



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht** 24. Oktober 2011

---

# **Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte - Technologieabklärungen für Vakuumpanels**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Helbling Technik AG  
Hubstrasse 24  
CH-9500 Wil  
[www.helbling.ch](http://www.helbling.ch)

**Autoren:**

Hans Tischhauser, Helbling Technik AG, [hans.tischhauser@helbling.ch](mailto:hans.tischhauser@helbling.ch)  
Dr. Gerhard Staufert, freier Mitarbeiter Helbling Technik AG, [gs@galileo-ag.ch](mailto:gs@galileo-ag.ch)

<b>BFE-Bereichsleiter:</b>	Dr. Michael Moser
<b>BFE-Programmleiter:</b>	Roland Brüniger
<b>BFE-Vertrag Nr:</b>	SI/500552-03

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Ausgangslage	5
Ziel der Arbeit	6
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	7
1.    Vorbereitende Tätigkeiten	7
1.1    Erarbeitung unterschiedlicher Distanzhalterkonzepte	7
1.1.1    Betrachtete Distanzhalterttypen	7
1.1.2    Prinzipielle Betrachtungen zu Distanzhaltern in Vakuumspalt-Panels	8
1.1.3    Kunststoffplättchen	8
1.1.4    Schlanke Druckstäbe	9
1.1.5    Distanzhalter die Druck in Zug wandeln	9
1.1.5.1    Spann-Filamente	10
1.1.5.2    Ball-Prinzip	14
1.1.5.3    Parallel-Filament-Prinzip	17
1.2    Patent- und Literatur-Recherche, Analyse	20
1.3    Bewertung der Ansätze	21
2.    Evaluation der gewählten Konzepte	22
2.1    Definition möglicher Materialien	22
2.2    Ansätze zur industriellen Herstellung	23
2.3    Abklärung der Materialverfügbarkeit und Materialbeschaffung	24
3.    Evaluation eines entsprechend aufgebauten Vakuumspalt-Panels	24
3.1    Konzept entsprechend neuartiger Randverbund	24
3.1.1    Rand-Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip	24
3.1.2    Rand-Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip	26
3.2    Vorentwurf eines entsprechenden Panels	28
3.3    Kosten-Nutzen-Betrachtung	31
4.    Versuche	33
4.1    Physikalische Eigenschaften der Distanzhalter prüfen	33
4.1.1    Thermisches und mechanisches Verhalten unter hohem Druck	33
4.1.2    Kriechverhalten bei Einsatztemperatur	42
4.1.3    Ausgasverhalten unter Vakuum	42
Diskussion und Schlussfolgerungen	48
Ausblick	48

# Zusammenfassung

Die Arbeit konzentriert sich auf die wichtigen Bauteile "Distanzhalter" und deren Auswirkung auf Vakuumspalt-Panels. Es zeigt sich, dass Druck in Zug wandelnde Distanzhalter andersartigen überlegen sind. Hierbei sind die beiden Typen "Ball-Prinzip" und "Parallel-Filament-Prinzip" dem "Spann-Filament-Prinzip" deutlich vorzuziehen. Mit beiden Typen lassen sich kostengünstig sowohl innere Distanzhalter als auch Rand-Distanzhalter aufbauen, welche die hohe Anforderung bezüglich maximal zulässigen Wärmeflusses erfüllen. Ein Vakuumspalt-Panel, das diese Typen einsetzt, scheint kostengünstig realisierbar zu sein. 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 festzuhalten, dass hiermit Bauelemente zur Verfügung stehen, die ein Weiterverfolgen des Ansatzes "Ebenes Vakuumspalt-Panel" sehr viel versprechend machen.

## Abstract

This study focuses on the crucial parts "space holders" (also called "spacers") and their impact on the vacuum-gap panel. It has been shown that the spacers which convert compression forces into tensile forces are predominant. Here, the two types "ball principle" and "parallel-filament principle" are clearly preferred to the "clamping filament principle". With both types, it's possible to design and build low-cost inner and border spacers that fulfill the high requirements regarding the maximal allowed heat flow. A low-cost vacuum-gap panel that applies these types seems to be feasible. The analysis shows that the thermal behavior does not change under high pressure. As far as the outgassing is concerned, it has been further demonstrated that both types are not only unproblematic, but that they could most probably perform the much welcome getter effect. It has been thus confirmed, that there are indeed available components which make the pursuit of the approach "vacuum-gap panel" very promising.

## Résumé

Ce travail se concentre principalement sur les importantes « pièces d'écartement » (aussi appelées « entretoises ») et leur impact sur le panel à fente sous vide. Il a été démontré que les pièces d'écartement transformant les forces de compression en forces de traction l'emportent par rapport aux autres. En l'occurrence, les deux types « principe à balle » et « principe à filaments parallèles » sont clairement préférés au « principe à filaments de serrage ». Avec ces deux types, il est possible de développer et fabriquer des pièces d'écartement intérieures et de bord à faible coût, répondant aux hautes exigences du flux de chaleur maximal toléré. Un panel à fente sous vide qui utilise ces deux types semble ainsi être réalisable à faible coût. Les résultats de l'analyse montrent que leur comportement thermique reste inchangé même sous haute pression. En plus, il s'est avéré que les deux types ne présentent pas seulement aucun problème par rapport au dégazage, mais qu'ils produiraient très probablement aussi l'effet très désiré de piège à gaz. Il est donc confirmé que ces composants permettraient de donner suite à l'approche très prometteuse du « panel à fente sous vide ».

# Ausgangslage

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 Vakuumspalt wurde erarbeitet, bei welchem die hohen Druckkräfte in Zugkräfte umgewandelt werden. Dieser neue Ansatz 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 war 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 mit Vakuumspalt übertragen lassen. (Im Folgenden ist deshalb nur noch von Vakuumspalt-Panels 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 teilweise geschehen, und zwar so, dass die Resultate ganz allgemein auf Vakuumspalt-Panels anwendbar sind. Die für Helbling Technik wichtige Anwendung für kubische Kühlschränke wird dabei mitbetrachtet.

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

Eine nochmalige Ideensuche und Konzeptphase in der Zeit zwischen Antragsstellung und Projektbeginn hat aber ergeben, dass auch ein anderer Ansatz zur Umsetzung der Idee Wandlung von Druck- in Zugbelastung sehr viel versprechender ist, nämlich die Verwendung des Prinzips, bei welchem ein durch Druck deformierbares Kernmaterial im Innern des Distanzhalters den Mantel desselben unter Zug bringt. Ein entsprechender Gedanke lässt sich auch auf einen neuartigen Randverbund für Vakuumspalt-Panels anwenden.

## Ziel der Arbeit

1. Vorbereitende Tätigkeiten
  - 1.1 Erarbeitung unterschiedlicher Distanzhalterkonzepte
  - 1.2 Patent- und Literatur-Recherche, Analyse
  - 1.3 Bewertung der Ansätze
2. Evaluation der gewählten Konzepte
  - 2.1 Definition möglicher Materialien
  - 2.2 Ansätze zur industriellen Herstellung
  - 2.3 Abklärung der Materialverfügbarkeit und Materialbeschaffung
3. Evaluation eines entsprechend aufgebauten Vakuumpalt-Panels
  - 3.1 Konzept entsprechend neuartiger Randverbund
  - 3.2 Vorentwurf eines entsprechenden Panels
  - 3.3 Kosten-Nutzen-Betrachtung
4. Versuche
  - 4.1 Physikalische Eigenschaften der Distanzhalter prüfen
    - 4.1.1 Thermisches und mechanisches Verhalten unter hohem Druck
    - 4.1.2 Kriechverhalten bei Einsatztemperatur
    - 4.1.3 Ausgasverhalten unter Vakuum

Erwartete Ergebnisse:

Entscheidungsgrundlagen dafür, ob ein Weiterziehen des Projektes "Hocheffiziente Isolation von kubischen Kühlschränken bzw. von Vakuumpalt-Panels" technisch sinnvoll ist und wirtschaftlich lohnend sein könnte.

# Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

## 1. Vorbereitende Tätigkeiten

### 1.1 Erarbeitung unterschiedlicher Distanzhalterkonzepte

#### 1.1.1 Betrachtete Distanzhaltertypen

Figur 1 zeigt diejenigen der betrachteten möglichen Distanzhaltertypen, welche im Folgenden - zumindest kurz - besprochen werden.

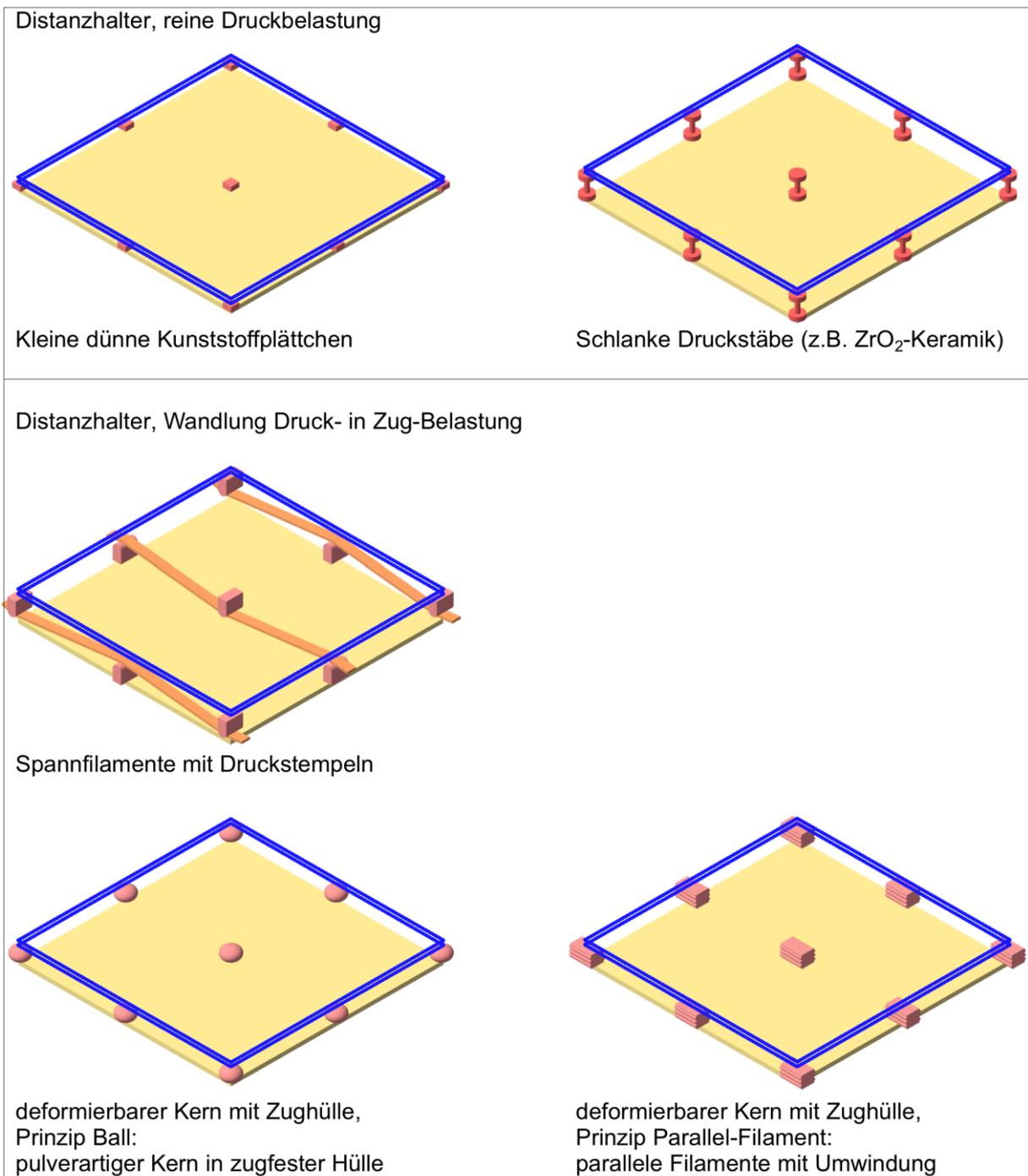


Fig. 1 Einige Distanzhaltertypen

### 1.1.2 Prinzipielle Betrachtungen zu Distanzhaltern in Vakuumspalt-Panels.

Es ist offensichtlich, dass ein - im Wesentlichen ebenes - Panel mit Vakuumspalt dann Distanzhalter im Vakuum beinhalten muss, wenn die beiden grossen Begrenzungsflächen nicht extrem biegesteif ausgeführt werden können. Der Luftdruck von  $0.1 \text{ N/mm}^2$  (= 1 Tonne pro  $\text{m}^2$ ) würde sonst die beiden Grenzplatten zusammenpressen und die Isolationswirkung des Vakuums zunichtemachen.

Da der Wärmefluss durch die Summe dieser Distanzhalter zur Realisierung eines guten Vakuumspalt-Panels nicht grösser als  $0.02 \text{ W/m}^2\text{K}$  werden soll, muss die Anzahl Distanzhalter pro  $\text{m}^2$  und die Wärmeleitung pro Distanzhalter möglichst gering gehalten werden.

Eine geringe Anzahl Distanzhalter pro  $\text{m}^2$  bedeutet einen grossen Abstand zwischen denselben und damit - bei Annahme einer genügenden Biegesteifigkeit der Grenzplatten - eine grosse Druckkraft mit der jeder einzelne Distanzhalter belastet ist. So bewirkt beispielsweise ein Abstand von 50 mm eine Druckkraft von ca. 250 N pro Distanzhalter, 100 mm Abstand bereits ca. 1000 N und 150 mm ca. 2250 N. Offensichtlich werden sich die Grenzplatten mit zunehmendem Abstand der Distanzhalter stärker durchbiegen. Damit ist klar, dass ein Optimum zwischen Distanzhalterabstand und Biegesteifigkeit bzw. Kosten der Grenzplatten zu finden ist. Wir gehen in den folgenden Betrachtungen davon aus, dass eine Durchbiegung der Grenzplatten zwischen den Distanzhaltern von ca. 0.5 mm zulässig ist.

Eine kleine Wärmeleitung pro einzelner Distanzhalter ist zu erreichen, wenn das verwendete Material eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist und/oder die Querschnittsfläche des Distanzhalters möglichst klein ist und/oder dessen Höhe möglichst gross ist. Der Höhe des Distanzhalters sind aber enge Grenzen gesetzt, weil sonst das resultierende Vakuumspalt-Panel zu dick würde.

Zusätzlich muss ein weiterer Punkt beachtet werden. Damit das Vakuum in einem dünnen Vakuumspalt als thermischer Isolator wirksam ist, darf der Restdruck im Spalt keinesfalls grösser als  $10^{-3}$  mbar, besser  $10^{-4}$  mbar sein. Damit ein solcher Unterdruck langfristig eingehalten wird, ist dem Ausgasen der den Spalt begrenzenden, bzw. im Spalt vorhandenen Materialien äusserste Aufmerksamkeit zu widmen. Dies bedeutet auch, dass - zum raschen Entfernen der an der Oberfläche und im Inneren der Begrenzungsmaterialien gebundenen Gase und Wasserdämpfe - während des Abpumpens Temperaturen von mehr als  $400^\circ\text{C}$  herrschen sollten.

Damit sind die Anforderungen an einen brauchbaren Distanzhalter klar umrissen: er muss - zumindest im Vakuum - eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen und er muss zum Erreichen einer möglichst kleinen Querschnittsfläche bei möglichst grossen Abständen eine möglichst hohe Druckfestigkeit aufweisen. Zusätzlich muss er während des Pumpens sehr hohe Temperaturen ertragen können und darf später bei Arbeitstemperatur im Vakuum nicht ausgasen. Dabei ist zu beachten, dass bei einigen interessanten Anwendungsfällen (z.B. Backöfen) die Arbeitstemperatur bis  $300^\circ\text{C}$  betragen kann.

Da die Summe dieser Anforderungen nicht gerade einfach zu erfüllen ist, gilt es die geeigneten Kompromisse zu finden.

### 1.1.3 Kunststoffplättchen

In einer von uns vor einigen Jahren andernorts durchgeführten, nicht publizierten Studie bezüglich Vakuum-Fenstern, konnte nachgewiesen werden, dass aus einer 1 mm dicken PET-Folie ausgestanzte  $1 \text{ mm}^2$  grosse Plättchen, die zwischen 2 ebene Glasplatten eingelegt wurden, langfristig einer Druckkraft pro Plättchen von weit über 300 N standhielten ohne wesentlich zu fließen. Damit darf davon ausgegangen werden, dass derartige Distanzhalter beispielsweise in einem Abstand von 50 mm, d.h. bei einer Druckkraft von 250 N pro Distanzhalter eingesetzt werden dürfen. Bei der PET-Wärmeleitfähigkeit von  $0.15 \text{ W/mK}$  resultiert ein Wärmefluss von ca.  $0.055 \text{ W/m}^2\text{K}$  durch die Summe der Distanzhalter, was zwar nicht schlecht, aber deutlich höher als die geforderten maximal  $0.02 \text{ W/m}^2\text{K}$  ist.

Bezüglich des Ausgasens kann auf die ausführlichste bekannte Datenbasis zurückgegriffen werden: die NASA (<http://outgassing.nasa.gov>) unterhält eine öffentlich zugängliche Datenbank über das Verhalten einer Vielzahl von Materialien. Der für uns hauptsächlich interessante TML-Wert (Total Mass Loss) ist dort für PET-Folien mit 0.4 bis 0.7 % angegeben, was das Material nach den NASA-Anforderungen tauglich für den Weltraum macht. Da dieser Wert aber um Größenordnungen höher liegt als derjenige uns interessierender anorganischer Materialien (TML Glasmatten ohne Schlichte: 0.00 bis max. 0.01%) ist PET (wie auch andere Kunststoffe) bezüglich des Ausgasens als eher problematisch zu bezeichnen.

Da die maximale zulässige Temperatur bei welcher PET hohem Druck widerstehen kann mit höchsten 50°C anzunehmen ist, sind derartige Distanzhalter für unsere Zwecke nicht geeignet.

#### 1.1.4 Schlanke Druckstäbe

Im Verlaufe der im Abschnitt "Ausgangslage" erwähnten Vorgänger-Arbeit wurde ein Panel mit schlanken Druckstäben aus Zirkonoxid  $ZrO_2$  hergestellt. Dieses Material wurde wegen seiner sehr hohen Druckfestigkeit von  $2500 \text{ N/mm}^2$  und seiner für Keramiken geringen Wärmeleitfähigkeit von  $2.5 \text{ W/mK}$  gewählt. Die hohe Druckfestigkeit erlaubt grosse Distanzhalter-Abstände von beispielsweise 150 mm. Für einen Stab mit Durchmesser 2 mm resultiert ein Druck von ca.  $720 \text{ N/mm}^2$ . Da dieser Druck höher liegt als der maximal zulässige Druck von den für Vakuumbegrenzungen zu verwendenden Inoxstählen, muss zur Druckreduzierung an den Enden der Keramikstäbe eine kleine Platte aus hochfestem Stahl (max. zul. Druck  $1000 \text{ N/mm}^2$ ) zum Einsatz kommen, was den Distanzhalter sehr verteuert.

Um einen geringen totalen Wärmefluss zu erhalten wurde die Höhe des Vakuumpalts 10 mm hoch gewählt, was unter Berücksichtigung der Druckreduzierungs-Plättchen zu einer freien Länge der Keramik von 6 mm führte.

Der mit diesen Werten berechenbare totale Wärmefluss beträgt ca.  $0.04 \text{ W/m}^2\text{K}$  und ist damit immer noch deutlich zu hoch. Theoretisch könnte der Durchmesser der Keramikstäbe im freien Bereich beispielsweise auf 1 mm reduziert werden, was dann rechnerisch einen totalen Wärmefluss von ca.  $0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$  ergibt.

Unsere Versuche haben aber ergeben, dass die 2 mm schlanken Keramikstäbe zwar in der Lage sind dem hohen Druck zu widerstehen, dass sie aber bei geringen Querkräften brechen. Da solche Querkräfte aber beispielsweise beim Transport eines entsprechenden Panels unvermeidlich sind, entpuppt sich dieser Ansatz für Distanzhalter als absolut untauglich.

#### 1.1.5 Distanzhalter die Druck in Zug wandeln

Angesichts der Tatsache, dass uns kein Ansatz bekannt ist nach welchem sich als reine Druckelemente ausgebildete Distanzhalter realisieren lassen, die den Anforderungen genügen, muss nach Alternativen Ausschau gehalten werden.

Da es bekanntlich eine Vielzahl von Materialien gibt, die bei sehr kleinen Querschnitten hohe Zugkräfte aufnehmen können, ist es naheliegend, nach Aufbauten zu suchen mit denen Druck in Zug umgewandelt wird.

Im Zuge der genannten Vorgängerarbeit haben wir hierzu eine Vielzahl von Konstruktionen betrachtet, welche dieses tun.

Die meisten der von uns in Betracht gezogenen Konstruktionen wiesen aber einen (deutlich) zu hohen totalen Wärmefluss auf.

Als weiter verfolgenswert haben sich im Laufe der vorliegenden Arbeit lediglich die drei im Folgenden genau beschriebenen Ansätze "Spann-Filamente", "Ball-Prinzip" und "Parallel-Filament-Prinzip" herausgestellt.

### 1.1.5.1 Spann-Filamente

Das Prinzip dieses Ansatzes geht von zugfesten Filamenten oder Fäden aus, welche im Randbereich eines Panels zugfest verankert sind und in definierten Abständen den Vakuumpalt in einer Richtung durchspannen. An den das Vakuum begrenzenden Platten des Panels sind Druckstempel angebracht, welche auf diesen Filamenten aufliegen. Dabei ist sichergestellt, dass die Stempel der ersten bzw. zweiten Grenzplatte die Spann-Filamente in möglichst grossen Abständen voneinander berühren.

Vom Prinzip her ist klar, dass damit der durch den Luftdruck ausgeübte Druck in eine Zugspannung innerhalb der Filamente gewandelt wird. Ebenfalls klar ist, dass die Wärme zwischen den Grenzplatten durch einen Druckstempel über das dünne Filament zum anderen Druckstempel fließen muss, womit der Wärmefluss bei geeigneter Materialwahl und Auslegung sehr klein werden kann.

Zu lösende Aufgaben sind:

- Auffinden der geeigneten Filamente, die nicht nur dauerhaft hohe Zugspannungen aufnehmen müssen ohne wesentlich zu fließen, sondern nicht ausgasen sollen und während des Abpumpens hohen Temperaturen widerstehen müssen.
- Verspannen der Filamente so, dass die Zugspannungen nicht auf die Panelhülle wirken, weil sonst dieselbe in mindestens einer Richtung nicht nur dem Luftdruck, sondern auch hohen inneren Zugkräften widerstehen muss.
- Definition einer Konstruktion, welche einen genügend grossen Winkel der Filamente bezüglich der Längsrichtung des Panels ergibt, weil sonst bekanntermassen die Spannungen in den Filamenten nach einem Tangensgesetz ins Unendliche wachsen würden.

Tabelle 1 zeigt aus den Datenblättern der Hersteller entnommene und teilweise von den Herstellern erfragte Eigenschaften der für unsere Aufgabe wichtigsten Filamente. Die Preisangaben sind entweder die Preise eines Händlers oder Preisschätzungen des Herstellers. Die Benotung des Wärmeverhaltens beinhaltet einerseits die Zugfestigkeit in Funktion der Temperatur und andererseits das Ausgasverhalten des Materials im Vakuum.

Die beiden Filament-Typen Kevlar (Aramidfaser) und Vectran haben die sehr ungünstige Eigenschaft, dass sie bei einer Erhitzung über eine Grenztemperatur von deutlich unter 400°C degradieren und ihre Festigkeit dauerhaft verlieren. Da sie zudem die höchsten Ausgasraten der betrachteten Filamente aufweisen, erhalten sie bezüglich des Wärmeverhaltens die schlechtest mögliche Note.

Bezüglich der Wärmeleitfähigkeit ist festzuhalten, dass häufig in den Datenblättern der Hersteller nur die Werte angegeben sind, die sich ergeben, wenn die Wärmeleitung quer durch eine Vielzahl von im Wesentlichen parallel verlaufenden Filamenten erfolgt. Dass diese Werte in der Grössenordnung der geringen Wärmeleitfähigkeit von Mineralwolle liegen ist nicht weiter erstaunlich. In der für unseren Fall interessanten Längsrichtung der Filamente gelten aber Wärmeleitfähigkeiten deren Wert um ein Vielfaches höher liegt.

Nimmt man als Vergleichszahl das Verhältnis von Zugfestigkeit/Wärmeleitfähigkeit in Längsrichtung der Filamente, so schneidet das hochfeste s2-Glas Roving deutlich am besten ab.

Berücksichtigt man zusätzlich das Wärmeverhalten und den Preis kann nach der folgenden Formel ein Tauglichkeits-Wert berechnet werden  $T = (T2 * T3/100) / (100*T1)$  wobei T1=Preis, T2=Note Wärmeverhalten und T3= Verhältnis Zugfestigkeit/Wärmeleitfähigkeit.

Dieser Tauglichkeits-Wert zeigt die Rovings aus e-Glas und Basalt nahezu gleichauf und das s2-Glas Roving weit abgeschlagen. Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit und Anzahl Anbieter lässt dies die Variante e-Glas als die wahrscheinlich zu wählende erscheinen.

	e-glas	s2-glass	Basalt	Kevlar	Kohle- faser	Vectran
	saint- gobin	agy	Sudaglas	Typ 49		UM
	roving	roving	roving	roving	yarn	yarn
<b>Preis</b> bei Detailhändler CHF/kg <b>T1:</b> CHF/m	9.50 0.0032	20.00 0.0147	10.40 0.0022	150.00 0.1208	85.00 0.0680	15.00 0.0025
<b>Einzel-Filament</b> Ø Filament µm A Filament mm <sup>2</sup> Dichte g/mm <sup>3</sup>	9 6.36E-05 2.55E-03	14 1.54E-04 2.49E-03	10 7.85E-05 2.75E-03	12 1.13E-04 1.44E-03	7 3.85E-05 1.77E-03	23 4.15E-04 1.40E-03
<b>Garn, Roving</b> dtex (g/10'000m) m/kg Anzahl Filamente Summe Filamentflächen mm <sup>2</sup> theor. GesamtØ mm <sup>2</sup>	3380 2959 2080 0.132 0.2316	7350 1361 1920 0.296 0.3461	2160 4630 1000 0.079 0.1784	8050 1242 4940 0.559 0.4758	8000 1250 11740 0.452 0.4279	1670 5988 290 0.120 0.2210
<b>Eigenschaften auf Zug</b> Bruchkraft gesamt [N] theor. Bruchkraft/Filament [N] roving Zugfestigkeit [MPa = N/mm <sup>2</sup> ] E-Modul [MPa = N/mm <sup>2</sup> ] Bruchdehnung Kriechen@50%Bruchlast, 10'000h	251 0.121 1900 73000 3.50% 0-5%	1082 0.563 3660 89000 5.50% 0-3%	173 0.173 2200 89000 3.15% 10-30%	1673 0.339 3000 112400 2.40% 10-30%	588 0.050 4300 240000 1.50% 0-2%	359 1.238 3000 103000 2.80% 0.18 @30%
Druckfestigkeit quer [MPa]	3000	3000	3800	?	?	?
<b>Wärmeleitfähigkeit</b> Filament längs [W/mK] viele Filamentlagen quer [W/mK] 1m Roving längs [W/K]	1.24 0.04 1.64E-07	1.34 0.04 3.96E-07	1.70 0.03 1.34E-07	2.50 0.04 1.40E-06	80.00 17.00 3.61E-05	1.50 0.03 1.81E-07
<b>Wärmeverhalten</b> Note <b>T2</b> Zugfestigkeit in Fkt. Temp. [MPa@°C]	4 988 @400°C	5 2760 @371°C	4 1804 @400°C	1 0 @300°C	4 ? ?	1 0 @300°C
<b>Vergleichszahlen</b> <b>T3:</b> Zugfestigkeit / lambda- längs <b>Tauglichkeit =</b> <b>(T2*T3/100) / (T1*100)</b>	1532 191	2731 93	1294 230	1200 1	54 0	2000 80

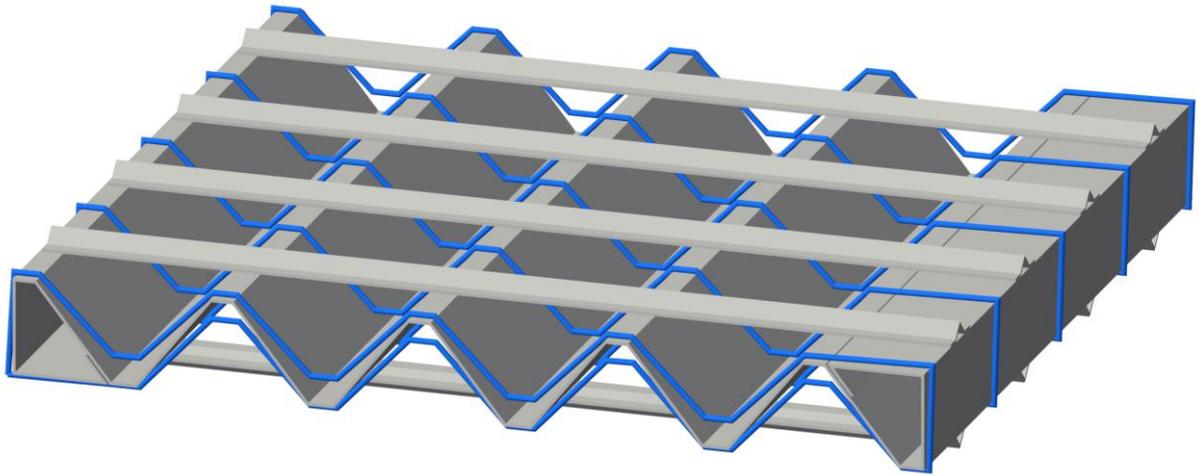
Tab.1 Eigenschaften und Bewertung einiger Filamente

Es bleibt ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor: das Kriechen der Filamente unter Last, welches unter Umständen zum Versagen der anvisierten Spann-Filamente führen kann.

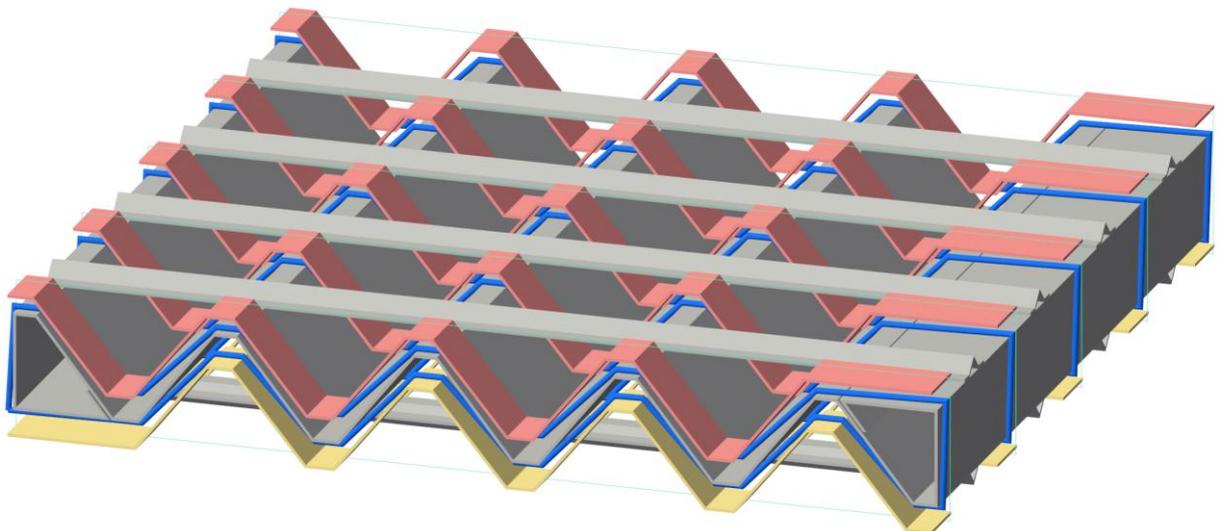
In den folgenden Abschnitten wird klar werden, dass - und warum - wir uns entschieden haben den Ansatz Spann-Filamente nicht weiter zu verfolgen, womit im Rahmen dieser Arbeit auch die Notwendigkeit zur Betrachtung der Problematik des Kriechens entfällt.

Figur 2 zeigt einen denkbaren Aufbau auf der Basis von Spann-Filamenten.

2a Filamentträger mit Filamenten



2b mit eingelegten Druckstempeln ergibt sich ein unabhängiger Modul



2c Modul zwischen die Grenzplatten eines Vakuumsplatt-Panels eingebracht

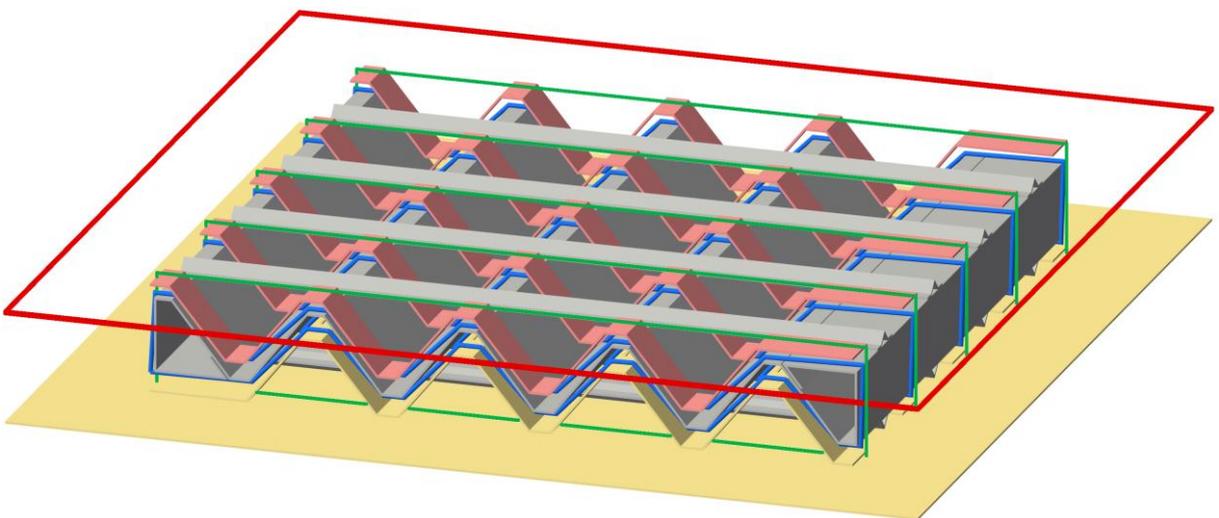


Fig. 2 Denkbare Aufbau mit Spann-Filamenten

In Figur 2a ist ein wellblechartiger Filamentträger mit aufgebrachtten Spann-Filamenten (blau) erkennbar.

Die Spann-Filamente sind hier bereits in der Form dargestellt, die sich nach dem Aufbringen der Druckstempel ergibt.

Der Filamentträger erfüllt drei Aufgaben. Erstens stellt er die erforderliche mehrfache Umlenkung der Filamente in Querrichtung des Panels sicher. Zweitens nimmt er die unter Arbeitsbedingungen auftretenden hohen Zugkräfte der Filamente auf, ohne dass diese auf den restlichen Aufbau eines Vakuumpalt-Panels einwirken. Zu diesem Zwecke ist er mit in Längsrichtung der Filamente verlaufenden Verstärkungen versehen. Drittens dient der Filamentträger der Minderung der Wärmeübertragung durch Strahlung.

Natürlich könnte der Filamentträger bei gleicher Aufgabenstellung auch völlig anders realisiert sein. Beispielsweise könnte er als ein sehr kostengünstiges - im Infrarotbereich spiegelndes - Glasgussteil ausgebildet sein.

Figur 2b zeigt den filamentbespannten Kern mit eingelegten - und durch sehr dünne Filamente fixierten - Druckstempeln, welche hier in der Form von wellblechartigen Streifen realisiert sind. In dieser Form liegt ein vom späteren Vakuumpalt-Panel unabhängig herstellbares modulartiges, d.h. in Quer- und Längsrichtung anreihbares Bauteil vor.

Figur 2c deutet ein solches Modul zwischen den beiden Grenzplatten eines Vakuumpalt-Panels an, wobei die obere Grenzplatte (rot) durchsichtig dargestellt ist. Natürlich muss ein funktionsfähiges Vakuumpalt-Panel noch mit einem geeigneten gasdichten - hier nicht dargestellten - Randverbund ausgestattet sein.

Anhand der in Figur 3 skizzierten Konstruktion zeigt Tabelle 2 das Beispiel einer wärmetechnischen Berechnung mit dem e-Glas Roving, dem s2-Glas Roving und dem Basalt-Roving der Tabelle 1. Die Umlenk-Höhe ist der Höhenunterschied zwischen den Stempeln und der entsprechenden Welle des Filamentträgers. Der Umlenk-Abstand ist der entsprechende Abstand.

Die Werte für die Umlenk-Höhe und den Umlenk-Abstand wurden so gewählt, dass sich erstens eine Sicherheit gegen Bruch von ca. 3 ergab und zweitens ein Wärmefluss durch die Filamente von ca. 0.01 W/m<sup>2</sup>K resultierte.

Die resultierende Spalthöhe eines entsprechenden Vakuumpalt-Panels errechnet sich aus der Umlenk-Höhe durch zweimalige Addition des minimalen Abstandes zwischen einem Stempel und dem Filamentträger. Wird dieser mit 5 mm angenommen ergeben sich die Werte der Tabelle 2.

		e-glas roving	s2-glas roving	Basalt roving
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	1.24	1.34	1.70
roving tot. Ø	mm <sup>2</sup>	0.132	0.296	0.079
zul. Zugkraft	N	251	1082	173
Umlenk-Höhe	mm	20	10	25
Umlenk-Abstand	mm	23	33	20
Spalthöhe Panel	mm	30	20	35
Wärmefluss/Umlenkung	W/K	5.9E-06	1.3E-05	4.5E-06
Wärmefluss/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup> K	0.011	0.011	0.011
Zug auf roving	N	73	334	47
Bruch-Sicherheit		3.4	3.2	3.6
Dehnung roving		0.62%	1.27%	0.68%

Tab.2 Wärmefluss und Dimensionen Spann-Filament

In einer Bewertung der Bauweise "Spann-Filament" ist zunächst festzuhalten, dass in wärmetechnischer Hinsicht sehr gute Werte von höchstens  $0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$  Wärmefluss durch die Summe der Distanzhalter erzielt werden können.

Demgegenüber ist zu sagen, dass mit dem Filamentträger und den Stempeln relativ teure Bauteile und mit dem Umwinden des Trägers mit den Filamenten eine relativ aufwändige Fertigung benötigt wird, um den Distanzhalter-Aufbau zu realisieren.

Zusätzlich ist - bei Verwendung der von der Tauglichkeit her zu favorisierenden e-Glas- oder Basalt-Rovings - die totale Dicke eines resultierenden Vakuumpalt-Panels mit mindestens 30 mm bis 35 mm als eher an der obersten Grenze zu bezeichnen.

Eine zusätzliche, als Nachteil zu bewertende Unsicherheit, besteht bezüglich des langzeitigen Kriechens der Filamente, welches unter Umständen zu Berührung zwischen einer Randplatte und den gegenüber liegenden Druckstempeln und damit zu einem thermischen Kurzschluss führen könnte.

Weiter hat die später in Abschnitt 1.2 besprochene Patentrecherche ergeben, dass der Ansatz "Spann-Filament" bereits von starken Patenten beansprucht ist, so dass zur Realisierung entsprechender Panels mit einiger Wahrscheinlichkeit Lizenz Vereinbarungen notwendig wären.

Da mit den neu erarbeiteten, in den kommenden beiden Abschnitten besprochenen Distanzhalter Ansätzen sehr viel versprechende patentierbare Lösungen vorliegen, sind wir deshalb gesamthaft zur Entscheidung gelangt, die Variante "Spann-Filamente" nicht weiter zu verfolgen.

#### 1.1.5.2 Ball-Prinzip

Figur 3 zeigt die nicht masstäbliche perspektivische Schnitt-Skizze des Aufbauprinzips eines Distanzhalters nach dem Ball-Prinzip. Ein gasdurchlässiges, schlauchartiges Hüll-Material ist mit einem fließfähigen Füllmaterial gefüllt und zweiseitig durch eine nahezu oder ganz geschlossene Verengung verschlossen. Die später nach Einbau zwischen die zwei Grenzplatten eines Vakuumpalt-Panels wirkende Druckrichtung ist mittels der beiden Pfeile angedeutet.

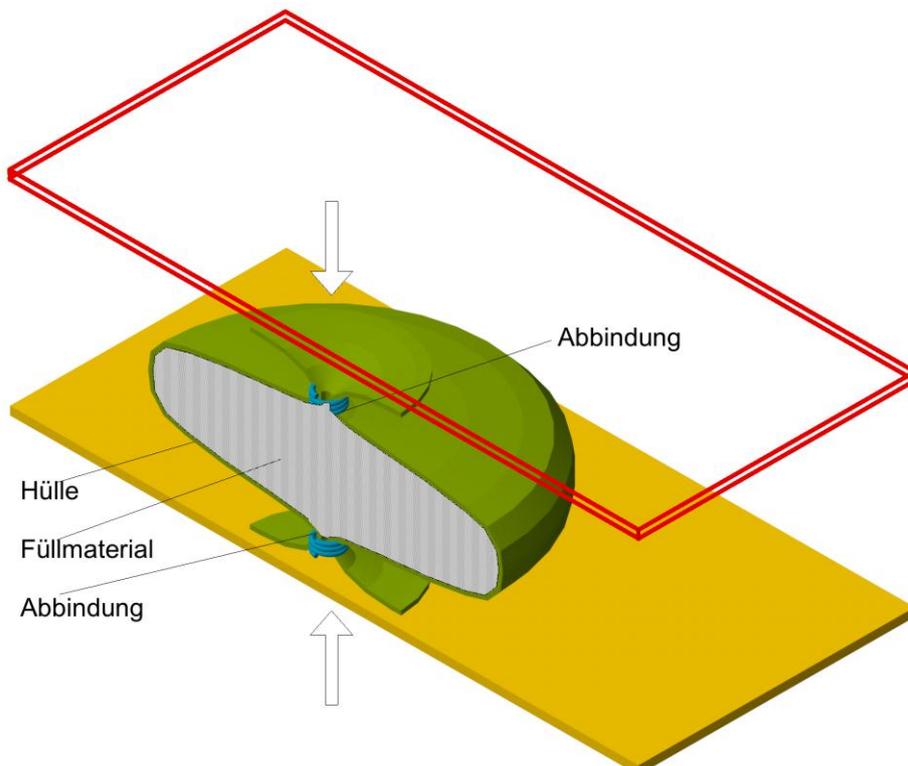


Fig. 3 Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip

Jede der Verengungen ist beispielsweise durch eine Abbindung mit draht- oder fadenartigen Bauteilen, also beispielsweise mit weichem Innoxstahldraht oder mit klammerartigen Bauteilen aus einem beliebigen nicht ausgasenden Material oder durch ein Zusammenpressen und Fixieren beispielsweise mit (anorganischem) Klebstoff oder flüssigem Glas hergestellt.

Durch das Anpressen der Grenzplatten (durchsichtig rot, gelb) eines Vakuumpalt-Isolations-Elementes auf die Verengungen werden die zur Erzeugung der Verengung verwendeten Materialien unter Einsatzbelastung weitgehend der Aufgabe enthoben, die Verengung zusammen zu halten. Zusätzlich liegen die Verengungen jeweils an einer der Grenzplatten an und tragen deshalb nicht wesentlich zur Wärmeübertragung von Grenzplatte zu Grenzplatte bei. Aus demselben Grund muss die Verengung auch nicht vollständig dicht sein.

Das fließfähige Füllmaterial, darf nicht so dünnflüssig sein, dass es unter Druck durch das gasdurchlässige schlauchartige Hüll-Material hindurch dringt, womit flüssige oder gar gasförmige Materialien nicht in Frage kommen. In Frage kommen bis zu Temperaturen von über 500°C stabile, nicht ausgasende, pulverförmige oder faserartige Materialien. Da das fließfähige Füllmaterial unter den später herrschenden Vakuumbedingungen von höchstens  $10^{-3}$  mbar oder weniger eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit von weniger als 0.005 W/mK aufweisen soll, drängen sich die in den VIP (Vakuum-Isolations-Panel) als ganzflächiger Kern verwendeten Materialien auf: Beispielsweise mikroporöse oder sehr feine, auch pulverartig zur Verfügung stehende Stoffe wie fumed silica, pyrogene Kieselsäurepulver, Perlite, Zeolithe sowie kurze oder lange und quasi-parallele oder sehr lange und geknäuelte Glas- oder Basaltfasern. Alle diese Stoffe sind bis zu Temperaturen von deutlich über 500°C formstabil, gasen unter Vakuum nicht aus und weisen spätestens bei einem Vakuum von  $10^{-2}$  mbar, eine Wärmeleitfähigkeit von höchstens 0.005 W/mK auf.

Das schlauchartige Hüll-Material ist beispielsweise ein Glasflechtschlauch, bei welchem Glasfilament-Rovings miteinander verflochten sind, die jeweils aus einer Vielzahl, beispielsweise 1000 bis 20'000 einzelner, quasi unendlich langer Glasfilamente von 5 bis 20  $\mu\text{m}$  Dicke bestehen. Derartige am Markt erhältliche Glasrovings können beispielsweise Zugkräfte von mindestens 1800 N/mm<sup>2</sup>, also in einer Ausführung mit beispielsweise 6'000 Einzelfilamenten total ca. 1300 N, aufnehmen. Dies gilt auch noch – zumindest kurzzeitig, d.h. für mindestens eine Stunde – bei Temperaturen knapp über 500°C. Aufgrund ihres geschilderten Aufbaus sind Glasflechtschläuche hochgradig gasdurchlässig, so dass ihr Inneres nach dem Abpumpen eines Vakuumpalt-Panels ebenfalls evakuiert ist. Dank der Tatsache, dass sie vollständig aus Glas bestehen und allfällige bei ihrer Herstellung verwendete organische Hilfsstoffe mit Temperaturbehandlung vollständig entfernbar sind, gasen sie im Vakuum auch nicht aus. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Glas (ca. 1.25 W/mK) hält sich auch der Wärmetransport über den Glasflechtschlauch in annehmbaren Grenzen. Die in grossen Mengen standardmässig hergestellten und damit sehr preiswerten Glasflechtschläuche sind damit das annähernd ideale Bauteil für Distanzhalter der in Figur 3 skizzierten Bauart nach dem Ball-Prinzip.



Fig. 4 von Hand hergestellter Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip

Der in Figur 3 skizzierte Distanzhalter ist mit einem Glasflechtschlauch von 0.2 mm Wandstärke und mit fumed silica als fließfähiger Füllung aufgebaut. Unter Druck ist der Distanzhalter ca. 5 mm hoch und weist einen Durchmesser von ca. 5 mm auf.

Wie in Tabelle 3 ersichtlich ergibt sich unter diesen Randbedingungen ein Wärmefluss durch das Füllmaterial von ca.  $2.2 \cdot 10^{-5}$  W/K und durch den Glasflechtschlauch von ca.  $5.9 \cdot 10^{-4}$  W/K, womit sich der gesamte Wärmedurchgang durch den Distanzhalter zu ca.  $6.1 \cdot 10^{-4}$  W/K ergibt. Werden diese Distanzhalter in einem Abstand von 200 mm in ein Vakuumpalt-Panel eingebracht, so ergibt sich ein totaler Wärmefluss durch die Summe der Distanzhalter von ca. 0.01 W/m<sup>2</sup>K.

Ball-Distanzhalter:							
Füllmaterial: evakuiertes fumed silica, Hülle Glasflechtschlauch mit Glasrovings							
$\lambda_{\text{Füll}}$	evak	$\lambda_{\text{e-Glas}}$	$\lambda_{\text{H}}$ Roving- Verlauf 45°	Dicke Hülle d <sub>H</sub>	Höhe H Dist' hal- ter	zul. Zug s <sub>H</sub> zul Hülle	zul. Zug mit Sicher- heit
W/mK		W/mK	W/mK	mm	mm	N/mm1	N/mm <sup>2</sup>
0.005		1.240	0.886	0.2	5	1800	1200
Distanzhalter Abstand mm:				50.0	150.0	166.67	<b>200.0</b>
Kraft auf Ball N :				250.0	2250.0	2777.8	<b>4000.0</b>
Ø <sub>min</sub> für Knicken mm :				2.0	3.0	3.7	<b>5.3</b>
Wärmefluss Füllmaterial W/K				3.1E-06	7.0E-06	1.1E-05	<b>2.2E-05</b>
Wärmefluss Hüllmaterial W/K				2.2E-04	3.3E-04	4.1E-04	<b>5.9E-04</b>
Wärmefluss Distanzhalter W/K				2.3E-04	3.4E-04	4.2E-04	<b>6.1E-04</b>
Anzahl Distanzhalter /m <sup>2</sup>				361	32	25	<b>16</b>
Wärmefluss $\Sigma$ Disthalter W/m <sup>2</sup> K				0.081	0.011	0.011	<b>0.010</b>
<b>Verbesserung 1:</b> s2-Glas -> Dicke Roving =					0.1	mm	
Wärmefluss Hüllmaterial W/K				1.1E-04	1.7E-04	2.1E-04	3.0E-04
Wärmefluss Distanzhalter W/K				1.1E-04	1.7E-04	2.2E-04	3.2E-04
Wärmefluss $\Sigma$ Disthalter W/m <sup>2</sup> K				0.041	0.006	0.005	0.005
<b>Verbesserung 2:</b> Hülle unidirektional -> $\lambda$ =					0.30	W/mK	
Wärmefluss Hüllmaterial W/K				3.7E-05	5.5E-05	6.8E-05	9.8E-05
Wärmefluss Distanzhalter W/K				4.0E-05	6.2E-05	7.9E-05	1.2E-04
Wärmefluss $\Sigma$ Disthalter W/m <sup>2</sup> K				0.015	0.002	0.002	0.002

Tab.3 Analytische Berechnung des Wärmeflusses durch Ball-Distanzhalter

Dieser Wert entspricht der angestrebten Zielsetzung, ist aber noch verbesserungsfähig. Die obigen Werte zeigen, dass der Wärmefluss durch die schlauchartige Hülle bestimmend ist. Dieses Bauteil kann in wärmetechnischer Sicht noch deutlich verbessert werden. Die geschilderten Glasflechtschläuche sind mit sogenannten e-Glas Filamenten aufgebaut. Kommen statt dieser Filamente s2-Glas Filamente zum Einsatz, welche eine um ca. einen Faktor 2 höhere Zugfestigkeit aufweisen, kann die Wandstärke des schlauchartigen Bauteils und damit die Wärmeleitung durch dasselbe entsprechend reduziert sein (siehe Verbesserung 1, Tabelle 3). Zusätzlich ist es mit textilen Herstellungsmethoden möglich sogenannte unidirektionale Gebilde herzustellen. Dies bedeutet für die schlauchartigen Bauteile, dass der Grossteil der Filamente, also beispielsweise 80% derselben, in Umfangsrichtung verläuft und nur ein kleiner Prozentsatz in der von Grenzplatte zu Grenzplatte zeigenden Längsrichtung. Damit ist der Wärmetransport durch das schlauchartige Bauteil nochmals mindestens auf ein Drittel absenkbar. Durch Kombination der genannten Massnahmen besteht das Potential den Wärmefluss durch einen einzelnen Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip um einen Faktor 5 auf ca.  $1.2 \cdot 10^{-4}$  W/mK und für die

Summe der Distanzhalter auf ca.  $0.002 \text{ W/m}^2\text{K}$  abzusinken (siehe Verbesserung 2, Tabelle 3).

Die industrielle Herstellung der beschriebenen Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip ist mit einfachen Mitteln, beispielsweise im Sinne der Herstellung von Fleischwürsten, durchführbar. In einer einfachen Ausführung wird zu diesem Zwecke eine grosse Länge des schlauchartigen Hüll-Materials in Längsrichtung gefältelt auf ein Rohr aufgeschoben und vor dem vorderen Ausgang desselben wie weiter oben beschrieben verengt, also beispielsweise mit dünnem Draht abgebunden. Das fließfähige Material wird nun mit definiertem Druck durch das Rohr in das schlauchartige Bauteil gepresst, wobei sich die Verengung vom vorderen Ende des Rohrs weg bewegt. Nach einer definierten Länge dieser Bewegung wird das schlauchartige Bauteil vor dem vorderen Ende des Rohres zweimal hintereinander erneut abgebunden und der so entstandene Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip abgetrennt. Danach wiederholt sich der geschilderte Vorgang solange, bis die auf dem Rohr vorhandene Länge des schlauchartigen Hüll-Materials aufgebraucht ist. Es können mindestens zwei derartige Rohre vorhanden sein, die abwechslungsweise mit dem schlauchartigen Hüll-Material bestückt, bzw. zum Einpressen des fließfähigen Materials verwendet werden. Auf diese Weise sind in einem quasi kontinuierlichen Prozess Distanzhalter im Sekundentakt herstellbar.

#### 1.1.5.3 Parallel-Filament-Prinzip

Figur 5 zeigt die nicht massstäbliche perspektivische Prinzip-Skizze des Aufbaus und einer Herstellmöglichkeit eines Distanzhalters nach dem Parallel-Filament-Prinzip.

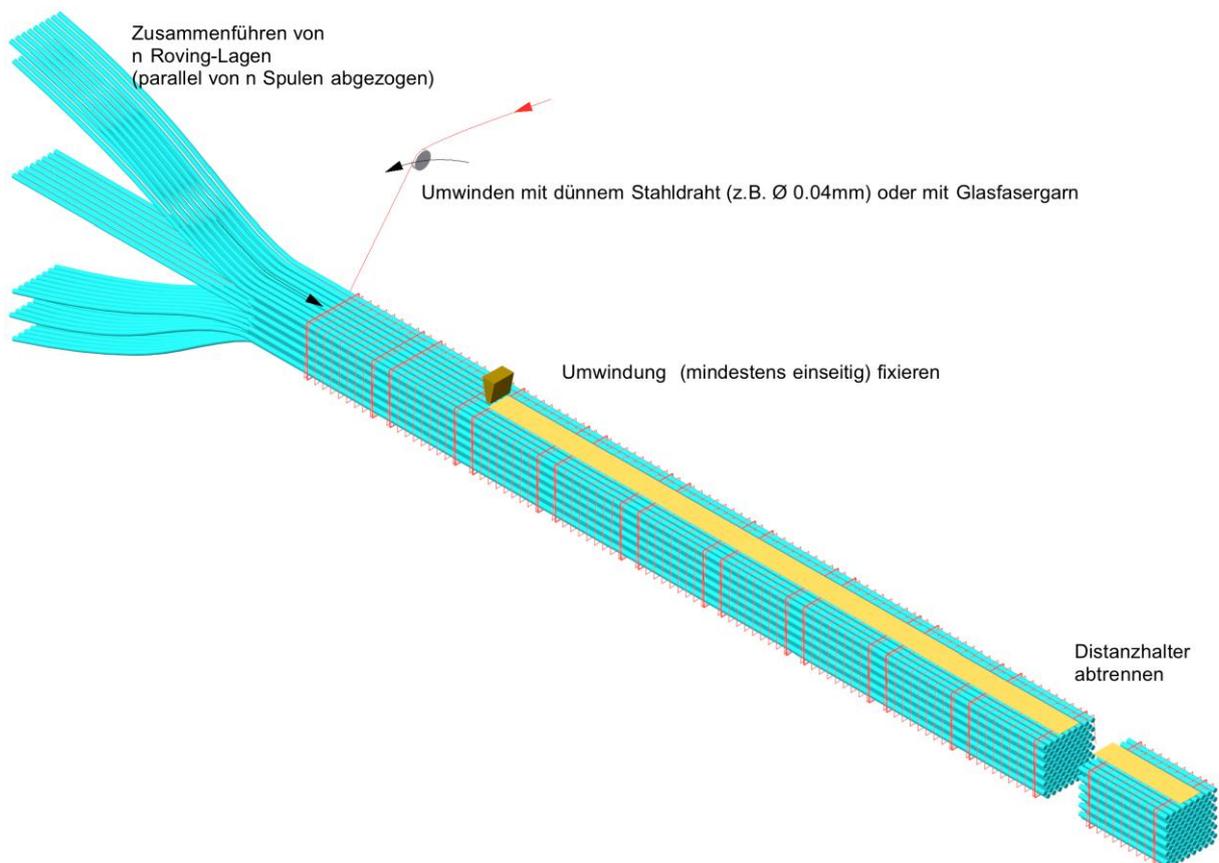


Fig. 5 Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip

Der Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip besteht aus einem Filament-Bündel von wohl definierter Länge aus im Wesentlichen parallel verlaufenden Filamenten, deren Durchmesser in Figur 5 um ein Vielfaches zu gross dargestellt sind. Das Filament-Bündel wird von einem im Wesentlichen helixartig verlaufenden draht- oder fadenartigen Hüll-Material zusammen gehalten.

Die Richtung des Druckes der später von den beiden Grenzplatten eines Vakuumpalt-Panels auf einen Distanzhalter ausgeübt wird, verläuft immer quer zur Längsrichtung der Filamente. Dabei ist es gleichgültig, ob der Druck relativ zum Distanzhalter in horizontaler Richtung oder in vertikaler Richtung angelegt ist. Das eine Mal bestimmt die Breite des Distanzhalters den Abstand zwischen den Grenzplatten, das andere Mal dessen Höhe.

Die Anforderungen an die Filamente des Filament-Bündels sind hoch. Sie müssen bei bis zu einer Stunde anhaltenden Temperaturen von über 500°C sowie Drücken von bis zu 50 N/mm<sup>2</sup> auf das Gesamtbündel standhalten und dürfen bei über Jahre anhaltenden gleich hohen Drücken, bei Temperaturen bis zu mindestens 50°C, besser bis zu 300°C, nur wenig fließen. Sie dürfen im Vakuum bei Unterdrücken von 10<sup>-4</sup> mbar nicht ausgasen. Die Wärmeleitfähigkeit des Faserbündels quer zur Faserlängsrichtung darf unter Vakuum von 10<sup>-3</sup> mbar und tiefer höchstens 0.005 W/mK betragen.

Die Auswahl an zu Filamenten formbaren Materialien, die derartigen Anforderungen genügen, ist beschränkt. Die Verwendung von Inoxstahl-Filamenten ist möglich, des hohen Preises und der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit wegen aber nicht erste Wahl. Vorzuziehen sind die preiswert zur Verfügung stehenden Glas- bzw. Basaltfilamente, die eine niedrige Wärmeleitfähigkeit (1.25 bzw. 1.7 W/mK) besitzen und bei Temperaturen über 500°C noch hohe Druckfestigkeit aufweisen.

Bei den Glasfilamenten sind die sehr preiswerten e-Glas Filamente den wesentlich teureren s2-Glas Filamenten vorzuziehen, weil die Druck- und Temperaturfestigkeit der beiden Glasarten sehr ähnlich ist.

Derartige Filamente werden als sogenannte Rovings, d.h. als Bündel von parallel verlaufenden zahlreichen endlosen Filamenten in grössten Mengen industriell gefertigt und stehen deshalb sehr kostengünstig zur Verfügung. Ein für unseren Zweck geeignetes Roving beinhaltet beispielsweise 10'000 bis 20'000 Glas-Filamente, die alle einen identischen Durchmesser von 5 bis 15 µm aufweisen.

Die Anforderungen an das draht-, filament- oder fadenartige Umwindungs-Material sind identisch mit denjenigen an die Filamente.

Die Auswahl an Materialien, die derartigen Anforderungen genügen ist beschränkt. Als metallische Drähte kommen weiche Inoxstahldrähte mit einem Durchmesser von kleiner als 0.1 mm, besser kleiner als 0.05 mm in Frage. Möglich sind auch preiswert zur Verfügung stehende Glas- oder Basaltfilamente oder gesponnene Fäden aus diesen Materialien. Bei den Glasfilamenten sind die zugfesteren s2-Glas Filamente mit demzufolge entsprechend kleineren Querschnitten und daraus resultierender kleinerer Wärmeleitung den e-Glas Filamenten vorzuziehen, sofern der Preis der Filamente dies erlaubt.

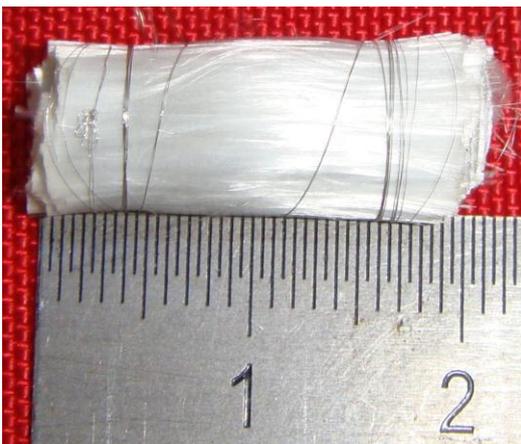


Fig. 6 von Hand hergestellter Test-Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip

In einem beispielhaften Aufbau des in Figur 5 skizzierten und in Figur 6 dargestellten, zu Testzwecken von Hand realisierten Distanzhalters sind 20, jeweils ca. 15'000 e-Glas Filamente mit Durchmesser 9  $\mu\text{m}$  beinhaltende Rovings im Filament-Bündel zusammengeführt und mit einer helixartigen Umwicklung aus gesponnenem Glasfaden mit einer totalen Filamentfläche von 0.002  $\text{mm}^2$  und Windungsabstand 0.12 mm umwunden. Der entsprechende Distanzhalter hat unter Arbeitsdruck eine Breite von 5 mm, eine Länge von 10 mm und eine Höhe von 5 mm.

Bei einem Abstand von 150 mm zwischen den Distanzhaltern ergibt sich zwischen den Grenzplatten eines Vakuumpalt-Panels eine Druckbelastung von  $0.1 \times 150^2 / 50 = 45 \text{ N/mm}^2$  auf die Gesamtfläche des einzelnen Distanzhalters. Diese Druckbelastung liegt ein Vielfaches unterhalb der in Datenblättern mit  $3000 \text{ N/mm}^2$  angegebenen maximal zulässigen Druckbelastung in Querrichtung von e-Glas oder s2-Glas Filamenten, so dass auch trotz der Tatsache einer durch Punkt- oder Linienbelastung zwischen den einzelnen quasi-parallelen Fasern deutlich erhöhten lokalen Druck-Belastung keine grössere Deformationen der Fasern und damit auch keine signifikante Veränderung der Wärmeleitung in Querrichtung zu den Fasern zu erwarten ist.

Wie in Tabelle 4 ersichtlich, ergibt sich mit den oben beispielhaft angenommenen Materialien, Abmessungen und Abständen der Distanzhalter ein Wärmefluss von lediglich  $0.005 \text{ W/m}^2\text{K}$  durch die Summe der Distanzhalter.

5 mm hohe Rovings umwunden mit Glasfaden Breite Rovings 5 mm									
max.zul. Druck in rovings $\text{N/mm}^2$ 45				$\Sigma$ Flächen im Glas- faden $\text{mm}^2$		Steigung Glasfaden	$\lambda$ Glasfaden $\text{W/mK}$	$\lambda$ rovings evakuiert $\text{W/mK}$	
		$\varnothing$ Glas- faden mm		0.0024		0.12	1.25	5.00E-03	
rovings Länge mm	rovings Fläche $\text{mm}^2$	Disth Abstand mm	Anz. Disth / $\text{m}^2$	$q_{\text{dot}}$ ro- vings W/K	Anz. Wind. Glasfaden	$q_{\text{dot}}$ Glas- faden W/K	$q_{\text{dot}}$ tot Disth W/K	$q_{\text{dot}}/\text{m}^2$ Disth $\text{W/m}^2\text{K}$	
5	25	106	72	2.5E-05	42	4.95E-05	7.4E-05	0.005	
10	50	150	33	5.0E-05	83	9.90E-05	1.5E-04	0.005	
15	75	183	20	7.5E-05	125	1.48E-04	2.2E-04	0.004	
20	100	212	14	1.0E-04	167	1.98E-04	3.0E-04	0.004	

Tab. 4 Analytische Berechnung des Wärmeflusses durch Parallel-Filament-Distanzhalter

Aus Figur 5 ist zusätzlich eine mögliche Herstellmethode der Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip ersichtlich.

Von beispielsweise 10 bis 50 von in Figur 3 nicht dargestellten Spulen, auf denen jeweils eine grosse Länge (mehrere Kilometer) eines aus einem der oben diskutierten Materialien gefertigten Filament-Rovings aufgespult sind, werden die Rovings kontinuierlich abgezogen. Beispielsweise handelt es sich jeweils um ein handelsübliches e-Glas Filament-Roving mit einer Breite von ca. 5 mm, einer Dicke im mit Querdruck belastetem Zustand von ca. 0.25 mm und einem textilen Gewicht von 2400 tex bestehend aus ca. 15'000 einzelnen Glasfilamenten des Durchmessers 9  $\mu\text{m}$ . Diese Filament-Rovings werden in einem kontinuierlichen Prozess so zusammengeführt, dass sie in der Richtung der Dicke des Filament-Bündels aufeinander gestapelt sind. Für die Erzeugung eines unter hohem Druck

ca. 5 mm hohen Filament-Bündels werden auf diese Art 20 bis 30 der beschriebenen e-Glas-Rovings zusammengeführt.

Das so entstandene Filament-Bündel wird in einem kontinuierlichen Prozess im Wesentlichen helixartig mit einem draht-, filament- oder fadenartigen Umwindungs-Material, wie einem Inoxstahldraht mit Durchmesser 0.04 mm oder um einem gesponnenen Faden aus Glasfilamenten, umwunden. Die Umwindung wird mittels eines temperaturbeständigen, im Vakuum nicht ausgasenden Materials fixiert, da sie sich sonst nach dem Trennen lockern könnte.

Das entstandene, kontinuierlich umwundene Filament-Bündel wird anschliessend in einzelne Distanzhalter zertrennt.

Der zur Fixierung verwendete Stoff ist beispielsweise in Form eines zunächst flüssigen, dünnen Glasbandes oder eines rasch härtenden dünnen Bandes aus anorganischem Hochtemperatur-Klebstoff so aufgebracht, dass die Fixierung auf einer Distanzhalterseite liegt, die später in einem Vakuumpalt-Panel eine der beiden Grenzplatten berührt und so nicht zur Wärmeübertragung beiträgt.

## 1.2 Patent- und Literatur-Recherche, Analyse

Mit dieser Recherche soll sichergestellt werden, dass einer Realisierung der geschilderten Ansätze aus patentrechtlicher Sicht prinzipiell nichts entgegensteht.

Eine ausführliche Recherche auf "worldwide.espacenet.com" ergab nach Durchsuche von ca. 100 Patenten ca. 25 relevante Treffer, d.h. Patente in denen der lokale Distanzhalter (spacer, support) eine wesentliche Rolle spielt.

Bezüglich Distanzhaltern in Form von beliebig geformten Plättchen aus beliebigem Material existiert ein - uns seit langem bekanntes - Patent von Emil Bächli bezüglich Vakuumpalt-Isolations Fenstern und Panels (CH687628A5), das bereits 1978 eingereicht und schlussendlich nicht umgesetzt wurde. Damit ist klar, dass Distanzhalter in Form von beliebigen Plättchen zum etablierten und frei verfügbaren Stand der Technik gehören.

Ein Patent mit dünnen Druckstäben wurde nicht gefunden, ist aber wegen der ungenügenden mechanischen Stabilität solcher Strukturen auch nicht interessant.

Gefunden wurden Patente (z.B. CA2602647A1, GB2099116A, CN201433672Y) in welchen sich auf verschiedenen Ebenen gitterartig kreuzende Körper als Distanzhalter beschrieben werden. Mit derartigen Strukturen können grosse Wärmeleitwege und damit eine entsprechende Reduktion des Wärmeflusses erreicht werden. Ein kurzes Abschätzen der tatsächlich resultierenden Wärmeleitung hat uns aber zur Überzeugung gebracht, dass ein solcher Ansatz nicht verfolgenswert ist.

Hinsichtlich Distanzhaltern die unter Verwendung von filamentartigen Materialien Druck in Zug umwandeln wurde bereits 1963 ein Patent eingereicht, das eine entsprechende Struktur beschreibt (GB1062975A), womit der Grundgedanke frei zugänglicher Stand der Technik ist.

Insbesondere wurde von Feinerman 2007 ein Patent (US2007286981A1) eingereicht, welches den von uns zunächst verfolgten Ansatz "Spann-Filamente" in abgewandelter Form ausführlich beschreibt.

Ein fast identischer Ansatz wurde von Viktor Schatz entwickelt und 2009 in einem Patent bezüglich vakuumisolierter Platten (WO2011050800A2) und einem zweiten bezüglich vakuumisolierter Rohre (WO2011050801A2) eingereicht. 2010 publizierte Schatz einen entsprechenden Ansatz für Panels (Zeitschrift: VIP, August 2010, Vol.22 Nr.4, s30-38, Wiley-VCH-Verlag, Weinheim).

Weder das Patent von Feinerman noch diejenigen von Schatz behandeln die Problematik der hohen Zugkräfte so, dass dieselben nicht auf die Grenzplatten des Panels einwirken. Dies würde unseres Erachtens entweder zu einer sehr schweren Konstruktion oder zu einer, allenfalls bis zum Kollaps reichenden starken Gesamtdurchbiegung des Panels führen.

Damit wäre der von uns in Figur 3 dargestellte Ansatz mit einem relativ leichten druckfesten Filamentkern an sich patentwürdig. Wir haben uns aber aufgrund der Resultate der Bewertung der folgenden Tabelle 5 entschlossen den Ansatz "Zugfilamente" nicht weiter zu verfolgen.

Patente oder Publikationen welche einen Ansatz beschreiben, der dem Ball-Prinzip oder dem Parallel-Filament-Prinzip zur Realisierung von Vakuumpalt-Distanzhaltern entsprechen, konnten keine gefunden werden.

### 1.3 Bewertung der Ansätze

	reine Druckelemente				Druck zu Zug Elemente					
	Kunststoff Plättchen	Note	druckfeste Stäbe	Note	Filament- verspannung	Note	Ball-Prinzip	Note	Parallel- Filament	Note
Beschreibung Distanzhalter- aufbau	z.B. ge- stanzte Plättchen	0 bis 6	schlanke Stäbe	0 bis 6	verspannte zugfeste Filamente	0 bis 6	ballartige Elemente	0 bis 6		0 bis 6
Material 1	0.5 - 1 mm PET-Folie		ZrO <sub>2</sub>		s2-Glas		fumed silica Pulver		Glasroving	
Wärmeleitf. Mat.1 (evak.) W/mK	0.15		2.5		1.24		0.005		0.005	
Material 2			hochfester Stahl		Druckkern aus Stablech		Glasfaser- schlauch		Stahldraht Ø 0.04	
Wärmeleitf. Mat.2 W/mK			15				0.89		15.00	
Abmessung mm	1.13		2		0.3		3.5		5x10x10	
Fläche mm <sup>2</sup>	1		3.14				9.62		100.00	
Vakuumpalt- höhe mm	1		10		15		5		5	
Wärmel.weg mm	1		6		33		5		5	
Distanzhalter- abstand mm	50		150		33.3		120		150	
Kraft auf Dis- t'halter N	250		2250				1440		2250	
Druck bzw. Zug N/mm <sup>2</sup>	250	2	716.20	6	244	6	654.81	6	22.50	6
theor. max. zul. Druck   Zug N/mm <sup>2</sup>	100 (Versu- che bis über 300)		2500 ZrO <sub>2</sub> , 1000 Stahl		1080		1800 (zul max Zug Glasroving)		3000	
zul.Temp. °C	50	1	500	6	400	6	400	6	500	6
Wärmefluss W/m <sup>2</sup> K	0.05415	1	0.04	2	0.01	5	0.01	5	0.005	6
Ausgasen Vakuum	unbekannt, eher hoch	2	gut	4	problematisch	3	gut	4	gut	4
Langzeitverh. mechanisch	kriechen !?	2	gut	5	Kriechen ist problematisch	1	Kriechen unwichtig	6	sehr gut	6
mechanische Robustheit	sehr gut	6	nicht brauchbar	0	sehr gut	6	sehr gut	6	sehr gut	6
Material- Verfügbarkeit	sehr gut	6	gut	4	schwierig	2	sehr gut	6	sehr gut	6
Kosten	sehr niedrig	6	sehr hoch	1	hoch	3	niedrig	5	niedrig	5
Patentsituation	nicht paten- tierbar, frei	3	schwach patentierbar	5	von 3ten patentiert	2	patentierbar	4	patentierbar	6
Gesamtnote		<b>3.2</b>		<b>0</b>		<b>3.8</b>		<b>5.3</b>		<b>5.7</b>

Tab. 5 Bewertung der Distanzhalter Ansätze

Tabelle 5 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Eigenschaften der 5 betrachteten Distanzhalter Varianten sowie eine Bewertung der wichtigsten dieser Eigenschaften. Die Gesamtnote wurde als Mittelwert der ungewichteten 9 Einzelnoten berechnet.

Die Gesamtnote bezüglich eines Ansatzes ist dann "Null" wenn eine einzelne Eigenschaft mit "nicht brauchbar" bewertet werden muss, was auf den Ansatz mit schlanken Keramikstiften zutrifft.

Es ist klar ersichtlich, dass die beiden Ansätze "Ball-Prinzip" und "Parallel-Filament" zu favorisieren sind.

Aus diesem Grunde haben wir uns im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf diese beiden Ansätze konzentriert.

## 2. Evaluation der gewählten Konzepte

### 2.1 Definition möglicher Materialien

Die Anforderungen an die Materialien zur Realisierung des Ball-Prinzips oder des Parallel-Filament-Prinzips sind hoch.

Die jeweiligen Kernmaterialien müssen bei bis zu einer Stunde anhaltenden Temperaturen von über 500°C sowie Drücken von bis zu 50 N/mm<sup>2</sup> auf den Distanzhalter standhalten und dürfen bei über Jahre anhaltenden gleich hohen Drücken, bei Temperaturen bis zu mindestens 60°C (Ausnahmefälle 350°C), nur wenig fließen. Sie dürfen im Vakuum bei Unterdrücken von 10<sup>-4</sup> mbar nicht ausgasen. Die Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials quer zur Faserlängsrichtung darf unter Vakuum von 10<sup>-3</sup> mbar und tiefer höchstens 0.005 W/mK betragen.

Gleich hoch sind die Anforderungen an das Hüll- bzw. Umwindungsmaterial das aber nicht hohen Druck- sondern hohen Zugkräften widerstehen muss.

In den Abschnitten 1.1.5.2 und 1.1.5.3 wurden mögliche Materialien bereits diskutiert.

Als Kernmaterial für das Ball-Prinzip sind die bekannten Kernmaterialien von VIPs, d.h. beispielsweise fumed silica zu bevorzugen.

Von diesen Materialien ist bekannt, dass sie bereits bei Unterdrücken von 1 mbar die geforderte geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

Da sie in grossen Mengen industriell auch für Hochtemperatur-Isolation eingesetzt werden ist auch ihr Standvermögen bei hohen Temperaturen gewährleistet.

Auch das Ausgasverhalten von fumed silica ist vermutlich unproblematisch, da es im gut ausgeheizten Zustand Gase eher adsorbiert (Getterwirkung) als desorbiert. Dies soll aber in den Versuchen von Abschnitt 4.2 verifiziert werden.

Es bleibt ein unbekannter Punkt: Das Verhalten unter sehr hohem Druck. Bekannt ist, dass fumed silica in gepresster Form als Kernmaterial von VIP den üblichen Bodenbelastungsdrücken in Häusern, also Drücken von bis zu 5 N/mm<sup>2</sup> standhält ohne die thermische Isolationswirkung einzubüssen. In unserer Anwendung ist aber eine Druckfestigkeit bis zu 20 N/mm<sup>2</sup> (besser 50 N/mm<sup>2</sup>) gefordert und es ist nicht ohne weiteres sicher, dass die innere Struktur des mikroporösen Materials unter diesem Druck erhalten bleibt. Diese Unsicherheit ist in den Versuchen von Abschnitt 4.2 abzuklären.

Der Preis von fumed silica und ähnlichen Materialien ist mit mindestens € 2000 /m<sup>3</sup> sehr hoch, was aber in unserem Falle eine deutlich untergeordnete Rolle spielt, da mit einem Kubikmeter des Materials ca. 1'500'000 Ball-Distanzhalter für ca. 50'000 m<sup>2</sup> Vakuumspalt-Panel geformt werden können.

Als Kernmaterial für das Parallel-Filament-Prinzip sind e-Glas oder Basalt Filamente in der Form von schweren Rovings zu bevorzugen. Beide Filamentarten sind in ihren physikalischen Eigenschaften fast identisch und unterscheiden sich allenfalls in Preis und Verfügbarkeit. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Filamente sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Von quasi-parallel, bzw. sich lateral kreuzenden Glasfaserschichten, die quer zur Wärmeleitrichtung angeordnet sind, ist bekannt, dass sie bei Unterdrücken ab 0.01 bis 0.1 mbar die geforderte geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Da die Filamente um ein vielfaches preiswerter sind als fumed silica, kommen sie - vor allem in Japan - vermehrt als Kernmaterial von VIP zum Einsatz. Für unseren Fall ist ihr Preis vernachlässigbar.

Die Standfestigkeit von Glas stellt bis zu Temperaturen von 500°C kein Problem dar und Basalt ist in dieser Hinsicht Glas leicht überlegen.

Bekannt ist, dass gut ausgeheiztes, d.h. von Wasserdampf befreites Glas kaum ausgast. Dies kann u.a. auch in der NASA Datenbank "[www.outgasing.nasa.gov](http://www.outgasing.nasa.gov)" nachgeschlagen werden. Dies soll aber in den Versuchen von Abschnitt 4.2 ebenfalls verifiziert werden.

Auch hier bleibt die Unbekannte: Das Verhalten bei sehr hohem Druck. Herstellerangaben weisen zwar darauf hin, dass sowohl Glas- als auch Basaltfasern bei Belastung in Querrichtung Drücken bis zu 3000 N/mm<sup>2</sup> standhalten. Da sich aber die Fasern gegenseitig nur punktförmig (oder linienförmig) berühren ist nicht sicher, ob bei dem in unserem Fall herrschenden hohen Gesamtdruck die Grenze des Fließens lokal nicht überschritten wird. Da aber die niedrige Wärmeleitung quer zu den Fasern auf der Tatsache eben dieser Punktberührung beruht, könnte die Wärmeleitfähigkeit durch lokales Fließen der Fasern dramatisch erhöht werden. Auch diese Unsicherheit ist in den Versuchen von Abschnitt 4.2 abzuklären.

Als Hüllmaterial für das Ball-Prinzip sind die industriell in grossen Mengen hergestellten Glasgeflecht-Schläuche zu bevorzugen, die bezüglich Temperaturfestigkeit und Ausgasen natürlich den Glasfilamenten entsprechen. Da s2-Glasfilamente mit ca. 3600 N/mm<sup>2</sup> eine deutlich höhere Zugfestigkeit als e-Glasfilament (1900 N/mm<sup>2</sup>) oder Basalt (2200 N/mm<sup>2</sup>) aufweisen, wäre dieses Material für die auf Zug belasteten Hüllen zu bevorzugen. Standardmässig - und damit leicht beschaffbar - wird aber e-Glas verwendet, was uns veranlasst im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls Glasgeflecht-Schläuche aus diesem Material einzusetzen. Wenn sich in den Versuchen von Abschnitt 4.2 erweist, dass derartige Schläuche den Anforderungen genügen, bietet s2-Glas eine Möglichkeit, die totale Wärmeleitfähigkeit durch dünnere Wandungen zu verringern.

Als Umwindungsmaterial für das Parallel-Filament-Prinzip kommen dünne Stahldrähte in Frage, die in feiner Abstufung bis hinunter zum Durchmesser von 0.025 mm industriell zur Verfügung stehen. Da Stahl bezüglich unserer Anwendung in jeder Hinsicht unproblematisch ist, bleibt abzuklären wie eng Stahldraht mit welchem Durchmesser eingesetzt werden muss, damit die Umwindung den entstehenden Zugkräften standhält. Dies soll aber Gegenstand einer nachfolgenden Arbeit sein.

Wärmetechnisch sind die ebenfalls unproblematischen gesponnenen Glasfilament-Fäden zu bevorzugen. Auch hier sind in einer späteren Arbeit die notwendige Stärke und Dichte der Umwindung abzuklären.

Die Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip müssen, wie Würste, zweiseitig abgebunden werden. Auch hierfür bieten sich dünne Stahldrähte oder Glasfäden an, deren Zugbelastung und Wärmeleitfähigkeit in diesem Falle vernachlässigbar ist.

Im Falle der Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip muss die Umwindung fixiert werden, damit sie sich nach dem Abtrennen der einzelnen Distanzhalter nicht löst. In einer späteren Untersuchung sollen hierfür die Varianten "Zunächst flüssiges dünnes Band aus Glas" und "dünnes Band aus anorganischem Hochtemperatur-Klebstoff" untersucht werden.

## 2.2 Ansätze zur industriellen Herstellung

Ansätze zur industriellen Fertigung der Distanzhalter nach beiden Prinzipien sind in den Abschnitten 1.1.5.2 und 1.1.5.3 ausführlich besprochen worden.

In beiden Fällen ist klar, dass entsprechende vollautomatische Einrichtungen für eine Serienproduktion mit relativ geringem Aufwand dargestellt werden können und damit eine kostengünstige Produktion auch unter schweizerischen Randbedingungen mit grosser Wahrscheinlichkeit erreichbar wäre.

### 2.3 Abklärung der Materialverfügbarkeit und Materialbeschaffung

Alle angesprochenen Materialien stehen industriell in grossen Mengen zur Verfügung. Auch in kleinen Mengen sind sie in der Regel leicht zu beschaffen. Lediglich die interessanten s2-Glas Rovings oder Fäden konnten wir für Versuchszwecke nicht beschaffen, was aber keine ernsthafte Behinderung dieser Arbeit darstellt.

## 3. Evaluation eines entsprechend aufgebauten Vakuumpalt-Panels

### 3.1 Konzept entsprechend neuartiger Randverbund

Jedes Vakuumpalt-Panel muss an seinen Rändern einen gasdichten Randverbund besitzen. Dieser Randverbund - im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Rand-Distanzhalter bezeichnet - ist vorteilhaft als langgestrecktes, allenfalls beliebig gekrümmtes Bauteil ausgeführt, das die beiden Grenzplatten gasdicht miteinander verbindet und zusätzlich im Sinne eines Distanzhalters die durch den Luftdruck erzeugten Druckkräfte aufnimmt. Für genügend gute Vakuumpalt-Panels sollte der Wärmetransport durch den Rand-Distanzhalter kleiner als  $0.05 \text{ Watt}/(\text{Laufmeter}, ^\circ\text{K})$  sein.

Derartige Rand-Distanzhalter können nach dem Parallel-Filament-Prinzip oder auch nach dem Ball-Prinzip realisiert werden.

#### 3.1.1 Rand-Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip

Figur 7 zeigt eine nicht massstäbliche perspektivische Schnitt-Skizze des Aufbauprinzips eines langgestreckten, allenfalls beliebig gekrümmten Rand-Distanzhalters nach dem Ball-Prinzip. Ein gasdurchlässiges, schlauchartiges Hüll-Material ist mit einem fliessfähigen Füllmaterial gefüllt und an beiden Enden jeweils durch einen in Figur 5 nicht dargestellten Verschluss verschlossen. Dieser Verschluss ist durch Umfalten des gasdurchlässigen, schlauchartigen Bauteils und durch Fixieren dieser Umklappung durch Umwinden mit einem dünnen Draht hergestellt. Ein in Figur 7 durchsichtig dargestelltes dünnes, gasdichtes Band ist dreiseitig um das mit fliessfähigem Material gefüllte, gasdurchlässige, schlauchartige Hüll-Material geformt. Die beiden Schenkel dieses gasdichten Bandes werden später gasdicht mit den beiden Grenzplatten des Vakuumpalt-Panels verbunden. Diese gasdichte Verbindung kann mittels Löten oder (Laser-)Schweissen hergestellt werden. Für eine gute Zugänglichkeit zum Zwecke dieser Verbindung kann das gasdichte Band auch so geformt sein, dass seine beiden Schenkel jeweils auf die Aussenseite der beiden Grenzplatten zu liegen kommen.

Die später nach Einbau zwischen die zwei Grenzplatten eines Vakuumpalt-Panels wirkende Druckrichtung ist mittels der beiden Pfeile angedeutet.

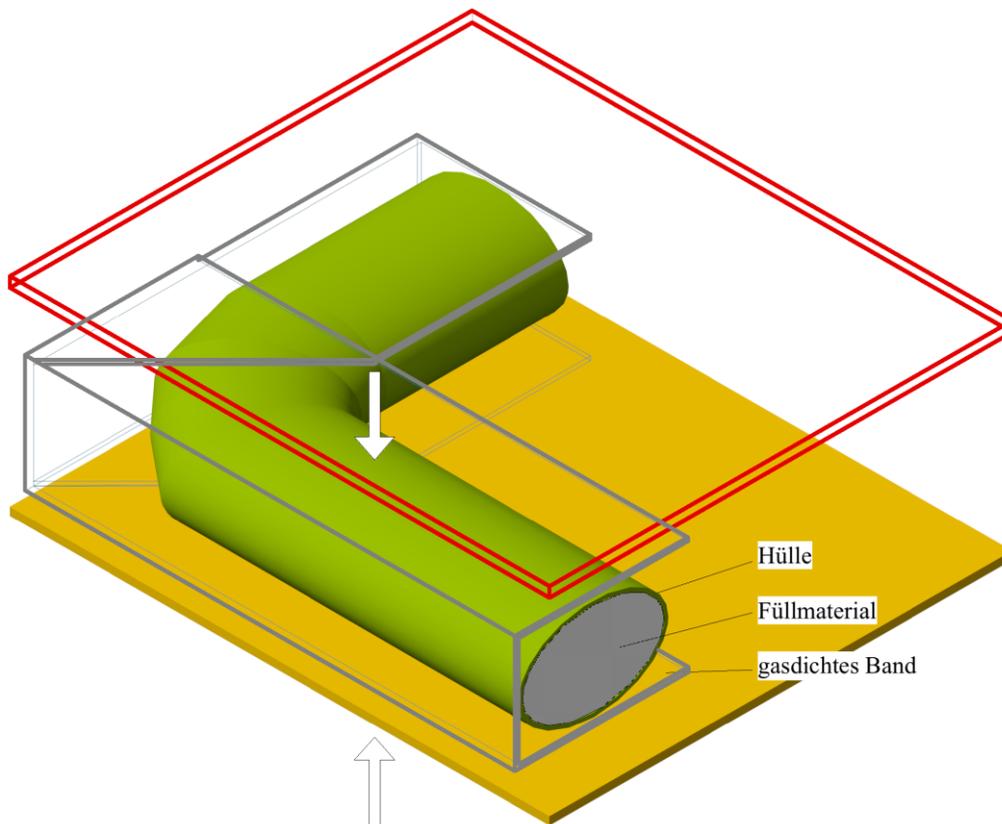


Fig. 7 Rand-Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip

Sämtliche Materialien des mit einem fließfähigen Füllmaterial gefüllten schlauchartigen Hüll-Materials entsprechen den weiter oben besprochenen Materialien für den Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip.

Das gasdichte dreiseitig geformte Band, trägt massgeblich zum Wärmetransport von Grenzplatte zu Grenzplatte bei. Aus diesem Grunde sowie aufgrund der notwendigen Formbarkeit, der grossen erforderlichen Gasdichtigkeit und der gewünschten Temperaturbeständigkeit bis über 500°C, ist die Materialauswahl eingeschränkt. In Frage kommen in erster Linie dünne Inoxstahlbänder (Wärmeleitfähigkeit 15 W/mK) mit einer Dicke von 0.005 oder 0.01 mm.

Der in Figur 7 skizzierte Rand-Distanzhalter ist beispielsweise mit einem Glasflechtschlauch von 0.2 bis 0.3 mm Wandstärke und mit fumed silica als fließfähiger Füllung aufgebaut. Unter Druck ist er beispielsweise 5 mm hoch und weist eine Breite von 10 mm auf. Das dreiseitig geformte, gasdichte Band ist beispielsweise 0.01 mm dick und besteht aus Inoxstahl. Unter diesen Randbedingungen ergibt sich, wie in Tabelle 6 ersichtlich, ein Wärmefluss durch das Füllmaterial, den Glasflechtschlauch und das Stahlband von total ca. 0.1 W/(Laufmeter,°K).

Rand- höhe	Dicke Stahl- band	Breite Kern	Dicke Glasfl. schlauch	$\lambda$ Stahl	$\lambda$ Kern evak.	$\lambda$ Glas- flecht- schlauch	Wärmefluss pro Laufmeter
m	m	m	m	W/mK	W/mK	W/mK	W/LfmK
0.005	1.0E-05	0.005	0.200	15	0.005	0.89	0.106
0.017	1.0E-05	0.005	0.200	15	0.005	0.89	0.031
0.017	1.0E-05	0.005	<b>0.100</b>	15	0.005	0.89	0.021
0.017	1.0E-05	0.005	0.100	15	0.005	<b>0.30</b>	0.014

Tab.6 Analytische Abschätzung des Wärmeflusses durch Rand-Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip

Dieser Wert entspricht nur knapp der minimalen Zielsetzung. Er ist durch in Abschnitt 3.2 besprochene konstruktive Massnahmen am Rande eines Vakuumpalt-Isolations-Elementes, die eine Verlängerung des Wärmeleitpfades um mehr als den Faktor 3, also von beispielsweise 5 mm auf beispielsweise 17 mm bringt, um eben diesen Faktor verbesserbar. Damit ergibt sich ein totaler Wärmefluss durch den Rand-Distanzhalter von ca. 0.03 W/(Laufmeter,°K).

Dieser Wert entspricht der angestrebten Zielsetzung. Mit den in Abschnitt 1.1.5.2 besprochenen Massnahmen kann das Hüll-Materials aber einmal um einen Faktor 2 und zusätzlich einen Faktor 3 verbessert werden. Durch Kombination der oben genannten Massnahmen, besteht das Potential, den Wärmefluss durch den gesamten Rand-Distanzhalter um ca. einen Faktor 2 auf 0.014 W/(Laufmeter,°K) abzusenken.

### 3.1.2 Rand-Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip

Der in Figur 8 skizzierte Rand-Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip ist in seinem Innern exakt gleich aufgebaut wie ein Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip, wobei er zwei beispielsweise 0.1 bis 0.2 mm dicke Verstärkungsbänder aus Stahl besitzt, welche zur Definition zweier ebenen Auflageflächen dienen. Ein Filament-Bündel ist, zusammen mit vorhandenen Verstärkungsbändern mit einem draht-, filament- oder fadenartigen Hüll-Material umwunden. Die verwendeten Materialien entsprechen den bezüglich Figur 6 geschilderten. Dieser innere Aufbau besitzt unter Vakuum die bezüglich Figur 6 geschilderte geringe Wärmeleitfähigkeit und ist in der Lage die durch den Luftdruck hervorgerufenen, im Falle des Rand-Distanzhalters von drei Seiten wirkenden Druckkräfte zu übernehmen.

Zur Erzeugung der notwendigen hohen Gasdichtigkeit ist dieser innere Aufbau dreiseitig mit einem gasdichten, geformten Randband umgeben, wobei der obere und untere Schenkel dieses Bandes später so mit je einer der Grenzplatten eines Vakuumpalt-Panels gasdicht verbunden ist, dass die nicht von dem dreiseitigen Band abgedichtete Seite zum Inneren des Vakuumpalt-Isolations-Elementes hin ausgerichtet ist. Damit ist der innere Aufbau beim Abpumpen ebenfalls evakuierbar.

Das gasdichte dreiseitig geformte Band trägt massgeblich zum Wärmetransport von Grenzplatte zu Grenzplatte bei. Aus diesem Grunde, sowie aufgrund der notwendigen Faltbarkeit, der grossen erforderlichen Gasdichtigkeit und der gewünschten Temperaturbeständigkeit bis über 500°C, ist die Materialauswahl eingeschränkt. In Frage kommen in erster Linie dünne Inoxstahlbänder (Wärmeleitfähigkeit 15 W/mK) mit einer Dicke von 0.005 oder 0.01 mm.

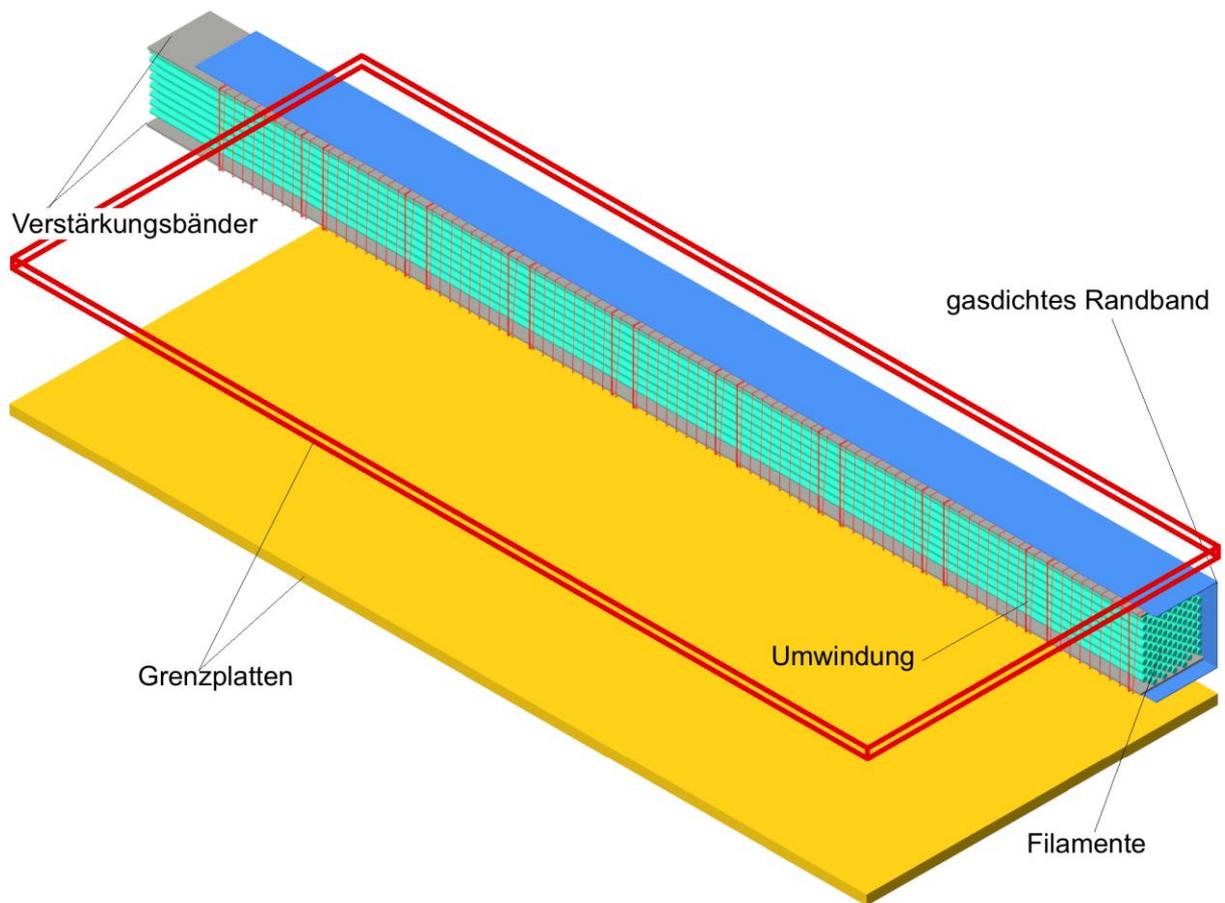


Fig. 8 Rand-Distanzhalter nach dem Parallel-Filament-Prinzip

Der in Figur 8 skizzierte Rand-Distanzhalter ist mit e-Glas Filamenten im Filament-Bündel und einer spiralgigen Umwicklung mit gesponnenem Faden aus Glasfilamenten und Windungsabstand 0.05 mm, mit einer Breite von 10 mm und einer Höhe von 5 mm hergestellt. Dazu besitzt er 0.2 mm dicke Inoxstahl-Verstärkungsbänder. Das dreiseitig geformte, gasdichte Band ist 0.01 mm dick und besteht aus Inoxstahl. Unter diesen Randbedingungen ergibt sich, wie in Tabelle 7 ersichtlich, im evakuierten Zustand ein Wärmefluss durch das Filament-Bündel, die Umwindung und das gasdichte Stahlband von total ca. 0.03 W/(Laufmeter,°K).

Dieser Wert entspricht der angestrebten Zielsetzung. Er ist durch in Abschnitt 3.2 besprochene konstruktive Massnahmen am Rande eines Vakuumpalt-Isolations-Elementes, die eine Verlängerung des Wärmeleitpfades um mehr als den Faktor 3, also von beispielsweise 5 mm auf beispielsweise 17 mm bringt, um eben diesen Faktor verbesserbar. Damit ergibt sich ein totaler Wärmefluss durch den Rand-Distanzhalter von ca. 0.01 W/(Laufmeter,°K).

Rand- höhe mm	Anz Wind./m Glasfa- den	q pro Laufm. roving W/LfmK	q pro Laufm. Glasfaden W/LfmK	q pro Laufm.tot. roving umwickelt W/LfmK	Stahlband Dicke mm	q pro Laufm. Stahlband W/LfmK	q pro Laufm.tot. Rand- verbund W/LfmK
<b>5</b>	1667	0.0015	0.002	0.0035	0.01	0.030	0.0335
<b>17</b>	1667	0.0015	0.0006	0.0021	0.01	0.009	0.0109

Tab. 7 Analytische Abschätzung Wärmefluss durch Parallel-Filament-Rand-Distanzhalter

### 3.2 Vorentwurf eines entsprechenden Panels

Ein Vakuumpalt-Panel kann wie in Figur 9 skizziert aussehen. Beim gezeigten Entwurf kommt das Ball-Prinzip bei den inneren Distanzhaltern und das Parallel-Filament-Prinzip bei den Rand-Distanzhaltern zum Einsatz.

Die Höhe des Vakuums, bzw. der Ball-Distanzhalter ist mit beispielsweise 5 mm angenommen.

Zusammen mit den beiden weiter unten besprochenen Sandwichplatten ergibt sich so eine Gesamtdicke des Vakuumpalt-Panels von knapp unter 18 mm.

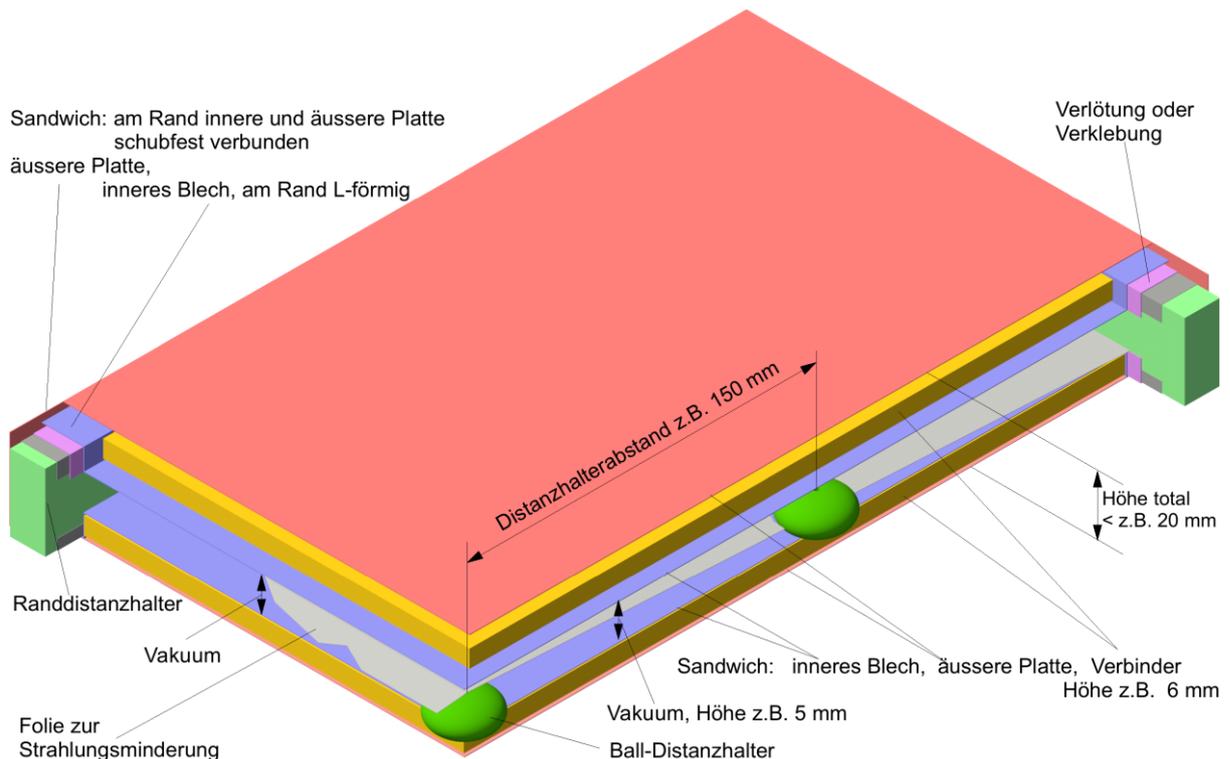


Fig. 9 Prinzipskizze eines Vakuumpalt-Panels mit Ball- und Parallel-Filament-Distanzhaltern

Als das Vakuum begrenzende Elemente werden Sandwich-Platten verwendet. Dies ist wegen der benötigten Biegesteifigkeit der Platten notwendig.

Nimmt man eine Sandwich-Konstruktion an, bei welcher zwei 0.1 mm starke Stahlplatten mittels eines 6 mm dicken Hartschaums verbunden sind, so ergibt sich bei einem angenommenen Abstand der inneren Distanzhalter von 150 mm eine Durchbiegung der Verbundplatte von ca. 0.7 mm in der Mitte des eines Distanzhalterfeldes unter Einwirkung des Luftdrucks. Die Formeln zur Abschätzung derartiger Durchbiegungen finden sich beispielsweise in "Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau". In Tabelle 8 finden sich einige Werte für verschiedene Distanzhalter-Abstände.

Dicke Stahlplatten [mm]	Coredicke mm	Dist' halter Abstand [mm]	Durchbiegung [mm]	Gew. Stahl kg/m <sup>2</sup>
0.10	6.00	150.00	0.66	1.57
0.30	6.00	200.00	0.65	4.71
0.30	9.00	240.00	0.62	4.71

Tab. 7 Durchbiegungen von Stahl-Sandwichplatten

Bezüglich der für das Sandwich zu verwendenden Materialien ist klar, dass die dem Vakuum zugewendete innere Platte der Dichtigkeit und des Ausgasens wegen Innoxstahl sein muss. Die äussere Platte hingegen kann aus einem beliebigen Material genügender Steifigkeit gefertigt sein, also beispielsweise aus nicht rostfreiem Stahl oder aus einem faserverstärkten Kunststoff.

Auch der Verbinder zwischen innerer und äusserer Platte kann aus einem beliebigen geeigneten Material sein. Er muss keine zusätzliche Biegesteifigkeit mitbringen sondern lediglich grossflächig für eine auf Schub belastbare Verbindung sorgen. Insbesondere kann die Verbindung zwischen den beiden Sandwichplatten auch hergestellt sein, indem eine oder beide Platten mit Sicken versehen sind, welche mit der anderen Platte beispielsweise verklebt, verlötet oder verschweisst werden. Dies hat den Vorteil, dass die Sicken die Einzel-Platte zusätzlich versteifen, was beispielsweise durch Verwendung eines dünneren Materials genutzt werden kann.

In Figur 9 ist die innere der beiden Platten an den Rändern L-förmig gegen aussen geformt. Dies hat erstens den Vorteil, dass die Sandwichplatten entlang des äusseren L-Schenkels sehr schubfest miteinander verbunden werden können. Zweitens resultiert mit einer derartigen Konstruktion eine deutliche Verbesserung des Wärmeflusses durch den Rand-Distanzhalter, dessen Aufbau in Abschnitt 3.1.2 ausführlich besprochen wurde. Bei einer angenommenen Höhe des Vakuumpaltes von 5 mm und einer Dicke des Sandwichs von 6 mm resultiert nämlich eine Höhe des Rand-Distanzhalters von ca. 17 mm, was einer Verringerung des Wärmeflusses um ca. einen Faktor 3 gegenüber einer Konstruktion ohne L-Rand bedeutet.

In Figur 9 ist weiter eine zusätzliche Folie zur Strahlungsminderung im Innern des Vakuumpaltes dargestellt. Mindestens eine derartige Folie ist notwendig um den erwünschten geringen totalen Wärmefluss durch das Vakuum zu erhalten.

Nimmt man beispielsweise an, die beiden den Vakuumpalt begrenzenden Stahlplatten haben einen Wärmestrahlungs-Koeffizienten von 0.15 und die Temperaturen der Platten betragen, wie bei einem Kühlschrank, 25°C bzw. 5°C, so ergibt sich ohne Zwischenfolie ein Wärmefluss durch Strahlung von ca. 0.44 W/m<sup>2</sup>K, während der Wärmefluss durch das Restgas (bei 10<sup>-4</sup> mbar) lediglich 0.026 W/m<sup>2</sup>K und derjenige durch die Summe der Ball-Distanzhalter im besten Fall nur 0.002 W/m<sup>2</sup>K (siehe Tabelle 3) beträgt. Der gesamte Wärmefluss ohne Folie in der Mitte des Panels, d.h. ohne Berücksichtigung der Randverluste, beträgt damit ca. 0.47 W/m<sup>2</sup>K.

Wird eine Aluminiumfolie (Strahlungs-Koeffizient 0.05) eingebracht, reduziert sich der Wärmefluss durch Strahlung auf ca. 0.1 W/m<sup>2</sup>K, bei Verwendung von 2 Alu-Folien auf 0.06 W/m<sup>2</sup>K und mit 3 Folien auf ca. 0.042 W/m<sup>2</sup>K. Entsprechend ergeben sich für den totalen Wärmefluss die Werte 0.13 W/m<sup>2</sup>K, 0.09 W/m<sup>2</sup>K und 0.07 W/m<sup>2</sup>K in der Mitte des Vakuumpalt-Panels.

Nimmt man an, ein Vakuumpalt-Panel sei beispielsweise 0.6 m breit und 1.2 m lang und habe eine dementsprechende totale Randlänge von 3.6 m so ergeben sich für verschiedene Bauarten des Panels die in Tabelle 8 gezeigten Werte. Dabei wird davon ausgegangen, dass der angegebene Restdruck im Vakuum (10<sup>-4</sup> mbar) nach mindestens 10 Jahren noch nicht überschritten ist.

Isolationspanel						
Breite =	0.6 m		Länge=	1.2 m		
Vakuums- spalt	5 mm Spalt, 2 Alu-Folien, Restgas $1.3 \cdot 10^{-4}$ W/mK @ $10^{-4}$ mbar					
Distanz- halter	q Vaku W/K	q Strahl. W/K	q Disth W/K	q durch 3.6m Rand W/K	q total W/K	Panel Dicke mm
Bälle innen+Rand	0.019	0.043	0.001	0.075	0.138	20
Parallel-Fila. innen+Rand	0.019	0.043	0.004	0.039	0.105	20
Bälle innen, PaFi Rand	0.019	0.043	0.001	0.039	0.102	20
VIP "klassisch"						
<i>Wärmeleitwert metallisierte Kunststoff-Folie über den VIP-Rand (Simmler, EMPA*)</i>						
$L^{2D}$						
W/LaufmeterK						
0.0065						
	$\lambda$ Kernmat. W/mK	q Kernmat W/K		q Rand W/K	q total W/K	Panel Dicke mm
	0.005	0.113		0.023	0.136	32
	0.005	0.080		0.023	0.103	45
PUR bzw. PIR	$\lambda$ W/mK	q Kernmat W/K			q total W/K	Panel Dicke mm
	0.025	0.138			0.138	130
	0.025	0.103			0.103	175

Tab. 8 Analytische Abschätzung des Wärmeflusses durch ein Vakuumsfalt-Panel und Vergleich mit anderen Isolationsarten

Es ist ersichtlich, dass ein der Figur 9 entsprechendes 0.6x1.2 m grosses Panel machbar ist, welches bei einer totalen Bauhöhe von knapp 20 mm einen totalen Wärmefluss von ca. 0.1 W/K aufweist.

Verglichen wird ein "klassisches" VIP mit fumed silica als Kernmaterial und einer Mehrschicht Verbundfolie, welche insgesamt 0.1 mm Kunststoff (PET, PP, PUR) und 0.2  $\mu$ m Aluminium beinhaltet. Es zeigt sich, dass ein solches VIP deutlich über 40 mm dick sein muss um einen entsprechend niedrigen totalen Wärmefluss zu realisieren. Der Wärmeleitwert für das Kernmaterial von 0.05 W/mK berücksichtigt eine ca. 1 bis 2 Jahre andauernde Alterung des VIP-Panels.

Eine entsprechend grosse Isolationsplatte aus PUR oder PIR-Schaum müsste für denselben Wärmefluss eine Dicke von 175 mm aufweisen.

\* BfE Jahresbericht 2002

"Vakuumdämmung - Qualitätssicherung und bauphysikalische Grundlagen" S.6

### 3.3 Kosten-Nutzen-Betrachtung

Wie die obige Tabelle 8 zeigt ist ein Vakuumpalt-Panel im wärmetechnischen Sinne besser als ein "klassisches" VIP oder die heute üblichen Dämmmaterialien.

Ein Chance zur Realisierung besteht - Sonderfälle ausgenommen - aber nur, wenn auch der Preis stimmt.

Vakuumpalt-Panel	Breite m 1	Länge m 1			
Stahlplatten	Fläche total m <sup>2</sup> 4	Dicke mm 0.1		CHF/m <sup>2</sup> 6.15	Kosten Platten CHF 25.00
Verbindungs-Schaum	Fläche total m <sup>2</sup> 2	Dicke mm 6			Kosten Schaum 1.50
Distanzhalter innen	Anzahl / m <sup>2</sup> 33	Kosten Material 0.03	Kosten Anlage + Personal 0.25		Kosten Disth. innen 0.30
Rand-Distanzhalter	Lauf- meter 4	Kosten Material 0.4	Kosten Anlage + Personal 3.10		Kosten Rand-Disth. 3.50
Stahl-Randband	Lauf- meter 4	Dicke mm 0.02	Breite mm 35	CHF/Lfm 1.35	Kosten Band 5.40
Herstellung Panels	Stk/a 60'000	Betriebs- und Anlagekosten/a 500'000	Personal/ a 600'000		Montage kosten / Stk 18.00
				<b>HK Panel / m<sup>2</sup></b>	<b>53.70</b>
				<b>VK Panel / m<sup>2</sup></b>	<b>75.00</b>

Tab. 9 Schätzung der Herstellkosten für ein Vakuumpalt-Panel

Tabelle 9 zeigt eine Schätzung der Herstellkosten die für ein Figur 9 entsprechendes Vakuumpalt-Panel anfallen würden. Die für Stahlplatten, Stahl-Randband, Schaum und Material der Distanzhalter angegebenen Kosten beruhen entweder auf uns vorliegenden Angeboten (Stahl) für mittlere Mengen oder auf über das Internet zugänglichen Preislisten.

Alle betrachteten Stähle sind vakuumtaugliche Stähle mit einem Wärmeleitkoeffizienten von 15 W/mK. Bei Verwendung eines nicht rostfreien Stahls für die äusseren Platten des Sandwichs können die Kosten für die Stahlplatten deutlich gesenkt werden.

Die Anlage- und Personalkosten beruhen auf Erfahrung basierenden Annahmen.

Bei Herstellkosten von ca. 54 CHF/m<sup>2</sup> könnte ein 1 m<sup>2</sup> grosses Panel mit einem industrieüblichen Faktor gerechnet für ca. CHF 75 verkauft werden.

Tabelle 10 zeigt für VIP und andere Dämmstoffe anfallende Kosten in einer für das BfE ausgearbeiteten Arbeit bezüglich VIP am Bau. Die Tabelle wurde von uns mit den aktuellen Werten für PIR ergänzt.

Mit dem dort angegebenen Preis von CHF 7000 pro m<sup>3</sup> würde ein in seinem Dämmwert dem Vakuumpalt-Panel gleichwertiges VIP CHF 315 pro m<sup>2</sup> kosten. Selbst wenn man die sehr unwahrscheinliche Annahme macht, dass dieser Preis in kurzer Zeit auf ein Viertel absinkt, würde er immer noch über CHF 75 pro m<sup>2</sup> betragen.

Gegenüber einer VIP-Lösung kann die Lösung mit Vakuumpalt also durchaus attraktiv sein.

Eine 175 mm dicke PIR-Platte mit entsprechendem Wärmefluss würde ca. CHF 55 kosten, womit unter Berücksichtigung der erheblich geringeren Dicke und der damit verbundenen Gewinne an innerem Volumen bei gleichen Aussenabmessungen eine Wärmedämmung mit Vakuumpalt-Panel auch im Vergleich zu PIR vorteilhaft sein kann.

Bundesamt für Energie BFE  
 BAUELEMENTE UND SYSTEME MIT VIP FÜR AUSSENWANDKONSTRUKTIONEN  
 Ausgearbeitet durch Armin Binz und Gregor Steinke, Institut Energie am Bau – FHNW  
 März 2008

Tabelle 1: Kosten von Wärmedämmstoffen im Verhältnis zum thermischen Widerstand.

	ca. Materialpreis CHF/m <sup>3</sup>	$\lambda$ W/(mK)	R m <sup>2</sup> ·K/W	Materialpreis / R CHF/m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·K/W)
Steinwolle	220	0.036	28	8
PIR	310	0.026	38	8
Phenolharzschaum	450	0.023	43	10
Schaumglas	525	0.04	20	21
Aerogel (Granulat)	3400	0.018	55	60
VIP	7000	0.008	125	56
		0.007	143	49
		0.006	167	42

Tab.10 Kosten von VIP und anderen Dämmstoffen

Ein weiterer Nutzen der Vakuumpalt-Panel wurde noch nicht betrachtet, nämlich die Tatsache, dass derartige Panels konstruktionsbedingt in sich fest sind und eine feste Aussen- und Innenhaut besitzen. Dies bedeutet, dass - im Gegensatz zu VIP- oder PIR-Panels - bei vielen Anwendungsmöglichkeiten, wie beispielsweise bei Kühlschränken und ähnlichen Geräten, kein - oder nur wenig - zusätzliches Struktur- und Hüllmaterial benötigt wird. Dies kann für den Gesamtaufbau eines Gerätes in hohen Kosteneinsparungen resultieren.

## 4. Versuche

Die bei dünnwandigen Vakuumpalt-Panels zur Aufrechterhaltung des Spaltes notwendigen Distanzhalter, inklusive der Rand-Distanzhalter bzw. des Randverbundes sind ein entscheidendes Element für das thermische und mechanische Verhalten und den Preis des Panels.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit haben sich deshalb die messtechnischen Bemühungen auf die in den Abschnitten 1.1.5.2 bzw. 1.1.5.3 besprochenen inneren Distanzhalter nach dem Ball-Prinzip bzw. dem Parallel-Filament-Prinzip beschränkt.

Da die den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 besprochenen entsprechenden Rand-Distanzhalter wegen ihrer grösseren relativen Fläche wesentlich geringeren Drücken ausgesetzt sind, lassen sich die an den inneren Distanzhaltern gewonnenen Erkenntnisse ohne Einschränkung auf die Rand-Distanzhalter übertragen.

### 4.1 Physikalische Eigenschaften der Distanzhalter prüfen

#### 4.1.1 Thermisches und mechanisches Verhalten unter hohem Druck

Qualitativ zu messen sind die Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Test-Distanzhalter. Beide Distanzhaltertypen besitzen prinzipiell eine biegeschlafe, zugfeste, dünne Hülle mit geringer Wärmeleitfähigkeit in deren Innerem ein weicher Kern bestehend aus einer Vielzahl von gegeneinander verschieblichen Einzelementen vorhanden ist. Die Summe dieser Einzelemente weist in evakuiertem Zustand eine Wärmeleitfähigkeit von höchstens  $5 \cdot 10^{-3}$  W/mK auf. Unter Luftdruck liegt die rechnerisch abgeschätzte Wärmeleitfähigkeit der Test-Distanzhalter (Kernmaterial und Hülle) im Falle der Parallel-Filamente total bei ca. 0.05 W/mK beim Ball-Prinzip ca. bei 0.08 W/mK.

Im Falle der betrachteten Parallel-Filament-Distanzhalter besteht der Kern aus einigen Tausend Glasfilamenten, welche im Wesentlichen parallel zueinander verlaufen.

Im Falle der Ball-Distanzhalter besteht der Kern aus einer Vielzahl von "fumed silica" Körnern.

Da die Distanzhalter lokal im Inneren von Vakuumpalt-Panels zum Einsatz kommen sollen, sind sie Druckkräften bis deutlich über  $20 \text{ N/mm}^2$  ausgesetzt und es gilt zu bestimmen, ob sich ihr thermisches Verhalten unter diesem hohen Druck verändert.

Es gilt also heraus zu finden, ob sich die innere Struktur der Test-Distanzhalter unter hohem Druck so verändert, dass sich die Wärmeleitfähigkeit derselben sehr stark erhöht, d.h. beispielsweise um einen Faktor 5 oder mehr grösser wird.

Im Falle der Parallel-Filament-Distanzhalter wäre dies durch ein Ineinander-Fliessen der im Wesentlichen parallel zueinander verlaufenden Glasfilamente erklärbar.

Im Falle der Ball-Distanzhalter wäre dies durch ein Kollabieren der inneren Struktur der einzelnen Körner des Kernmaterials erklärbar.

Eine schwächer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, beispielsweise um einen Faktor 1 bis 3, liesse sich in beiden Fällen durch eine dichtere Anordnung der einzelnen Elemente, d.h. entweder der Filamente oder der Körner, sowie eine bessere Ankoppelung der Testdistanzhalter an die Druckstempel erklären.

Zusätzlich soll versucht werden einen Schätzwert für die Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Distanzhalters zu erhalten.

Figur 10 zeigt links die Zusammenstellung und rechts die Explosionsdarstellung des realisierten Messaufbaus.

Die Messanordnung besitzt im Wesentlichen zwei Druckstempel, zwischen denen der Test-Distanzhalter eingelegt und mit steigenden Druckkräften belastet wird.

Der Gesamtaufbau ist so gestaltet, dass ohne eingelegten Test-Distanzhalter der Wärmefluss von Stempel zu Stempel möglichst gering ist. Dies ist mittels der drei äusseren Stahlrohre gewährleistet, die mit einer totalen Querschnittsfläche von ca.  $66 \text{ mm}^2$ , einer Höhe von ca. 300 mm bei einer Temperaturdifferenz von ca.  $30^\circ\text{C}$  einen Wärmefluss von wenig über  $0.1 \text{ W}$  aufweisen.

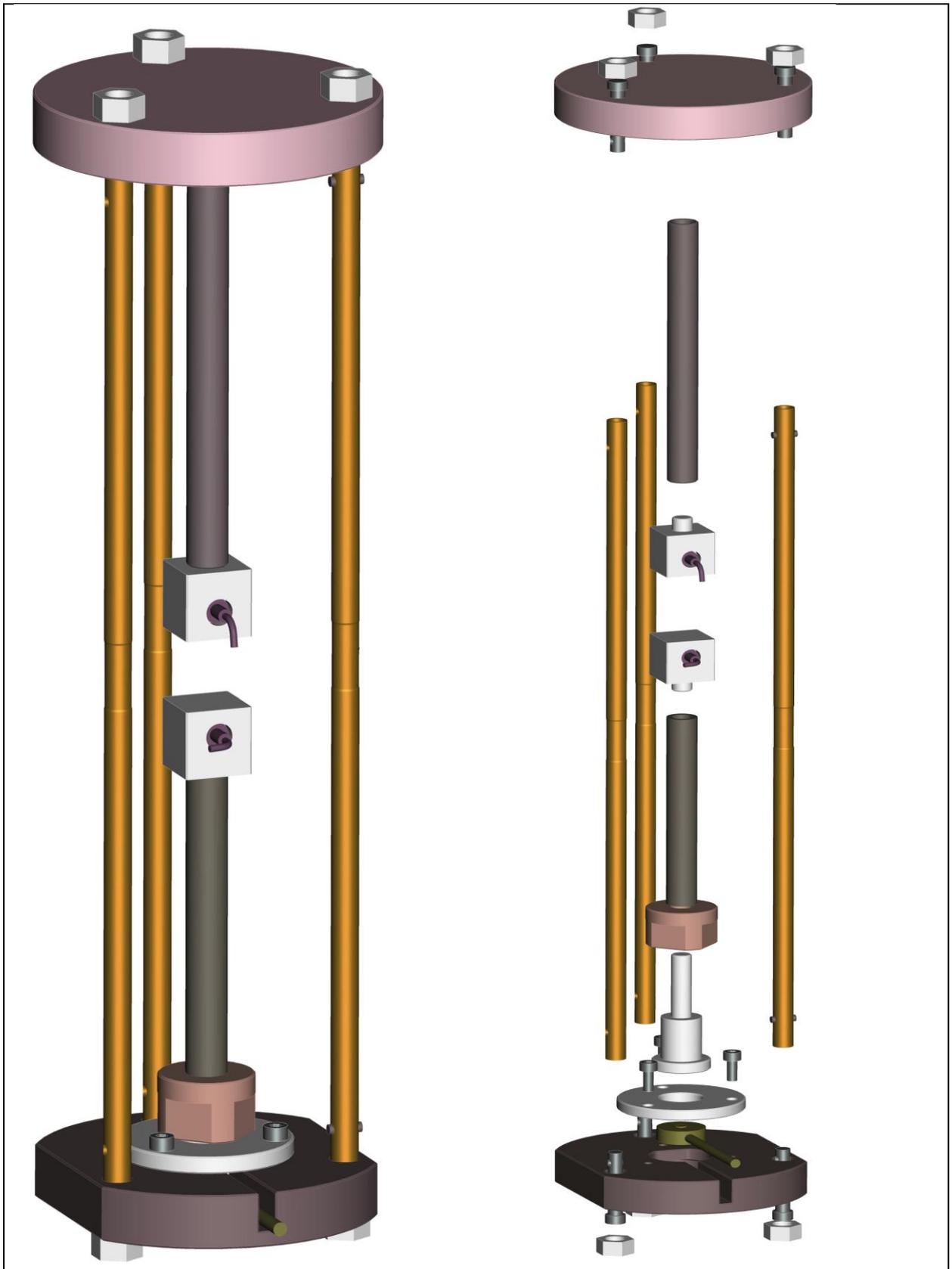


Fig. 10 Aufbau zur Bestimmung des thermischen und mechanischen Verhaltens Von Test-Distanzhaltern unter Druck

Einer der beiden Stempel ist mit geregelter Heizleistung so beheizt, dass sich eine Beharrungstemperatur von ca. 60°C an diesem Stempel einstellt.

Gemessen - und in den Berechnungen berücksichtigt - werden die Temperaturen der beiden Stempel, die Umgebungstemperatur, die auf den beheizten Druckstempel wirkende Heizleistung und die zwischen den Stempeln wirkende Druckkraft in Funktion der Zeit, wobei zunächst bei leichtem Druck das Erreichen des Beharrungszustandes der Temperaturen abgewartet wird und dann der Druck stufenweise erhöht wird.

Die Druckerhöhung erfolgt manuell über die im unteren Teil von Figur 11 erkennbare Stellenschraube, unterhalb der auch die Messung der Druckkraft erfolgt.

Von vorneherein klar ist, dass sich die Geometrie der Distanzhalter mit zunehmendem Druck zunehmend in dem Sinne verändern wird, dass ihre Höhe abnimmt und ihre Querschnittsfläche zunimmt. Diese Veränderung kann so geschehen, dass das Volumen der Distanzhalter konstant bleibt. Dies kann aber auch so geschehen, dass das Volumen ändert. Eine Zunahme des Volumens ist durch eine Dehnung der Hüllelemente des jeweiligen Distanzhalters erklärbar. Eine Abnahme des Volumens ist durch eine dichtere Packung der einzelnen Elemente des Distanzhalters erklärbar.

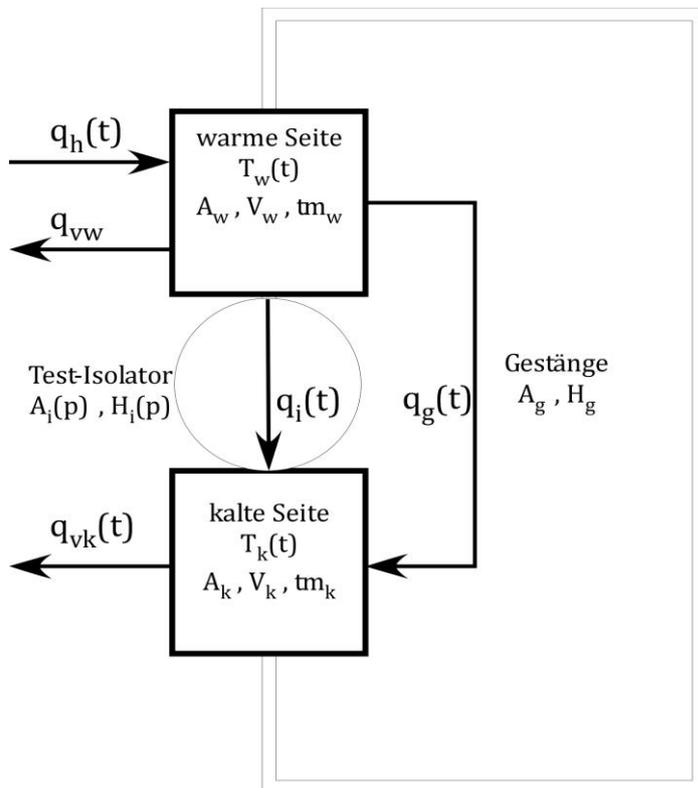
Man steht vor der Problematik, dass die - in den Messungen durch die Veränderung der Temperaturdifferenz zwischen dem beheizten und nicht beheizten Stempel - klar erkennbare Veränderung des Wärmeflusses zwischen den Stempeln gleichzeitig durch unterschiedliche Ursachen hervorgerufen sein kann: durch eine Veränderung der Geometrie und/oder eine Veränderung der Packungsdichte, wobei die Letztere mit einer Veränderung der Wärmeleitfähigkeit einhergehen kann, aber nicht muss. Zusätzlich kann theoretisch parallel dazu durch eine strukturelle Veränderung des Kernmaterials eine erhebliche Veränderung der Wärmeleitfähigkeit auftreten.

Da eine geschlossene analytische Lösung hierzu nicht bekannt ist, wird auf eine (analytische) Modellierung der Wärmeflüsse im gesamten Messaufbau, inklusive der Test-Distanzhalter zurückgegriffen, mit der die - in Funktion der Zeit und des Druckes gemessenen - Temperaturen des beheizten und nicht beheizten Stempels nachgebildet werden können.

Bei dieser Modellierung wird zunächst von einer unter hohem Druck konstant bleibenden Wärmeleitfähigkeit, aber einer sich verändernden Geometrie der Test-Distanzhalter ausgegangen. Wenn es unter diesen Annahmen gelingt, die - in Funktion der Zeit und des Druckes - gemessenen Kurven mit guter Genauigkeit nachzubilden, kann dies als Beweis gelten, dass sich die innere Struktur und die Wärmeleitfähigkeit der Distanzhalter unter Druck zumindest nicht wesentlich verändert.

Zur weiteren Verbesserung der Aussagefähigkeit der Berechnungen werden auch Kurven berechnet, die ab einem bestimmten, allenfalls aus den gemessenen Kurven ablesbaren Zeitpunkt, von einer der geometrischen Veränderung überlagerten deutlichen Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Test-Distanzhalter ausgehen. Wenn sich diese Kurven deutlich von den gemessenen unterscheiden ist dies eine zusätzliche Bestätigung einer nicht veränderten inneren Struktur der Test-Distanzhalter. Stimmen diese Kurven aber besser mit den gemessenen überein, ist von einer Veränderung der inneren Struktur, gekoppelt mit einer Veränderung der Wärmeleitfähigkeit, auszugehen.

Es wird das folgende einfache, aber genügend genaue mathematische Modell verwendet:



- (1)  $q_i(t) = \lambda_i * (T_w(t) - T_k(t)) * A_i/H_i$       Wärmefluss durch den Testisolator  
 ;  $\lambda_i$  :      Wärmeleitfähigkeit Testisolator, aus Messungen geschätzt  
 ;  $A_i$  :      Querschnittsfläche Testisolator, gemessen in Funktion des Drucks  
 ;  $H_i$  :      Höhe Testisolator, gemessen in Funktion des Drucks
  - (2)  $q_g(t) = \lambda_g * (T_w(t) - T_k(t)) * A_g/H_g$       Wärmefluss durch das Gestänge  
 ;  $\lambda_g$  :      Wärmeleitfähigkeit Gestänge, gegeben  
 ;  $A_g$  :      Querschnittsfläche Gestänge, gegeben  
 ;  $H_g$  :      Höhe Gestänge, gegeben
  - (3)  $q_w(t) = q_h - q_i(t) - q_g(t) - q_{vw}(t)$       Wärmefluss am warmen Stempel  
 ;  $q_h$  : Heizleistung
  - (4)  $q_k(t) = q_i(t) + q_g(t) - q_{vk}(t)$       Wärmefluss am kalten Stempel
  - (5)  $q_{vw}(t) = \alpha_{vw} * (T_w(t) - T_u(t)) * A_w$       Wärmeabfluss am warmen Stempel  
 ;  $A_w$  : geschätzte Fläche zur Umgebung warme Seite  
 ;  $\alpha_{vw}$  : äquivalenter Übergangskoeff zur Umgebung warme Seite,  
 beinhaltet Wärmeübergang und Strahlung von Stempel + Gestänge,  
 geschätzt und iterativ angepasst
  - (6)  $q_{vk}(t) = \alpha_{vk} * (T_k(t) - T_u(t)) * A_k$       Wärmeabfluss am kalten Stempel  
 ;  $A_k$  : geschätzte Fläche zur Umgebung kalte Seite  
 ;  $\alpha_{vk}$  : äquivalenter Übergangskoeff zur Umgebung kalte Seite,  
 beinhaltet Wärmeübergang + Strahlung Stempel, geschätzt, iterativ angepasst
  - (7)  $T_w(t) = (q_w(t) * t) / t_{mw}$       Temperatur am warmen Stempel  
 ;  $t_{mw}$  : äquivalente thermische Masse warme Seite, geschätzt, iterativ angepasst
  - (8)  $T_k(t) = (q_k(t) * t) / t_{mk}$       Temperatur am kalten Stempel  
 ;  $t_{mk}$  : äquivalente thermische Masse kalte Seite, geschätzt, iterativ angepasst
- im Beharrungszustand ( $t = t_b$ ) gilt:
- (9)  $q_w(t_b) = 0$ ,      mit (3)  $\Rightarrow q_{vw}(t_b) = q_h - q_i(t_b) - q_g(t_b)$
  - (10)  $q_k(t_b) = 0$ ,      mit (4)  $\Rightarrow q_{vk}(t_b) = q_h + q_i(t_b)$

damit können erste Schätzwerte für die äquivalenten Übergangskoeff. berechnet werden  
 mit (5)      (11)  $\alpha_{vw} = q_{vw}(t_b) / ((T_w(t_b) - T_u(t_b)) * A_w)$   
 mit (6)      (12)  $\alpha_{vk} = q_{vk}(t_b) / ((T_k(t_b) - T_u(t_b)) * A_k)$

Die äquivalenten Übergangskoeffizienten sind als von der Grösse des Wärmeflusses zwischen warmen und kalten Druckstempel abhängig zu betrachten. Dies aus dem Grunde, weil mit zunehmendem Wärmefluss zunehmende Teile der "kalten Seite" des Messaufbaus soweit aufgeheizt werden, dass ein wesentlicher Wärmeübergang zur Umgebung stattfindet. Da damit auch eine Veränderung der eine Rolle spielenden Geometrie stattfindet, ändert sich auch der äquivalente Übergangskoeffizient. Die mit den obigen Formeln bestimmten Anfangswerte der äquivalenten Übergangskoeffizienten müssen deshalb im Zuge der Berechnungen mit Hilfe eines Multiplikators von Hand iterativ solange angepasst werden, bis die berechneten Kurven gut mit den gemessenen übereinstimmen.

Aus demselben Grund muss eine entsprechende iterative Anpassung der äquivalenten thermischen Massen erfolgen, deren Anfangswerte wie folgt bestimmt werden:

- (13)  $t_{mw} = \kappa_{\text{Stahl}} * V_w * \rho_{\text{Stahl}}$   
 ;  $\kappa_{\text{Stahl}}$  : spez. Wärmekapazität Stahl;  
 ;  $\rho_{\text{Stahl}}$  : spez. Gewicht Stahl  
 ;  $V_w$  : geschätztes äquivalentes Volumen warme Seite
- (14)  $t_{mk} = \kappa_{\text{Stahl}} * V_k * \rho_{\text{Stahl}}$   
 ;  $V_k$  : geschätztes äquivalentes Volumen kalte Seite

Zur Kontrolle des mathematischen Modells wurde zunächst eine Messung ohne Teststück durchgeführt (siehe Fig.11). Die mathematische Nachbildung der gemessenen Kurven mit dem geschilderten Modell erfolgte unter der Annahme, dass zwischen den beiden, nicht belasteten, Druckstempeln die Wärmeleitfähigkeit leicht bewegter Luft herrsche. Da bei dieser ersten Messung versehentlich nicht mit konstanter Heizleistung gearbeitet wurde, wurde der dokumentierte Verlauf der Heizleistung bei der Berechnung berücksichtigt. Es zeigt sich eine fast perfekte Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Kurven, womit die Tauglichkeit des mathematischen Modells verifiziert ist.

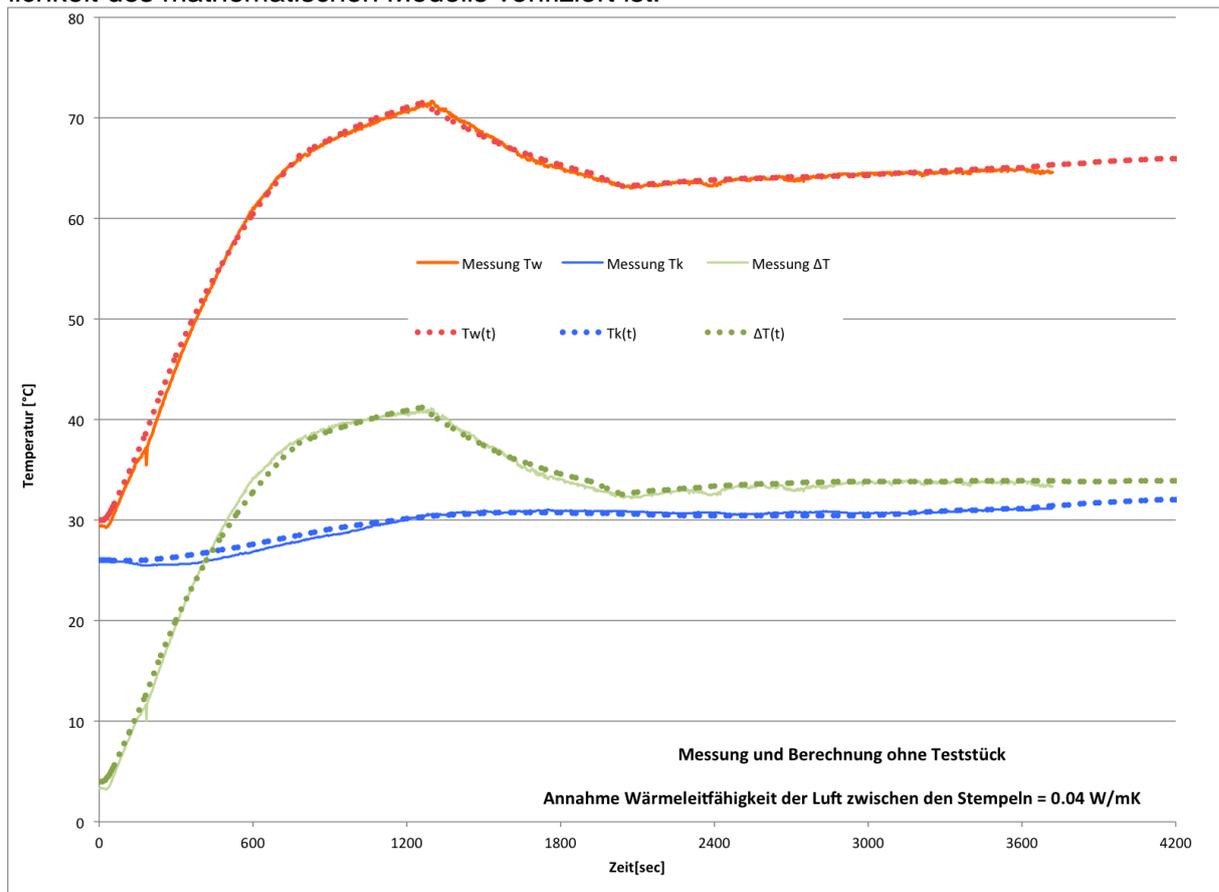


Fig. 11 Messung und Berechnung ohne Teststück zwischen den Stempeln

Zur Verifikation, dass das mathematische Modell mit von Datenblättern her bekannten Wärmeleitfähigkeiten die "richtigen" Kurven berechnet, wurden Messungen mit Testwerkstücken aus PMMA ( $\lambda=0.2$  W/mK), HDPE ( $\lambda=0.4$  W/mK) und Stahl ( $\lambda=15$  W/mK) durchgeführt. Alle gemessenen Kurven konnten fast exakt nachgebildet werden. Figur 12 zeigt das Beispiel des PMMA-Teststückes, Figur 13 dasjenige von HDPE und Figur 14 dasjenige von Innoxstahl.

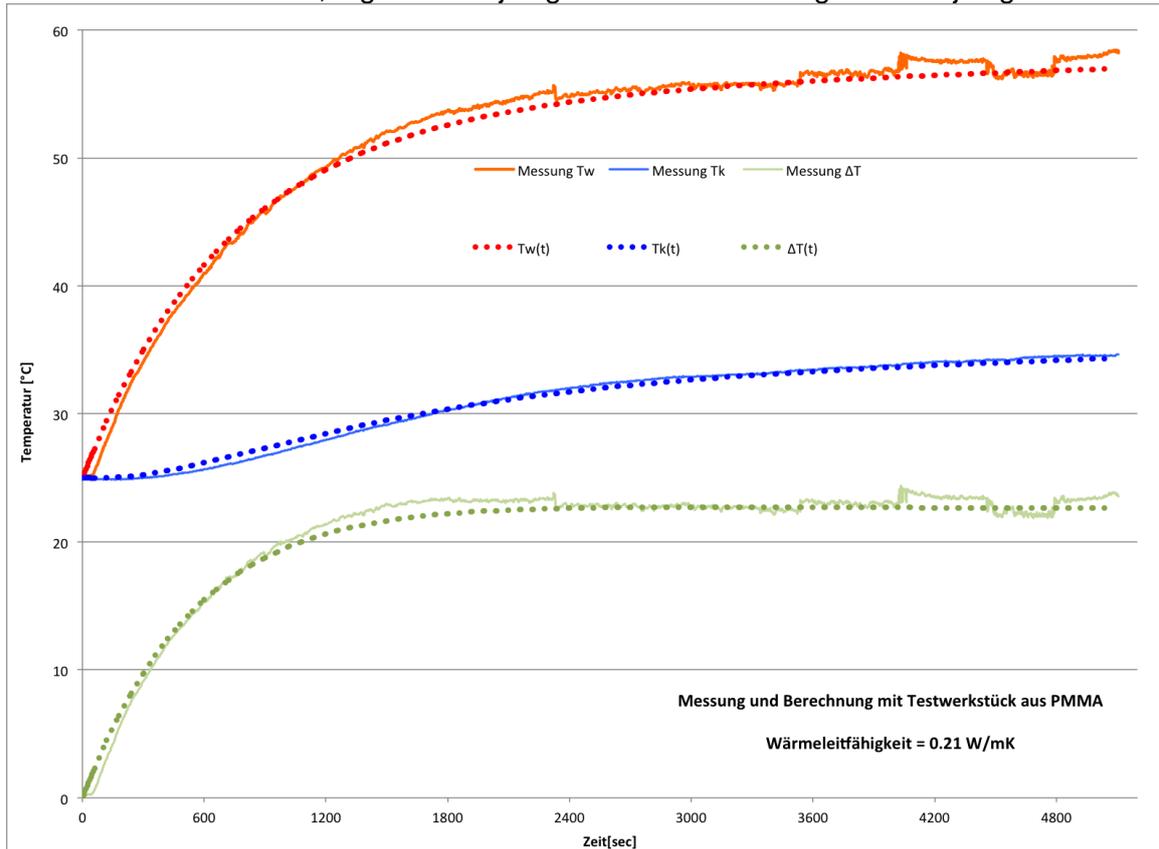


Fig. 12 Messung und Berechnung mit PMMA-Teststück

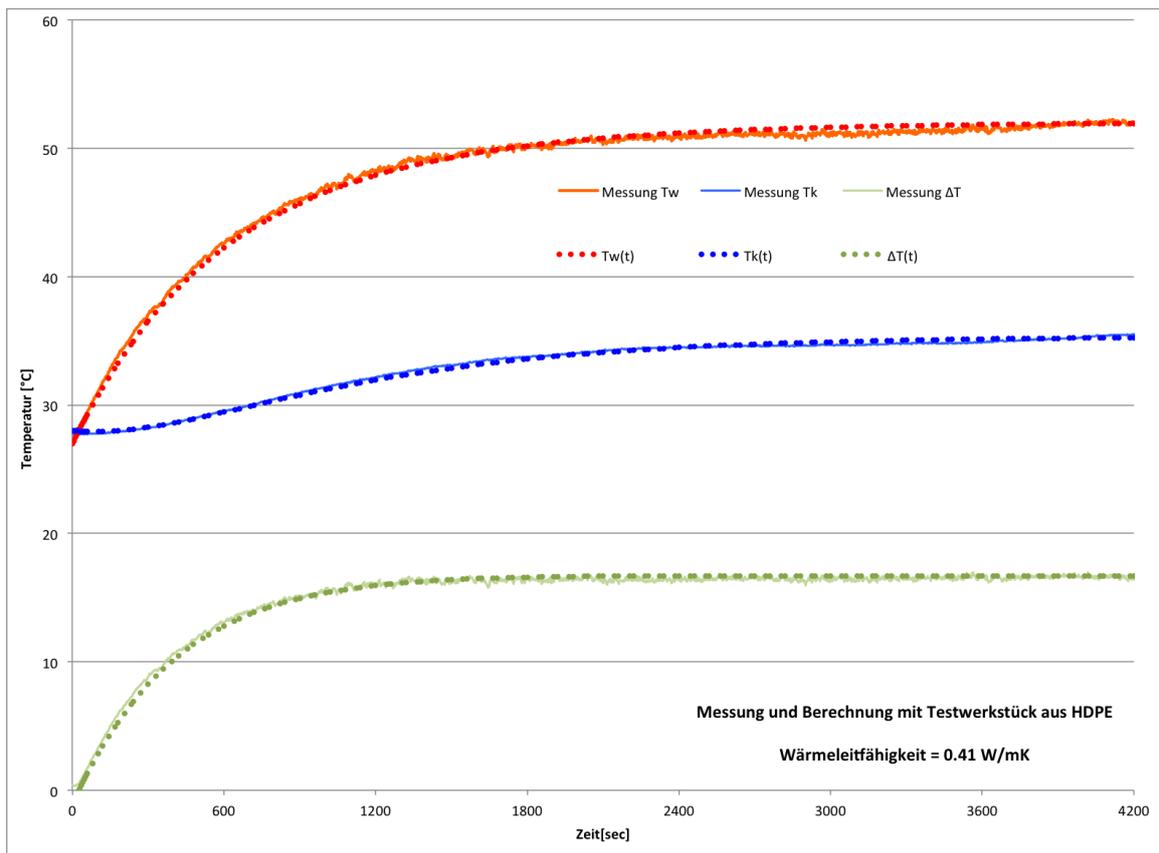


Fig.13 Messung und Berechnung mit HDPE-Teststück

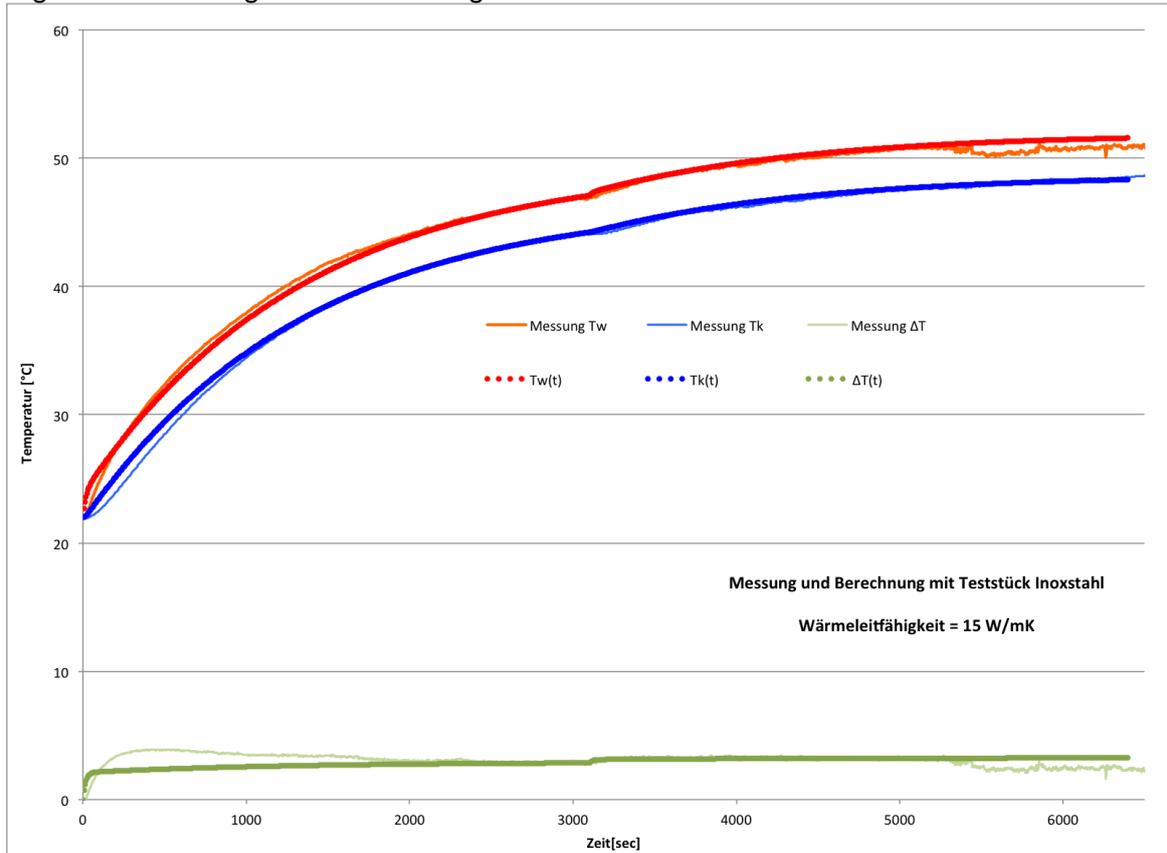


Fig. 14 Messung und Berechnung mit Stahl-Teststück

Die Auswertung einer ersten Mess-Serie mit Ball- bzw. Parallel-Filament-Distanzhaltern zeigt, dass mit dem geschilderten, einfachen Modell alle gemessenen Kurven mit guter Genauigkeit nachgebildet werden können. (siehe Fig. 15 und 16)

Die mit den Parallel-Filament-Distanzhaltern gemessenen Kurven, lassen sich bei dieser Mess-Serie nur dann mit befriedigender Genauigkeit nachbilden, wenn genau zum Zeitpunkt  $t_1$  der ersten Druckrafterhöhung die für den Testisolator angenommene Wärmeleitfähigkeit um ca. einen Faktor 2 erhöht wird. (Kurven  $T_w'$ ,  $T_k'$ ,  $\Delta T'$  in Fig. 16)

Dies bedeutet, dass die Ankoppelung der Teststücke an die beiden Stempel oder die Kopplung der einzelnen Filamente untereinander vor dem Zeitpunkt  $t_1$  ungenügend war, oder mit anderen Worten, dass die Druckkraft zwischen den Stempeln bis zu diesem Zeitpunkt mit nahezu 0 N viel zu klein war, um eine genügende Ankoppelung zwischen den Stempeln und dem Teststück zu erzeugen. Dies wurde in der zweiten Mess-Serie berücksichtigt.

Bei einer zweiten Mess-Serie wurde von Anfang an bis zum Erreichen des Beharrungszustands der Temperaturen mit einem genügend hohen Anfangsdruck gemessen und dann die Druckkraft auf die Teststücke bis zur maximal erlaubten des Druckkraftsensors hoch geschraubt.

In den Figuren 17 und 18 zeigt sich, dass die gemessenen Kurven ohne Annahme einer Veränderung der Wärmeleitfähigkeit fast exakt nachgebildet werden können, bzw. dass mit einer angenommenen Veränderung der Wärmeleitfähigkeit um nur einen Faktor 2 die berechneten Kurven ( $T_w'$ ,  $T_k'$ ,  $\Delta T'$ ) deutlich von den gemessenen abweichen.

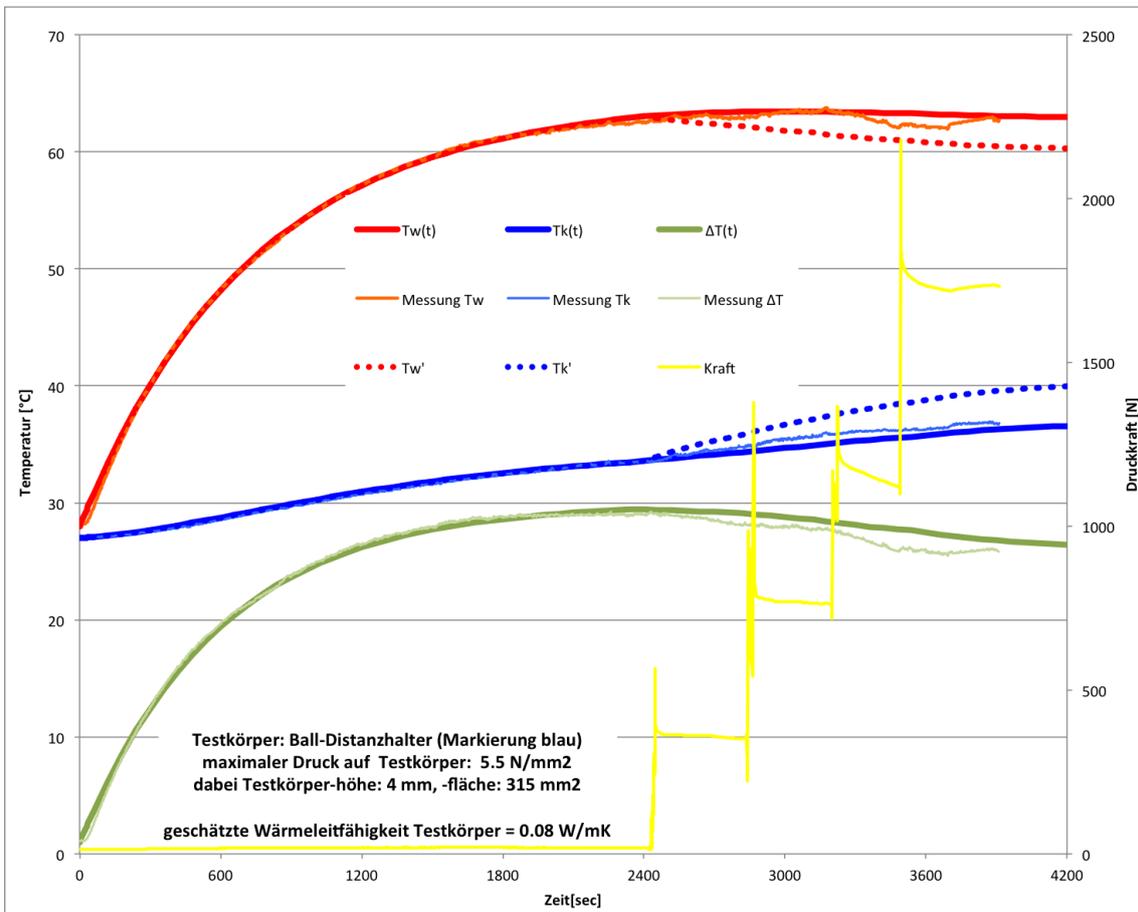


Fig. 15 Messung und Berechnung Serie 1, Ball-Distanzhalter

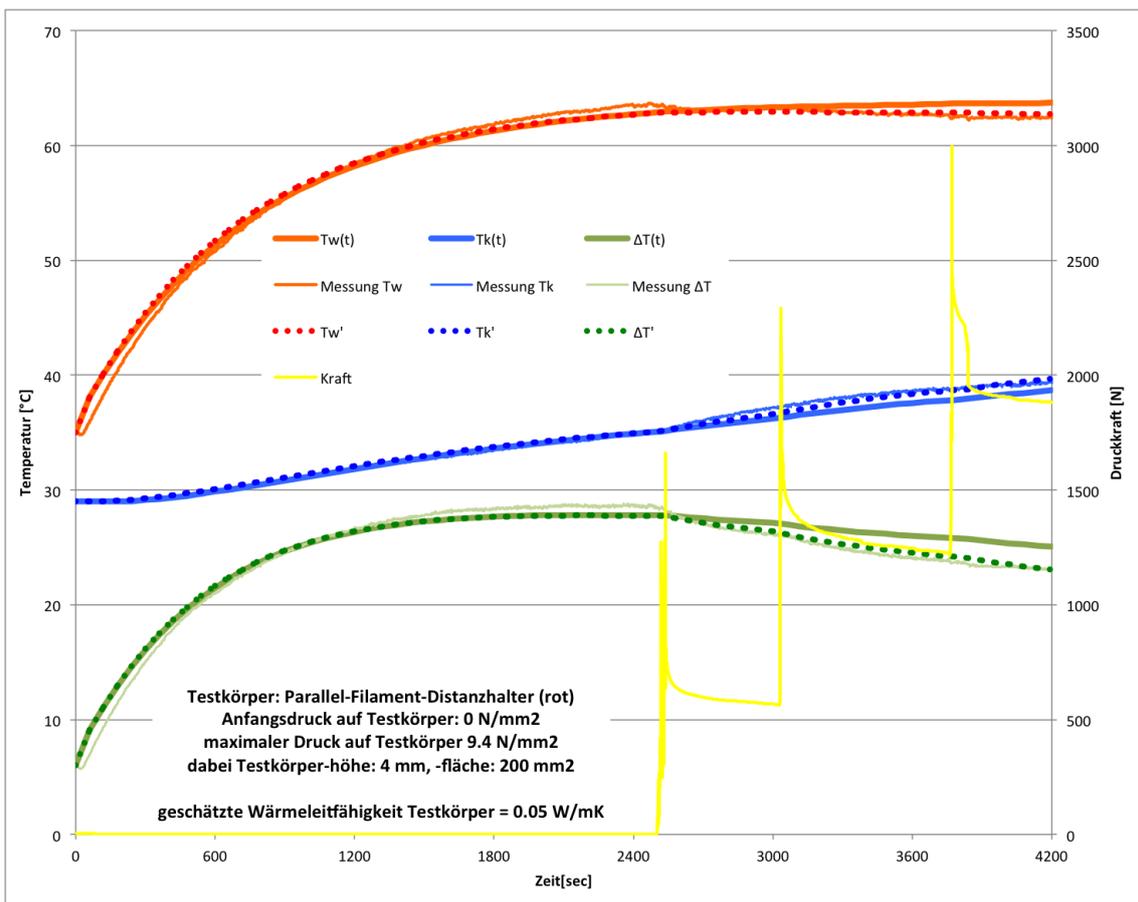


Fig. 16 Messung und Berechnung Serie 1, Parallel-Filament-Distanzhalter

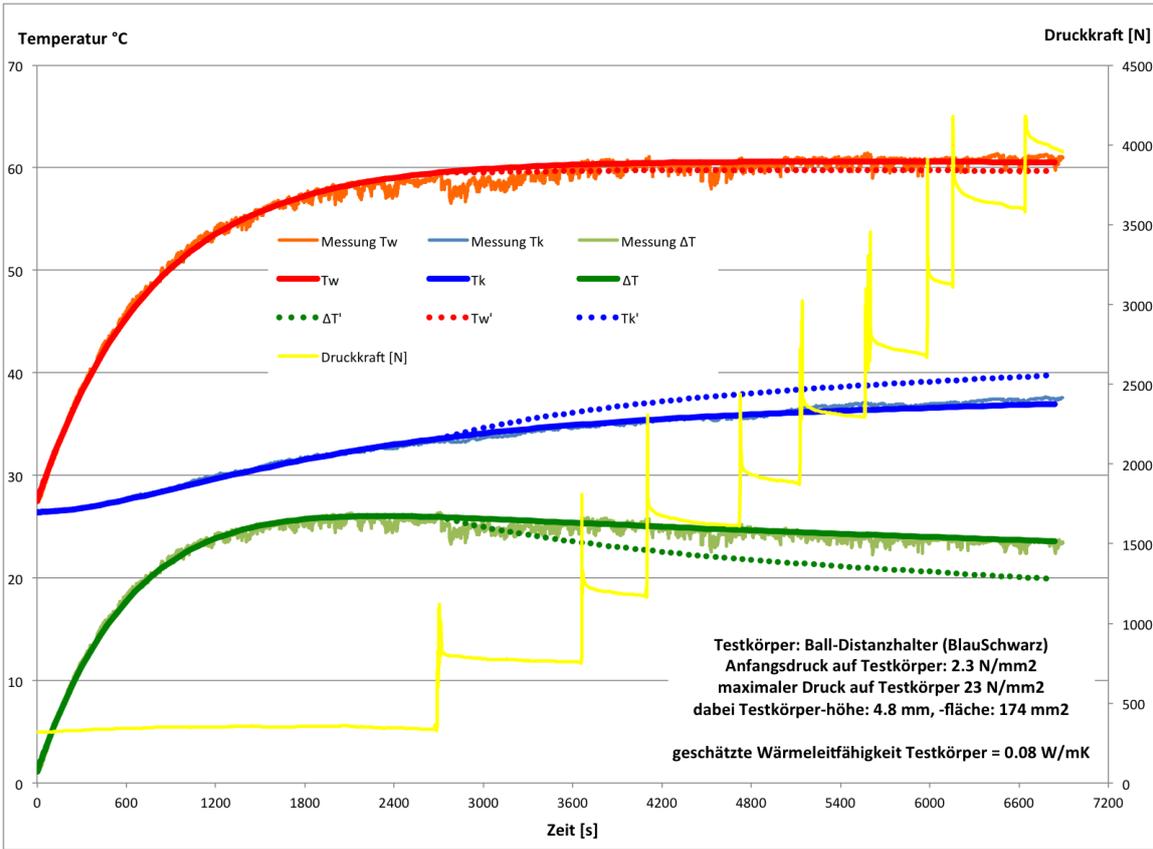


Fig. 17 Messung und Berechnung Serie 2, Ball-Distanzhalter

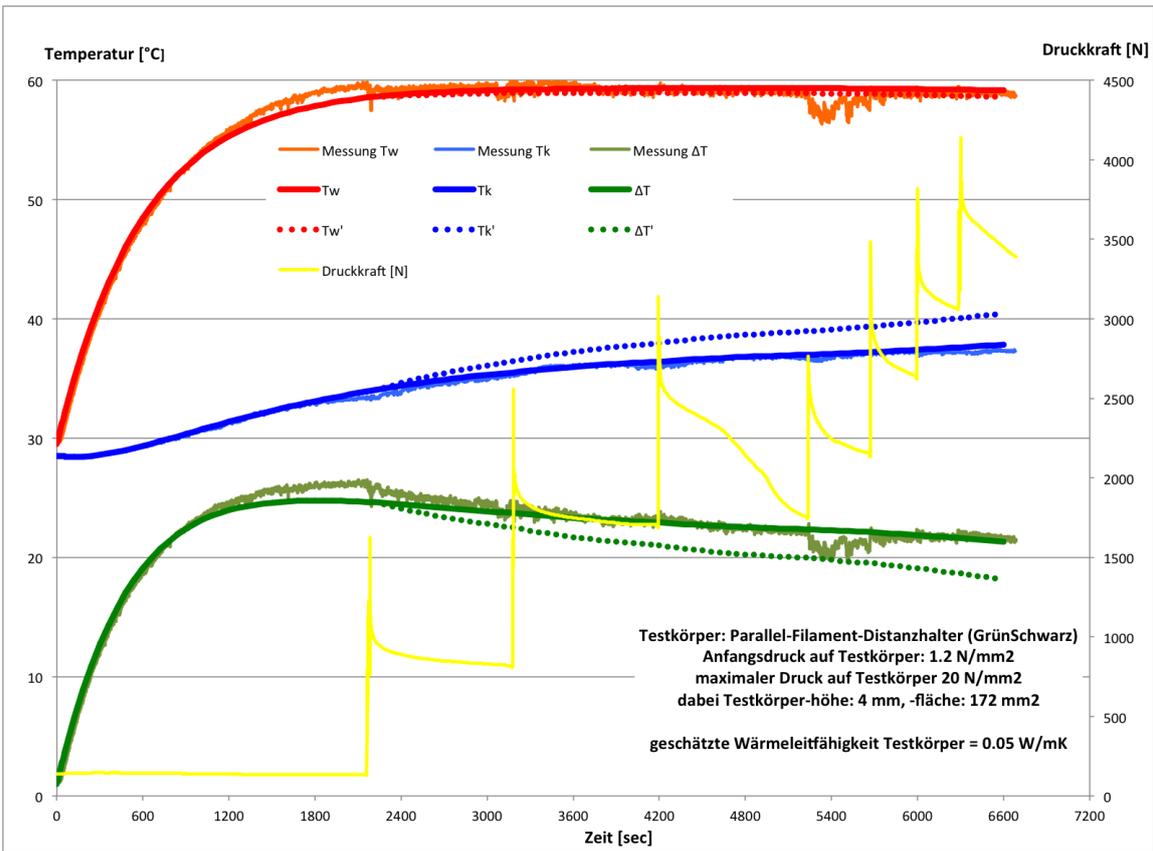


Fig. 18 Messung und Berechnung Serie 2, Parallel-Filament-Distanzhalter

Die Werte der Wärmeleitfähigkeit, welche zur Berechnung der Kurven eingesetzt wurden, entsprechen mit 0.08 W/mK im Falle des Ball-Distanzhalters und mit 0.05 W/mK beim Parallel-Filament-Distanzhalter den aus den Dimensionen der Teststücke berechenbaren Werten und damit den Erwartungen.

Da zudem in beiden Fällen der maximale Druck auf den Testkörper ca. 20 N/mm<sup>2</sup> betrug und da mit einem solchen Druck pro Distanzhalter sehr gute Vakuumpalt-Panels gebaut werden können, kann davon ausgegangen werden, dass nach Optimierung der Herstellung beider Distanzhalter-Bauarten die erhofften, hohen Erwartungen bezüglich niedrigem Wärmefluss im Vakuum und bezüglich Druckfestigkeit erfüllt werden.

#### 4.1.2 Kriechverhalten bei Einsatztemperatur

Auf eine - sehr zeitaufwändige - Abschätzung des Kriechens der Hülle der inneren Distanzhalter wurde aus folgendem Grund verzichtet.

Kriechen ist nur bezüglich den auf Zug belasteten Hüllen der beiden Distanzhalterttypen relevant.

Ein Kriechen der Hülle bewirkt einerseits eine Zunahme des Durchmessers und eine damit verbundene Abnahme der Höhe des Distanzhalters. Hiermit ist eine entsprechende Vergrößerung des Wärmeflusses durch das Kernmaterial verbunden.

Andererseits bewirkt Kriechen der Hülle eine Verlängerung des Wärmeleitpfades durch dieselbe und damit eine entsprechende Verringerung des Wärmeflusses durch die Hülle.

Tabelle 3 für den Ball-Distanzhalter und Tabelle 4 für den Parallel-Filament-Distanzhalter zeigen deutlich, dass der Wärmefluss durch die Hülle denjenigen durch das Kernmaterial deutlich übertrifft. Die beiden gegenläufigen Veränderungen des Wärmeflusses heben sich deshalb annähernd gegenseitig auf.

Eine entsprechende analytische Abschätzung ergibt, dass sich bei einer Dehnung durch Kriechen um einen bestimmten Prozentsatz, der Wärmefluss um ca. einen Zehntel dieses Prozentsatzes erhöht.

Nimmt man also eine extrem hohe Dehnung von 10% an, ist dadurch eine Erhöhung des Wärmeflusses durch die inneren Distanzhalter um lediglich 1% zu erwarten.

Da die Rand-Distanzhalter wegen ihrer grösseren relativen Fläche mit wesentlich geringeren Druckkräften belastet sind, ist bei ihnen Kriechen in erster Näherung vernachlässigbar.

Zusätzlich verändert sich durch ein Kriechen der Hülle der inneren Distanzhalter, weder der Wärmefluss über das Restgas des Vakuums, noch derjenige der durch Strahlung erzeugt wird.

Da der Wärmefluss durch die inneren Distanzhalter aber deutlich unter 10% des gesamten Wärmeflusses durch ein Vakuumpalt-Panel ausmacht (siehe Tabelle 8) und damit die Erhöhung des gesamten Wärmeflusses weniger als 0.1% beträgt, ist der Einfluss des Kriechens der Hülle der inneren Distanzhalter mit grösster Wahrscheinlichkeit vernachlässigbar.

#### 4.1.3 Ausgasverhalten unter Vakuum

Damit ein Vakuumpalt mit einem maximalen Wandabstand von ca. 20 mm eine genügende thermisch isolierende Wirkung hat, darf der Druck der Restgase im Vakuum einen Wert von höchstens 10<sup>-3</sup> mbar, besser aber 10<sup>-4</sup> mbar während der ganzen gewünschten Lebensdauer der Isolation nicht überschreiten.

Dies bedeutet, dass dem Ausgasen sämtlicher das Vakuum "berührenden" Materialien höchste Aufmerksamkeit gewidmet werden muss.

In diesem Sinne gilt es - im Rahmen der durchgeführten relativ kleinen Arbeit - bezüglich den betrachteten Distanzhaltern erste Abschätzungen zu erhalten, ob diese für den Einsatz im Vakuumpalt geeignet sein können.  
 Zu diesem Zwecke wurde der in Figur 19 dargestellte Aufbau realisiert.

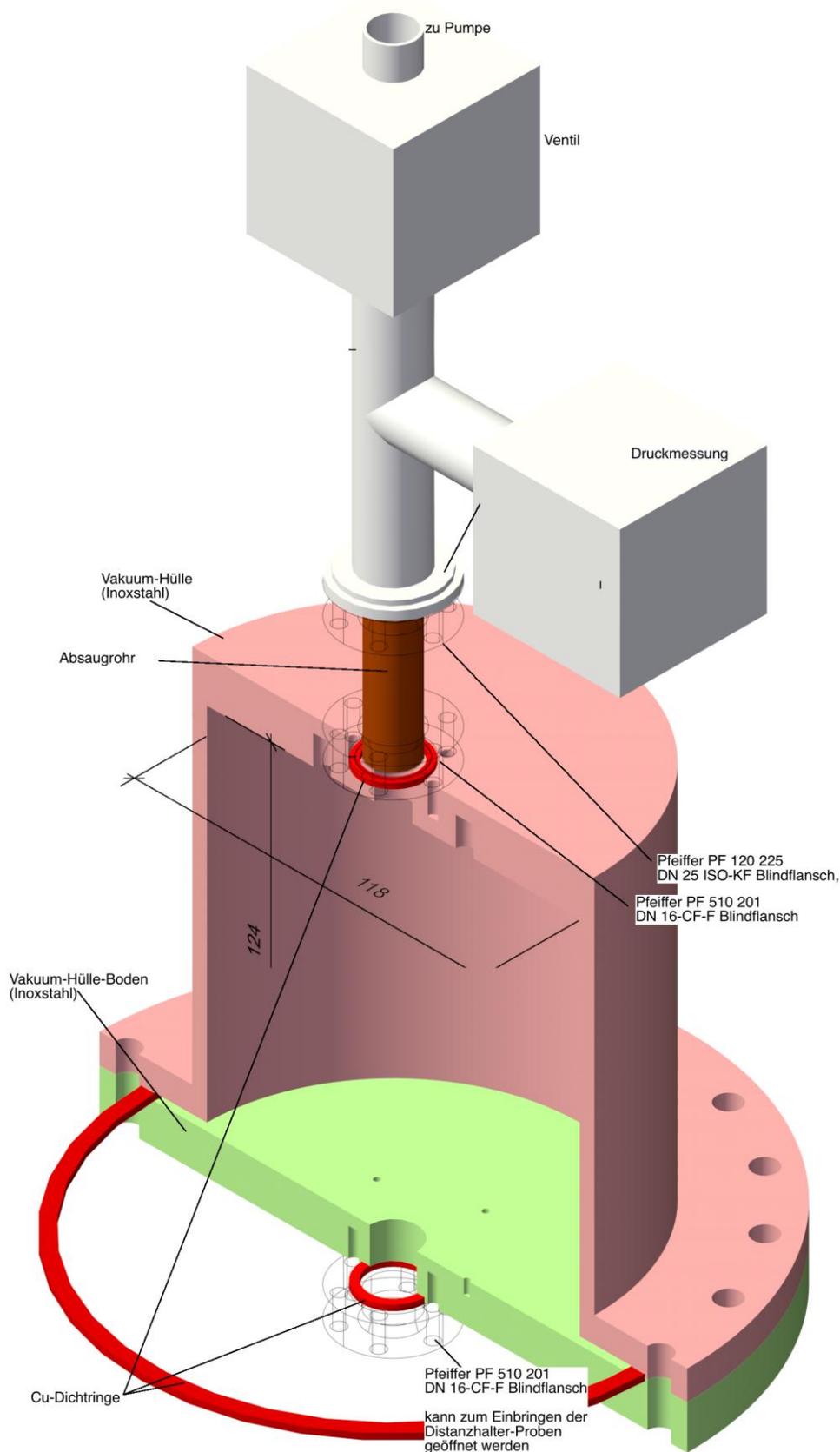


Fig. 19 Versuchsaufbau zur Abschätzung des Ausgasens von Distanzhalterproben

Der Aufbau nach Figur 19 besteht im Wesentlichen aus einem Rezipienten aus austenitischem Innoxstahl mit einem inneren Volumen von ca. 1.5 Litern. Dieses Volumen wurde gewählt, weil es dem inneren Volumen eines Vakuumpalt-Panels von 1 m<sup>2</sup> Grösse und 15 mm Spalthöhe entspricht.

Auf der unteren Seite besitzt der Rezipient eine mit einem Blindflansch verschliessbare Öffnung, durch welche die Proben eingebracht werden können. Die Dichtung ist als metallische Dichtung mittels CF-Flansch realisiert, wobei der dichtende, ausgegaste Kupfer-Dichtring nach jedem Öffnen ersetzt wird.

Im oberen Bereich führt eine Metall-Leitung über ein Vakuum-Ventil zum verwendeten Pumpstand, der eine Vorpumpe und eine Turbopumpe besitzt. Die damit erreichbaren Unterdrücke liegen bei ca. 10<sup>-7</sup> mbar.

Zwischen Rezipient und Ventil ist mittels eines T-Flansches ein Druckmess-Element angebracht.

Sämtliche Dichtungen zwischen den einzelnen Bauteilen sind als metallische Dichtungen mittels CF-Flanschen ausgeführt.

Die Beheizung des Rezipient erfolgt von aussen mit (nicht dargestellten) Heizlüftern, deren Heissluftstrom in eine um den Rezipienten gestellte Kammer aus Schamott-Steinen eingeleitet wird.

Die Temperaturmessung erfolgt von Hand mittels Infrarotmessung der Wandtemperatur des Rezipienten.

Die jeweiligen Messzyklen erfolgen so, dass zunächst bei hoher Temperatur (ca. 470°C) so lange abgepumpt wird, bis sich ein stabiler Restdruck einstellt. Bei der Hälfte der Versuche wird danach bei dauerndem weiterem Abpumpen der Rezipient auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei der anderen Hälfte der Versuche wird die Temperatur während der gesamten Versuchsdauer auf ca. 470°C gehalten.

Nach diesem Schritt wird das Ventil geschlossen, wobei die Pumpe weiter läuft und für den Rest des Versuchs ausserhalb des Ventils einen Unterdruck von ca. 10<sup>-6</sup> mbar aufrechterhält. Dies ist sinnvoll um Einflüsse der Ventil-Leckage auszuschliessen.

Durchgeführt wurden derartige Messungen mit leerem Rezipienten als Referenz, mit einer Probe gemäss dem Ball-Prinzip und mit einer Probe gemäss dem Parallel-Filament-Prinzip. Die beiden hergestellten Proben sind aus Figur 20 ersichtlich.

Auf eine Durchführung von Versuchen mit mehr als jeweils einer Probe wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, weil kein unmittelbar einsichtiger Grund vorliegt, dass damit grundsätzlich andere Resultate zu erzielen wären.



Fig. 20 Probe nach Ball-Prinzip



Probe nach Parallel-Filament-Prinzip

Die beiden Proben sind jeweils als langgestreckte Gebilde im Sinne von Rand-Distanzhaltern ausgeführt. Ihre Abmessungen wurden so gewählt, dass die Materialmengen ca. den Men-

gen entsprechen, welche für die Summe der inneren Distanzhalter eines 1 m<sup>2</sup> grosses Vakuumspalt-Panel notwendig wären.

Demensprechend besteht die Probe nach dem Ball-Prinzip aus einem knapp 400 mm langen Glasgeflechschlauch mit ca. Ø 6 mm, der mit fumed silica Pulver gefüllt ist.

Die etwas über 300 mm lange Probe nach dem Parallel-Filament-Prinzip besteht aus e-Glas Rovings mit einem Gesamtquerschnitt von ca. 5 x 7 mm und ist mit e-Glas Filamenten umwunden.

Die Materialien beider Proben wurden unmittelbar vor ihrem Einsatz ca. 2 Stunden lang bei ca. 500°C bzw. 630°C ausgeheizt. Damit wurde einerseits sichergestellt, dass allfällige, bei der textilen Herstellung der Einzelteile verwendete organische Hilfsstoffe entfernt waren und andererseits der in den Proben gebundene Wasserdampf weitgehend entfernt war.

Die Parameter der durchgeführten Versuchsreihe sind aus Tabelle 11 ersichtlich. Die Farbgebung und Linienart in Tabelle 11 entsprechen den entsprechenden Druckanstiegskurven bei geschlossenem Ventil in Figur 21.

Probe	Heiz-Temp.	Pump-Dauer	Heiz-Dauer	Ventil offen	Ventil zu	Bemerkungen/Parameter
				Druck- Beharrung nach Abpumpen	Druck- Beharrung nach Druckanstieg	
Ball	466°C.	9h	9h	5.4E-5 mbar	7.6E-1 mbar	Probe vorher 2 h ausgeheizt bei (500°C)
	21°C.	24h	xx	6.3E-7 mbar	2.2E-5 mbar	Messung bei Umgebungstemp. Do morgen 0800 Uhr
	<b>471°C.</b>	<b>xx</b>	<b>9h</b>	<b>2.2E-5 mbar</b>	<b>6.4E-2 mbar</b>	
	21°C.	24h	xx	5.4E-7 mbar	1.9E-5 mbar	Messung bei Umgebungstemp. Fr morgen 0900 Uhr
	476°C.	0	7h	1E-5 mbar	7.4E-2 mbar	
	<b>22°C.</b>	<b>48h</b>	<b>xx</b>	<b>4E-7 mbar</b>	<b>1.8E-5 mbar</b>	Messung bei Umgebungstemp. Mo morgen 0930 Uhr
Parallel-Filament	469°C.	24h	9h	8.6E-6 mbar	xx	Probe vorher 2h erhitzt (630°C.) zur Entfernung von organischen Rückständen
	453°C.	24h	9h	4E-6 mbar	1E-1 mbar	
	472°C.	24h	6h	5.4E-7 mbar	8.6E-2 mbar	
	23°C.	24h	xx	4.6E-7 mbar	7.4E-2 mbar	Messung bei Umgebungstemp. Sa vormittag 1045 Uhr
	xx	24h	xx	xx	xx	Keine Messung (Sonntag)
	481°C.	24h	5h	7.6E-7 mbar	8.6E-3 mbar	
	21°C	0	xx	4E-7 mbar	3.0E-4 mbar	Messung bei Umgebungstemp. Di morgen 0900 Uhr
	<b>466°C</b>	<b>0</b>	<b>2h</b>	<b>3E-6 mbar</b>	<b>2.4E-3 mbar</b>	Messung aufgeheizter Zustand, Di 1200 Uhr
23°C.	24h	xx	7.4E-7 mbar	4.6E-5 mbar	Messung bei Umgebungstemp. Di abend 1720 Uhr	
	<b>22°C.</b>	<b>16h</b>	<b>xx</b>	<b>4.6E-7 mbar</b>	<b>3.0E-5 mbar</b>	Messung bei Umgebungstemp. Di morgen 0830 Uhr
Rezipient leer	<b>468°C.</b>	<b>3h</b>	<b>3h</b>	<b>3.4E-6 mbar</b>	<b>1.9E-1 mbar</b>	
	<b>25°C.</b>	<b>6h</b>	<b>xx</b>	<b>7.4E-7 mbar</b>	<b>3.4E-5 mbar</b>	

Tab. 11 Parameter der Ausgas-Versuchsreihen

In Figur 21 sind die bei geschlossenem Ventil gemessenen Druckanstiegskurven dargestellt. Die Messungen wurden jeweils abgebrochen, nachdem sich über ca. eine Stunde lang keine mit unseren Mitteln messbare Druckänderung mehr eingestellt hat.

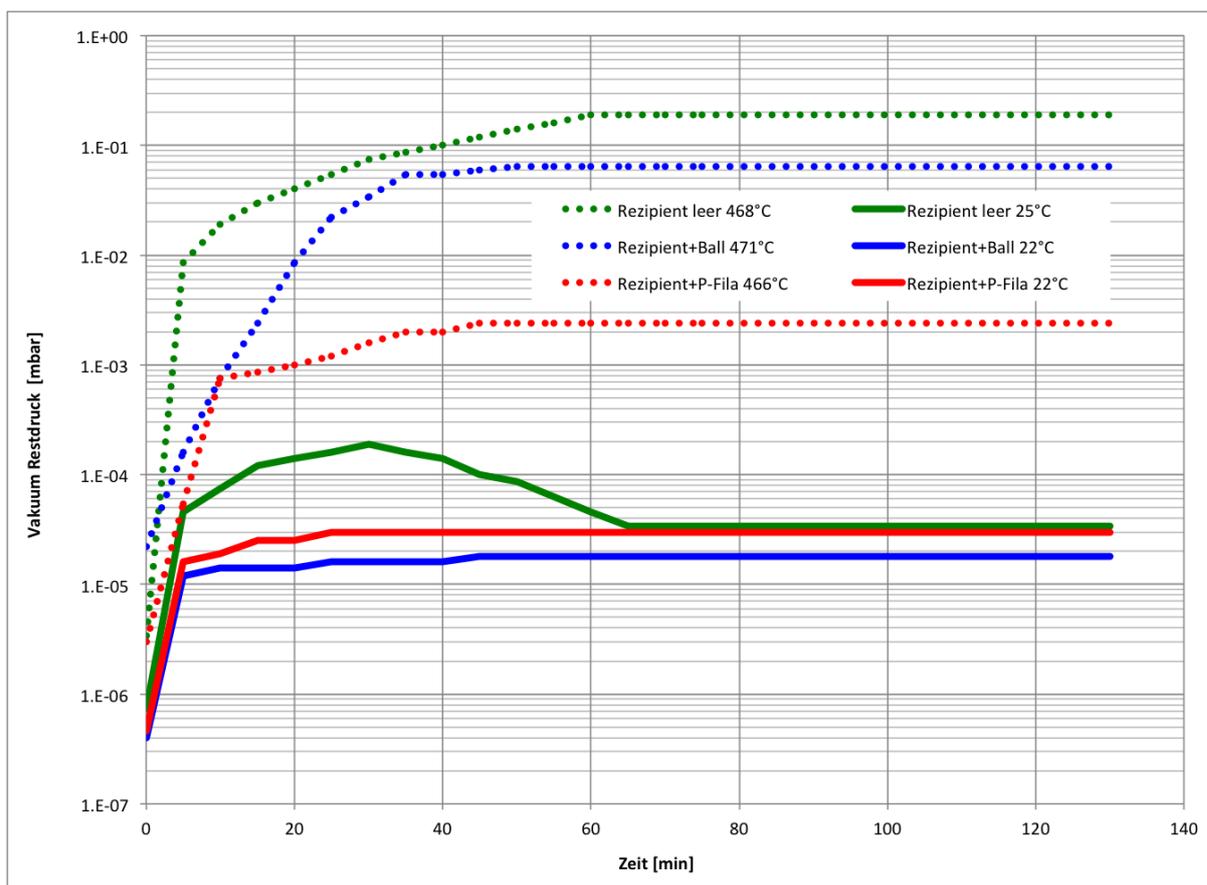


Fig. 21 Druckanstiegskurven bei geschlossenem Ventil

Als erste und wichtigste Erkenntnis ist zunächst festzuhalten, dass beide Proben (während der Beobachtungszeit) nicht nennenswert ausgasen.

Sowohl die entsprechenden Kurven bei hoher Temperatur als auch diejenigen bei Raumtemperatur erreichen einen Beharrungsdruck der entweder unterhalb oder höchstens auf der Höhe des mit leerem Rezipienten gemessenen Referenzdruckes liegt. Damit ist der beobachtete Druckanstieg alleine auf das (erwartete) Ausgasen der Metallteile des Rezipienten zurück zu führen.

Zweitens zeigt sich, dass die Distanzhalter Proben nicht nur nicht ausgasen, sondern eher im Sinne eines Getters wirken, d.h. dass sie von den Metallteilen des Rezipienten freigesetzte Gase (bekanntlich in erster Linie  $H_2$ ) binden.

Dies ist bei tiefen Temperaturen vor allem bei der Probe nach dem Ball-Prinzip, mit grösster Wahrscheinlichkeit dank der Füllung mit fumed silica Pulver der Fall.

Bei hohen Temperaturen zeigt sich erfreulicherweise eine unerwartet hohe Getterwirkung der e-Glas Filamente innerhalb der Probe nach dem Parallel-Filament-Prinzip. Dieses vermutliche Gettern der Filamente können wir zum jetzigen Zeitpunkt nicht erklären. In einer Folgearbeit muss dieses Verhalten verifiziert werden.

Drittens wird deutlich, dass die sich einstellenden Restdrücke bei tiefen Temperaturen mit höchstens ca.  $3 \cdot 10^{-5}$  mbar deutlich im grünen Bereich liegen. Da der beobachtete Druckanstieg offensichtlich von den Metallteilen des Rezipienten stammt, kann davon ausgegangen werden, dass sich dieser Druck am Beginn der Lebensdauer eines entsprechenden Vakuumpalt-Panels durch die bekannten Massnahmen zur Vorbehandlung von Stählen für das

Vakuum noch deutlich senken lässt. Auf die entsprechenden Massnahmen wird in einem Ende 2011 zu erstellenden Jahresbericht zum parallel durchgeführten Projekt "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten - zylindrischer Kühlschrank" näher eingegangen.

Bei Temperaturen nahe 500°C liegen die Beharrungsdrücke des leeren und mit der Probe nach dem Ball-Prinzip bestückten Rezipienten mit ca.  $1 \cdot 10^{-1}$  mbar weit über der maximal zulässigen Grenze von  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar. Die Probe nach dem Parallel-Filament-Prinzip senkt diesen Druck auf ca.  $2.4 \cdot 10^{-3}$  mbar. Dies könnte bedeuten, dass zumindest für die "Hochtemperatur"-Anwendung von Vakuumpalt-Isolation, wie beispielsweise für Backöfen, diese Bauweise gut geeignet ist. Eine durchzuführende Folgearbeit muss dies bestätigen.

Natürlich muss gesagt werden, dass die Dauer der Beobachtungszeit nach Erreichen des Beharrungszustandes mit ca. einer Stunde nicht eben lang ist.

Es ist selbstverständlich, dass innerhalb von Monaten und Jahren ein langsamer Druckanstieg erfolgen wird, der ausgehend von dem erreichten Anfangs-Restdruck sich langsam dem maximal zulässigen Druck nähern wird. Aufgrund der Resultate von Studien die im Rahmen des parallel durchgeführten Projekts "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten - zylindrischer Kühlschrank" durchgeführt wurden, gehen wir aber davon aus, dass die auf diese Weise resultierende Mindestlebensdauer des Vakuums 10 Jahre und mehr beträgt.

# Diskussion und Schlussfolgerungen

Die durchgeführte Arbeit konzentriert sich im Wesentlichen auf die für ein Vakuumspalt-Panel entscheidenden Bauteile Distanzhalter im Innern des Spalts und Rand-Distanzhalter sowie deren Auswirkung auf die Machbarkeit derartiger Panels.

Es zeigt sich, dass Distanzhalter, die mit einer Wandlung von Druck in Zug arbeiten, den mit reinem Druck arbeitenden deutlich überlegen sind. Hierbei sind die beiden so arbeitenden Distanzhaltertypen nach dem "Ball-Prinzip" und dem "Parallel-Filament-Prinzip" dem ebenfalls mit dieser Wandlung arbeitenden "Spann-Filament-Prinzip" deutlich vorzuziehen.

Mit beiden Vorzugs-Typen lassen sich kostengünstig sowohl innere Distanzhalter als auch Rand-Distanzhalter aufbauen, welche die hohe Anforderung eines Wärmeflusses durch die Summe der Distanzhalter von maximal  $0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$  bzw.  $0.02 \text{ W}/(\text{Laufmeter K})$  erfüllen.

Ein Vakuumspalt-Panel, das eines (oder beide) dieser Prinzipien einsetzt, scheint kostengünstig realisierbar zu sein.

Die durchgeführten Untersuchungen an den beiden Distanzhaltertypen ergeben, dass sich ihr thermisches Verhalten auch unter dem durch die "Integration" des Luftdruckes erzeugten hohen Druck pro Distanzhalter von bis zu  $20 \text{ N/mm}^2$ , nicht verändert.

Weiter wird deutlich, dass die beiden Distanzhaltertypen bezüglich des Ausgasens nicht nur unproblematisch sind, sondern dass sie darüber hinaus mit hoher Wahrscheinlichkeit eine sehr erwünschte Getterwirkung ausüben.

## Ausblick

In Summe lässt sich festhalten, dass mit den im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Distanzhaltern, Bauelemente zur Verfügung stehen, die ein Weiterverfolgen des Ansatzes "Ebenes Vakuumspalt-Panel" und die daraus ableitbaren Anwendungen für Haushaltsgeräte wie Kühlschränke, Warmwasserbehälter, Waschmaschinen bis hin zu Backöfen sehr viel versprechend macht.

Gerade auf dem Gebiet der Haushaltsgeräte wird die thermische Isolation mittels Vakuum sehr rasch wichtiger, weil eine weitere Reduktion der Energieverluste mittels herkömmlicher Isolation aus Platzgründen nicht mehr sinnvoll ist. Bei Kühlschränken sind mittels Vakuum weitere Effizienzgewinne mit zusätzlichem Raumgewinn kombinierbar. Beispielsweise hat die Firma "Samsung" an der IFA 2011 in Berlin einen vollständig mit VIP isolierten A+++ Kühlschrank vorgeführt und wirbt bei gleichen Aussenabmessungen wie bisher mit einem Nutzraumgewinn von 50 Litern.

Mit dem Einsatz von Vakuumspalt-Isolation können derartige Gewinne noch deutlich gesteigert werden.

In einem Folgeprojekt, dessen Durchführung und allfällige finanzielle Unterstützung mit dem BfE zu diskutieren ist, sollen deshalb folgende Punkte bearbeitet werden:

- Auffinden eines industriellen Partners zur Herstellung der Distanzhaltertypen nach dem Ball-Prinzip und dem Parallel-Filament-Prinzip
- In Zusammenarbeit mit diesem Partner, Wahl der besten Materialien und Machart
- Herstellen entsprechender Distanzhalter Prototypen
- Nähere Abklärung der vermuteten Getterwirkung dieser Distanzhaltertypen
- Konzeption und Konstruktion eines Vakuumspalt-Panels mit diesen Distanzhaltern
- Bau von Panel-Funktionsmustern und Ausmessen derselben
- Konzeption eines entsprechenden Kühlschranks
- Erarbeiten denkbarer Serien-Fertigungsprozesse und Bewertung derselben
- Abschätzen der resultierenden Herstellkosten