin geformt und an dem oberen Schenkel mit der zweiten Sandwichplatte und dem Randverbund beispielsweise verlötet.

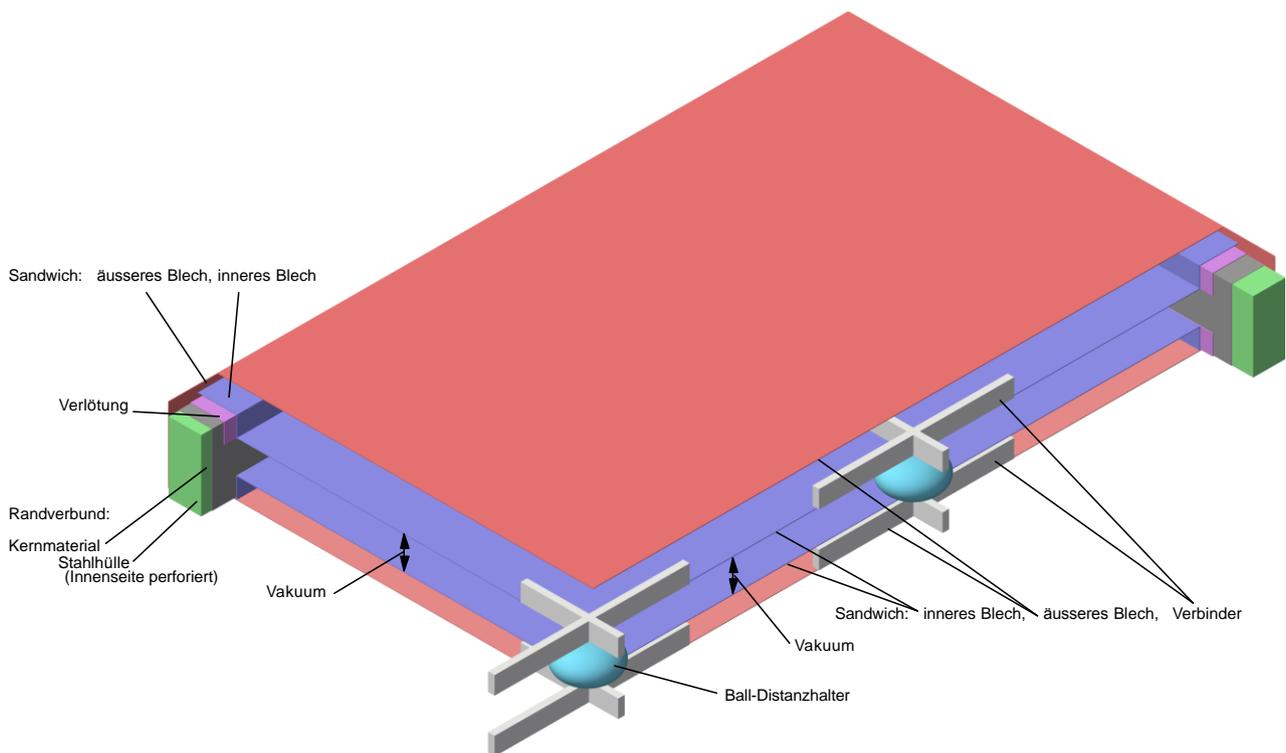


Bild 3: Entwurfs-Skizze (ca. massstäblich) eines Vakuumpanels

3.3 Analytische Abschätzung der Panelfestigkeit und Wärmeleitung

Mit den geschilderten Abmessungen ergibt sich unter Verwendung der hinlänglich bekannten analytischen Berechnungsmethoden eine maximale Durchbiegung der Sandwichplatten von 0.15 mm und völlig unproblematische Spannungen in den Stahlblechen.

Bei der Annahme eines Restdruckes im Vakuum von 10^{-4} mbar beträgt die Wärmeleitung durch die Distanzhalter $0.0224 \text{ W/m}^2\text{K}$, diejenige durch den Randverbund 0.019 W/K pro Laufmeter und durch das Restgas $0.0052 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Für einen Einbaukühlschrank mit den Aussenabmessungen $560 \times 560 \times 1400 \text{ mm}$ ergibt sich eine spezifische Leistung von 0.0126 W/Liter bzw. ein Gesamt-Energieverbrauch von $0.043 \text{ kWh/(d, 100L)}$, was bezogen auf einen mittleren A++-Kühlschrank einer Einsparung von 66% entspricht.

3.4 Vergleich mit bereits untersuchten Panelaufbauten

Tabelle 4 zeigt den Vergleich eines mit derartigen Panels aufgebauten Kühlschranks mit Kühlschrankaufbauten, welche im Vorgängerprojekt HIH1 "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten" untersucht wurden.

Es zeichnet sich ab, dass ein Kühlschrank mit Vakuum-Spalt und Ball-Distanzhaltern nicht nur wie weiter oben gezeigt relativ einfach und preiswert realisiert werden kann, sondern dass er punkto Energieeinsparung und Volumengewinn den besten bisher berechneten - und wesentlich aufwändigeren - Varianten mindestens gleichwertig ist.

| Aufbau | ΔT | Verlust Mittel A++ am Markt | Verlustleistung analytisch | | Verlustleistung FEM | | %A++ | Wandstärke [mm] | Nutzvolumen (Aussenmasse: 0.56x0.56x1.4 m) [Liter] |
|---|------------|-----------------------------|----------------------------|----------|---------------------|----------|------------|-----------------|--|
| | | | W/ m2 | W/ Liter | W/ m2 | W/ Liter | | | |
| A++ => 48mm PU-Isolation | 20 | 0.039 | 2.99 | 0.0378 | 2.4887 | 0.0356 | 100% | 52 | 257 |
| VIP-Isolation 30mm, Baustahl-Hülle, Rand 20 μ | 20 | | 1.91 | 0.0206 | 1.8943 | 0.0271 | 69% | 30.4 | 322 |
| Vakuum, Kern: Spannelemente, Baustahl-Hülle, Rand 50 μ | 20 | | 1.78 | 0.0174 | 1.5456 | 0.0145 | 45% | 16 | 369 |
| Vakuum, Kern: Spannelemente, Baustahl-Hülle, Rand 20 μ | 20 | | 1.47 | 0.0144 | 1.3555 | 0.0127 | 37% | 16 | 369 |
| Stahlsandwich, Ball-Distanzhalter Abs=125, Randverbund: 5mm Kernmaterial + 10 μ m Stahlband | 20 | | 1.32 | 0.0126 | | | 33% | 17.8 | 375 |

Tabelle 4: Vergleich von möglichen Vakuum-Kühlschränken

Bewertung 2010 und Ausblick 2011

Unter Berücksichtigung des um mehr als einen Monat verzögerten Projektbeginns, konnten die für den Zeitraum bis Ende November 2010 vorgesehenen Projektschritte erfolgreich abgeschlossen werden.

In den nächsten Schritten sollen zunächst die notwendigen Versuchsaufbauten geplant, gebaut und in Betrieb genommen werden.

Anschliessend werden mit den Materialien fumed silica und Glasflechtschlauch Ball-Distanzhalter unterschiedlicher Dimensionen hergestellt und auf die Eigenschaften mechanische Festigkeit, Kriechverhalten und Ausgasverhalten getestet.

Dasselbe soll, wenn zeitlich möglich, unter der Verwendung der Materialien fumed silica oder Glas-Roving als Kernmaterial sowie mit Stahlfolie als Mantelmaterial für Randverbunds-Elemente geschehen.