



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht**, 31. Mai 2010

---

# **Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte**

---

**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)  
Gerhard Staufert, freier Mitarbeiter Helbling Technik AG, [gs@galileo-ag.ch](mailto:gs@galileo-ag.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Michael Moser

**BFE-Programmleiter:** Roland Brüniger

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 154336 / 103290

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



# Zusammenfassung

An den beiden Beispielen „Kaffeemaschine“ und „Kühlschrank“ wurden Ansätze für eine hocheffiziente thermische Isolation von Haushaltsgeräten untersucht. Die Machbarkeitsstudie hat sich auf Strukturen mit Vakuum-Spalt ohne Kernmaterialien konzentriert.

Bei Kaffeemaschinen kann auf kostengünstige Art eine Isolation mittels eines Stahlbauteils mit Vakuum-Spalt ausgeführt werden. Das Funktionsmuster einer derart isolierten Kaffeemaschine zeigt ein wesentlich langsames Abkühlen. Während dem ein nicht isoliertes Vergleichsgerät nach ca. 1.5 h wieder Raumtemperatur erreicht, ist das Funktionsmuster dann immer noch bei 70°C und nach 2 h noch bei 65°C. Berechnungen mit mathematischen Modellen zeigen, dass das Abkühlverhalten noch deutlich verbessert werden kann (nach 2 h ca. 75°C). Zusammen mit einer "Null Standby-Energie" Strategie resultieren daraus erheblich reduzierte Wartezeiten bis zur Betriebsbereitschaft und im Mittel eine Einsparung von 25 bis 30 % Energie zur Herstellung einer Tasse mit 120 g Kaffee.

Bezüglich Kühlschränken wurden die beiden Ansätze eines traditionell kubischen und eines zylindrischen Kühlschranks untersucht.

Ein neuer Ansatz für die bei einem kubischen Kühlschrank benötigten Distanzhalter im Vakuum-Spalt wurde erarbeitet, bei welchem die hohen Druckkräfte in Zugkräfte umgewandelt werden. Dies war notwendig, weil bei einem Funktionsmuster die auf Druck belasteten Distanzhalter schon bei geringen zusätzlichen Querkraften 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.

Ein Funktionsmuster im Massstab 1:2 eines zylindrischen Kühlschranks mit Vakuum-Isolation konnte aufgebaut und gemessen werden. Die auf der Basis dieser Messungen erstellten mathematischen Modelle im Massstab 1:1 zeigen, dass zylindrische Kühlschränke mit Ø 600 mm machbar sein sollten, bei denen die spezifische Verlustleistung durch die Isolation auf 35 bis 40 % derjenigen eines mittleren A++ Kühlschranks gesenkt werden kann. Das Nutzvolumen eines vergleichbaren A++ Kühlschranks mit einer Grundfläche von 600x600 mm kann mit einem derartigen zylindrischen Kühlschrank mindestens beibehalten werden.

## Abstract

Using the two examples „coffee machine“ and „refrigerator“ as a starting point, high-efficient thermal isolation of domestic appliances were examined. The feasibility study concentrated on structures with vacuum gap without core materials.

With coffee machines a cost effective solution for isolation can be achieved by means of a structural steel component with vacuum gap. A functional model of this type of isolated coffee machine shows a substantially slower cooling and instead of reaching room temperature after approx. 1.5 hours cooling (as with a standard coffee machine), it remained at approx. 70°C, and after 2 hours at 65°C. Computations with mathematical models show that the cooling behaviour can be improved even more (after 2 hours approx. 75°C). Using a "zero standby energy" strategy, this improvement results in a substantially reduced time period in achieving "ready status", including an average energy saving from 25 to 30% for the production of a cup of 120g coffee.

Concerning refrigerators two basic solutions, a traditionally cubic and a cylindrical refrigerator were examined.

A new solution was compiled for the space holders which are needed in the vacuum gap of a cubic refrigerator, whereby the high compression forces are converted into tensile forces. This was necessary, because with a functional model, small additional transverse forces

already broke the space holders under pressure load. Computations by means of analytical FEM models demonstrated that with suitable tension members, refrigerators can be developed, with which the specific energy dissipation can be reduced down to 40 to 50% of an average A++ refrigerator, and in addition, with identical external dimensions around approx. 40% larger utilizable volume can be achieved.

A functional 1:2 scale model of a cylindrical refrigerator with vacuum isolation could be developed and measured. On the basis of these measurements using mathematical models on a 1:1 scale, it can be shown that cylindrical refrigerators with diameter 600 mm should be feasible, with which the specific energy dissipation can be reduced down to 35 to 40% of an average A++ refrigerator. The utilizable volume of a comparable A++ refrigerator with a footprint of 600x600 mm can in the least be maintained with this type of a cylindrical refrigerator.

## Résumé

Une nouvelle approche pour une isolation thermique par vacuum hautement efficace a été étudiée pour des appareils ménagers. Elle a été adaptée à une machine à café et un réfrigérateur. L'étude de faisabilité était focalisée sur des structures à vacuum sans matériaux à l'intérieur.

Pour les machines à café, une isolation à l'aide d'une pièce en acier avec fente sous vacuum est réalisable de manière économique. Le prototype d'une telle machine à montré un refroidissement clairement ralenti: après 1.5h, au lieu d'être refroidi à température ambiante, il était toujours à 70°C et à 65°C après 2h. Des calculs basés sur des modèles mathématiques ont montré que ce comportement peut être amélioré davantage (75°C après 2h). Par une stratégie de "zéro stand-by", le temps d'attente pour atteindre le mode opérationnel peut être considérablement réduit et il résulte en moyenne une économie d'énergie de 25 à 30% par tasse de café de 120g.

Pour le réfrigérateur, deux approches, avec une forme cubique traditionnelle ainsi qu'avec une nouvelle forme cylindrique, ont été étudiées.

Pour le réfrigérateur cubique, des pièces d'écartement sont nécessaires dans la fente sous vacuum. Dans un prototype, ces pièces d'écartement chargées en compression se sont effondrées sous l'effet de légères forces latérales. Une nouvelle solution, transformant les forces de compression en forces de traction a ensuite été élaborée. Des calculs analytiques et des modèles à éléments finis ont montré qu'avec des éléments à traction appropriés, la puissance dissipée spécifique peut être réduite à 40 – 50% de celle d'un réfrigérateur typique de classe A++. En gardant les mêmes dimensions extérieures, le volume utile est augmenté d'environ 40%.

Un prototype à l'échelle 1:2 d'un réfrigérateur cylindrique à isolation par vacuum à été construit et mesuré. Basés sur ces mesures, des modèles mathématiques à l'échelle 1:1 ont été établis. Ces modèles ont montré que la puissance dissipée spécifique d'un réfrigérateur cylindrique de diamètre 600 mm pourrait être réduite à 35 – 40% de celle d'un réfrigérateur typique de classe A++. Le volume utile d'un tel réfrigérateur cylindrique n'est pas plus petit que celui d'un réfrigérateur A++ comparable avec une surface de base de 600x600 mm.

## Ausgangslage

Bei zahlreichen Haushaltsgeräten ist die Verminderung von Leistungsverlusten mittels thermischer Isolation ein Problemthema. In Fällen, wie beispielsweise Kühl- oder Gefriergeräten, die ohne thermische Isolation nicht denkbar sind, ist eine weitere substantielle Verringerung von Leistungsverlusten mit konventionellen Isolationen nur durch hohe Verluste an Nutzvolumina möglich und deshalb nicht eigentlich praktikabel. Dies gilt in besonderem Masse für Einbaugeräte, bei denen die Aussenabmessungen „zwingend“

festgelegt sind. In anderen Fällen, wie beispielsweise Kaffeemaschinen, bei denen heute in der Regel nicht isoliert wird, scheitert der effektive Einsatz thermischer Isolation an den, teils auch durch Designvorgaben erzwungenen, beengten Platzverhältnissen. In noch anderen Fällen, wie beispielsweise bei Backöfen, müssen, wenn überhaupt isoliert wird, teure Hochtemperatur-Isolationsmaterialien zum Einsatz kommen.

Der Einsatz von hocheffizienten thermischen Isolationen, welche hohe Isolationswerte mit möglichst wenig zusätzlichem, oder gar verringertem Platzaufwand ermöglichen und darüber hinaus bei fast beliebig hohen Temperaturen eingesetzt werden dürfen, ist deshalb äusserst anstrebenswert.

Die vorliegende Machbarkeitsstudie beschäftigt sich mit diesem Thema an Hand der zwei Beispiele „Kaffeemaschine“ und „Kühlschrank“, wobei davon ausgegangen wird, dass die untersuchten Ansätze auf weitere Haushaltsgeräte übertragbar sind. Aufgrund von Voruntersuchungen hat sich die Studie dabei auf Strukturen mit Vakuum-Spalt ohne Kernmaterialien konzentriert.

Für beide Beispiele ist es notwendig, mittels des - die besten Geräte berücksichtigenden - Standes der Technik eine Vergleichsbasis zur Beurteilung der durch hocheffiziente Isolation erreichbaren Verbesserungen zu schaffen.

### **Hocheffizient isolierte Kaffeemaschine**

Helbling Technik AG ist unter anderem sehr stark im Bereich Entwicklung von Kapsel-Kaffeemaschinen tätig. Es ist deshalb mehr als nahe liegend, dass eine dieser Maschinen aus der jüngsten Generation als Vergleichsbasis herangezogen wird. In der vorliegenden Arbeit ist die Wahl auf eine der neuesten am Markt erhältlichen Dolce Gusto Maschinen gefallen, die bezüglich der hier wesentlichen Punkte wie folgt beschrieben werden kann:

- Wie bei allen Klein-Kaffeemaschinen am Markt, kommt keine thermische Isolation zum Einsatz.
- Die Platzverhältnisse für eine allfällige thermische Isolation sind in dem Sinne begrenzt, dass die Isolationsdicken 5 bis maximal 10 mm nicht überschreiten dürfen.
- Zum Aufheizen der Maschine auf die Betriebstemperatur von ca. 93°C - und während der Kaffeeproduktion - kommt ein Thermoblock mit 1400 Watt Leistung zum Einsatz. Die Aufheizdauer von Raumtemperatur bis Betriebstemperatur beträgt ca. 23 Sekunden.
- Eine gebräuchliche Vorgehensweise ist, nach Bezug von Kaffee die Maschine durch die Elektronik mit 14 Watt Leistung 20 Minuten lang im „bereit“-Modus, d.h. auf Betriebstemperatur zu halten. Bei einer nächsten Maschinengeneration wird diese „bereit“-Zeit nur noch 5 Minuten betragen. Nach dieser Zeit schaltet sich das Gerät ab.
- Die Abkühlung von Betriebstemperatur auf Raumtemperatur dauert ca. 1.5 Stunden. Bereits nach einer Stunde ist die Temperatur auf ca. 35°C abgesunken.

### **Hocheffizient isolierter Kühlschrank**

Eine Vergleichsbasis wurde durch eine Auswertung der Werte von am Markt erhältlicher A++ Kühlschränke geschaffen. Bekanntlich können diese Kühlschränke in vier Gruppen eingeteilt werden, welche sich bezüglich der benötigten spezifischen Kühlleistung [Watt/Liter Nutzinhalt] stark von einander unterscheiden. Die kleinsten Werte finden sich mit im Mittel ca. 0.035 W/L bei freistehenden A++ Kühlschränken ohne Gefrierzonen. Danach folgen mit im Mittel ca. 0.055 W/L Einbaugeräte ohne Gefrierzone. Der Wert für A++ Kühlschränke mit Gefrierzone schwankt sehr stark in Abhängigkeit des Raumverhältnisses Kühl- zu Gefrierzone. Für Einbaugeräte dieser Art liegt der Mittelwert ca. bei 0.1 W/L.

Wir haben uns entschieden A++ Einbaukühlschränke ohne Gefrierzone als Vergleichsbasis zu verwenden. Dies, weil Einbaukühlschränke erstens einen grossen Marktanteil aufweisen, zweitens bei Einbaugeräten die Restriktionen bezüglich Isolationsvolumen am engsten sind und drittens ein Gerät ohne Gefrierzone rechnerisch mit vernünftigem Aufwand und guter Genauigkeit nachgebildet werden kann.

In der folgenden Tabelle 1 sind die Werte einer Auswahl von ca. 30 derartigen Geräten dargestellt.

Hersteller	Typ	Liter Kühlen	Liter total	kWh/a	W/Liter	kWh / (d,100L)	B mm	T mm	H mm	Isolation ca. mm	Preis/Liter min €	Aggregat
Miele	K9552iD-1	259	259	99	0.044	0.105	557	538	1395	43	5.0	K
Liebherr	IKP2860	259	259	99	0.044	0.105	570	550	1413	47	3.5	K
Siemens	KI25RP60	258	258	99	0.044	0.105	560	550	1400	46	4.1	K
Bosch	KIR25P60	258	258	99	0.044	0.105	560	550	1400	46		K
Gaggenau	RC289-202	306	306	120	0.045	0.107	560	550	1775	54	7.5	K
Bosch	KIF42P60	306	306	121	0.045	0.108	560	550	1775	54	4.9	K
Siemens	KI42FP60	306	306	121	0.045	0.108	560	550	1775	54	4.1	K
Neff	K315	306	306	121	0.045	0.108	560	550	1775	54	4.2	K
Bosch	KIR24A60	226	226	94	0.047	0.114	560	540	1225	43	2.1	K
Miele	K5422i	226	226	94	0.047	0.114	560	550	1225	45	4.2	K
Neff	KL435A	226	226	94	0.047	0.114	560	550	1225	45	2.0	K
Siemens	KI24RA60	226	226	94	0.047	0.114	540	540	1220	39	2.1	K
AEG	Santo K91203-i	224	224	95	0.048	0.116	560	550	1225	45	2.0	K
AEG	Santo K91203-5i	224	224	95	0.048	0.116	560	550	1220	45	2.0	K
Miele	K9452i-1	224	224	96	0.049	0.117	540	550	1218	41	4.7	K
Bauknecht	KRIF2205/A++	215	215	94	0.050	0.120	560	550	1220	48	2.7	K
Bosch	KIF27P60	233	233	113	<b>0.055</b>	0.133	556	545	1397	52		K
Miele	K5322i	184	184	90	0.056	0.134	560	550	1025	45	4.9	K
Neff	KL335A	184	184	90	0.056	0.134	560	550	1025	45	2.5	K
AEG	Santo K91003-5i	185	185	91	0.056	0.135	560	550	1030	45	2.5	K
Liebherr	IKP2060	184	184	92	0.057	0.137	570	550	1024	46	3.7	K
AEG	Santo K91203-6i	180	180	91	0.058	0.139	560	550	1030	47	2.3	K
Liebherr	IKB2460	201	201	110	0.062	0.150	560	550	1230	54	4.6	K
Liebherr	IKB2420	201	201	110	0.062	0.150	560	550	1230	54	3.6	K
Juno	JRG90105	185	185	103	0.064	0.153	560	550	1025	44	2.5	K
Bosch	KTR16V28	152	152	85	0.064	0.153	600	610	850	58	1.8	K
Electrolux	17005W	152	152	86	0.065	0.155	595	635	850	61	1.7	K
AEG	Santo K98803-i	155	155	88	0.065	0.156	560	550	880	44	2.4	K
AEG	Santo K98809-6	155	155	88	0.065	0.156	560	550	880	44	3.2	K
Miele	K5222i	153	153	87	0.065	0.156	560	550	880	45	4.9	K
Neff	KL235A	153	153	87	0.065	0.156	560	550	880	45	2.5	K
Liebherr	IKP1760	152	152	88	0.066	0.159	560	550	874	45	3.5	K
Miele	K9252i-1	152	152	89	0.067	0.160	540	550	872	41	5.0	K
Bosch	KTR16P20	152	152	90	0.068	0.162	600	610	850	58	1.9	K
<b>Mittelwert:</b>					<b>0.055</b>	<b>0.131</b>				<b>48</b>		

**Tabelle 1:** Werte einiger A++ Einbaukühlschränke ohne Gefrierzone (Stand Mai 2010)

Die relativ grossen Unterschiede der spezifischen Verlustleistung [W/Liter] erklären sich vor allem mit unterschiedlichen Verlusten am Türspalt, mit unterschiedlicher Temperatur-Zonierung innerhalb des Kühlschranks und wohl auch mit unterschiedlichen Wirkungsgraden der Kühlkreisläufe.

Für den Vergleich mit Funktionsmustern bzw. Rechenmodellen mit verbesserter Isolation muss der von den Herstellern angegebene totale Wert der Kühlleistung mittels des Wirkungsgrades des Kühlkreislaufes in einen Isolationsverlust-Wert umgerechnet werden.

Alle Kühlschränke der Tabelle 1 besitzen einen Kompressor-Kühlkreislauf für den ein mittlerer Wirkungsgrad von 70 % angenommen werden darf.

Hiermit errechnet sich für A++ Einbau-Kühlschränke ohne Gefrierzone der **mittlere Isolationsverlust zu 0.039 Watt / Liter**.

Mit der durch einige Messungen begründeten Annahme eines Nutzvolumen-Verlustes von 12 Litern für die Aggregate errechnet sich mittels der Aussenmasse und des bekannten Nutzvolumens die **mittlere Isolationsdicke von A++ Einbau-Kühlschränken zu 48 mm**, was im Übrigen auch durch Messung an einigen Kühlschränken bestätigt werden konnte.

## Ausrüstung

Neben den Instrumenten zur Messung der Temperaturverläufe und Leistungen wird zur Herstellung der vakuumisolierten Funktionsmuster ein Vakuum-Pumpstand mit entsprechender Druckmessung notwendig. Helbling Technik AG hat zur Durchführung dieses Projektes einen leistungsfähigen Pumpstand mit Turbopumpe und Vorpumpe beschafft, mit welchem Unterdrücke bis  $1 \cdot 10^{-6}$  mbar erreicht und aufrecht erhalten werden können. Figur 1 zeigt diesen Pumpstand zusammen mit dem Funktionsmuster eines zylindrischen Kühlschranks.

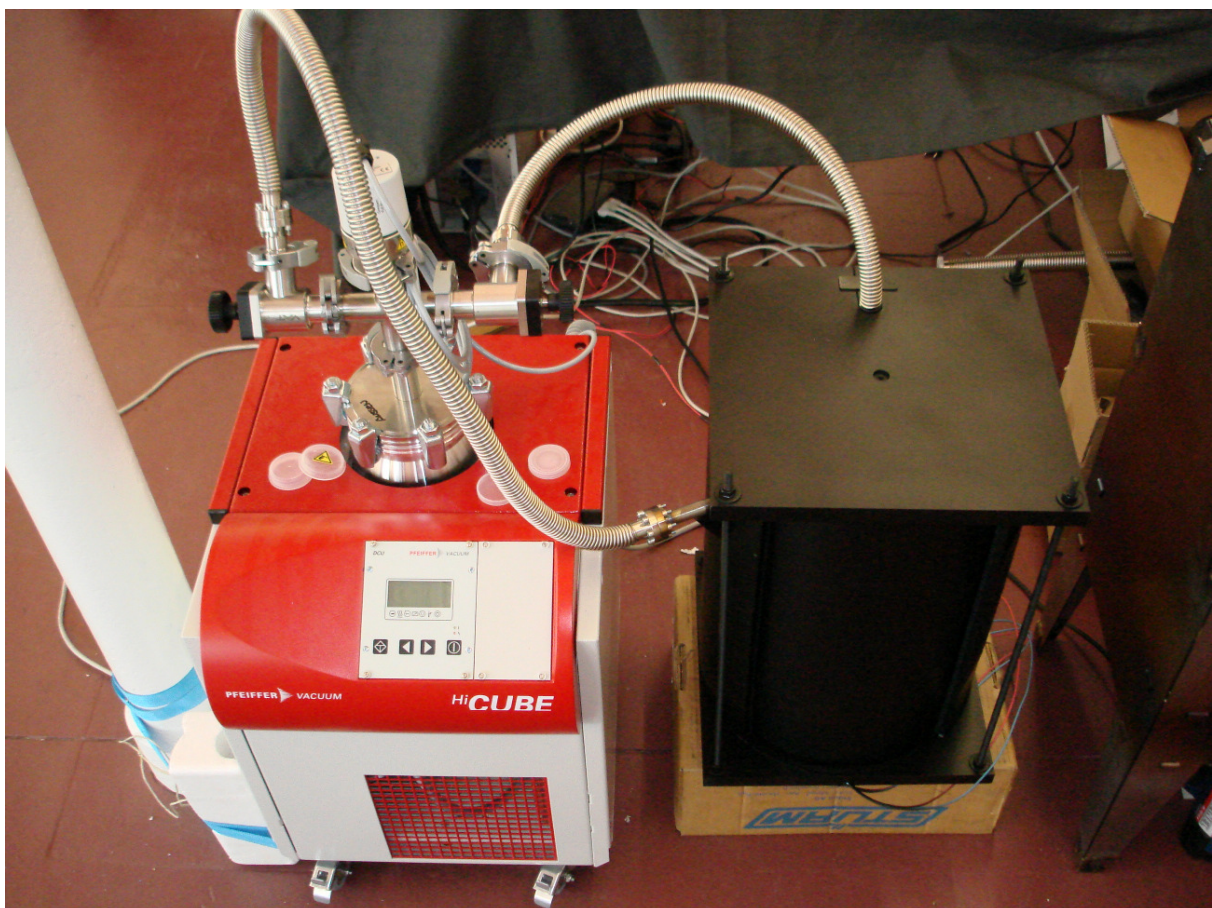


Fig. 1 Pumpstand mit Turbopumpe und Vorpumpe zusammen mit dem Funktionsmuster eines zylindrischen Kühlschranks.

# Ziel der Arbeit

## Prinzipielle Zielsetzungen

- Erarbeiten und Machbarkeitsprüfung der Technologie für eine hocheffiziente thermische Isolation von Haushaltsgeräten und Aufzeigen der resultierenden Energiesparpotentiale.
- Aufzeigen der Möglichkeiten und Chancen dieser neuen Technologie für die Kunden.
- Erarbeiten von Grundlagen für umweltfreundliche und energieeffiziente Techniken im Bereich Haushaltsgeräte.
- Prüfung der technischen Machbarkeit zweier Anwendungen (Kaffeemaschine, Kühlschrank) bis hin zu den Funktionsmustern.

Die durchgeführte Machbarkeitsstudie befasst sich mit den beiden Anwendungen "Hocheffizient isolierte Kaffeemaschine" und "Hocheffizient isolierter Kühlschrank".

## Zielsetzungen „Hocheffizient isolierte Kaffeemaschine“

- Reduktion der benötigten Standby-Energie bzw. Ermöglichung einer Null-Standby-Energie Kaffeemaschine durch automatisches Abschalten der Maschine direkt nach Kaffeebezug.
- Reduktion der mittleren Energie pro Tasse Kaffee
- Komfortgewinn durch kurze Wartezeit bis zur Bereitschaft, d.h. durch eine kurze Aufheizzeit nach einer längeren Abkühlperiode.
- Erarbeitung geeigneter FEM-Modelle zur strukturmechanischen Berechnung der Vakuum-Isolation
- Erarbeitung analytischer und FEM-Modelle zur thermischen Berechnung der vakuum-isolierten Kaffeemaschine
- Aufbau von Funktionsmustern und Messung von Abkühlkurven zur Verifikation der Berechnungen und zur Demonstration von Möglichkeiten.
- Aufzeigen von Verbesserungsmöglichkeiten mittels der verifizierten Rechenmodelle

## Zielsetzungen „Hocheffizient isolierter Kühlschrank“

- Reduzierter spezifischer Energieverbrauch.
- Erhöhter Kundennutzen durch vergrößerten Nutzinhalt bei gleichen Aussenabmessungen.
- Erhöhter Herstellernutzen durch Senkung der Herstellkosten pro Liter Nutzinhalt.
- Konstruktion von zwei unterschiedlichen Aufbau-Möglichkeiten eines vakuumisolierten Kühlschranks, ersten eines Kühlschranks mit herkömmlicher kubischer Form und zweitens eines Kühlschranks mit zylindrischer Form.
- Erarbeitung geeigneter FEM-Modelle zur strukturmechanischen Berechnung der Kühlschrank-Aufbauten
- Erarbeitung analytischer und FEM-Modelle zur thermischen Berechnung der vakuum-isolierten Kühlschränke
- Aufbau von Funktionsmustern und Messung von Leistungsverlusten zur Verifikation der Berechnungen und zur Demonstration von Möglichkeiten.
- Aufzeigen von Verbesserungsmöglichkeiten mittels der verifizierten Rechenmodelle

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

In einer Vorstudie wurden unterschiedlichste Ansätze hocheffizienter Isolationen für Haushaltsgeräte untersucht. Dabei wurde unter anderem auch die naheliegende Variante der Isolation mit VIP (Vakuum-Isolations-Panel) betrachtet, des hohen Preises der entsprechenden Komponenten wegen aber verworfen. Als Resultat hat sich ergeben, dass man sich im Rahmen der jetzt durchgeführten Studie auf Strukturen mit Vakuum-Spalt ohne Kernmaterial konzentriert.

Da eine derartige Isolation nur thermisch wirksam ist, wenn dauerhaft Innendrucke von  $< 10^{-3}$  mbar eingehalten werden, kommen als Wandmaterialien von vornherein nur Metalle, Glas oder metallbeschichtete Kunststoffe in Frage.

Zusätzlich ist bei allen verfolgten Ansätzen zu beachten, dass Innendrucke von  $< 10^{-3}$  mbar nur dann dauerhaft aufrecht erhalten werden können, wenn während des Abpumpens dafür gesorgt wird, dass auch die an der Oberfläche der Wände adsorbierten Gase und Wasserschichten zuverlässig abgepumpt werden. Dies ist erfahrungsgemäss nur dann möglich, wenn die Wände während des Abpumpens auf  $> 300^{\circ}\text{C}$  aufgeheizt werden und wenn im Innern des Vakuums Gettermaterialien<sup>1</sup> zur Bindung der von den Wänden desorbierenden Gase zum Einsatz kommen.

### Hocheffizient isolierte Kaffeemaschine

#### 1. Kaffeemaschine, Funktionsmuster-Serie 1

In einem ersten Schritt wurden 2 mit Vakuum-Isolation ausgestattete vollständige Funktionsmuster einer Kaffeemaschine (siehe Fig. 1) sowie 3 Testbaugruppen mit den thermisch relevanten Teilen dieser Kaffeemaschine erstellt. Dabei wurde auf am Markt erhältliche Vakuum-Bauteile aus Glas zurückgegriffen. Die thermisch relevanten Teile der Kaffeemaschine wurden in ein solches marktübliches Bauteil mit Vakuum-Spalt integriert. Dieses Bauteil weist erfahrungsgemäss eine Lebensdauer des Vakuums von mehr als 10 Jahren auf. Damit wären die für einen kommerziellen Einsatz notwendigen Anforderungen mehr als erfüllt. Allerdings ist die Länge der am Markt erhältlichen Vakuum-Glasbauteile zu gross. Diese unnötige Zusatzlänge musste im Funktionsmuster der Kaffeemaschine in einem Sockel untergebracht werden. (siehe Fig. 2).



Fig. 2 Funktionsmuster einer Kaffeemaschine mit Vakuum-Isolation

<sup>1</sup> Getter sind Materialien, welche Gase und Wasserdampf durch Ad- oder Absorption binden.

Mit den angesprochenen ersten Funktionsmustern wurden Abkühlkurven des Heizelementes in Funktion der Zeit gemessen. In Fig. 3 ist die für alle anderen Funktionsmuster repräsentative Abkühlkurve des Funktionsmusters „HIH2“ im Vergleich zur Abkühlkurve der unisolierten Kaffeemaschine dargestellt.

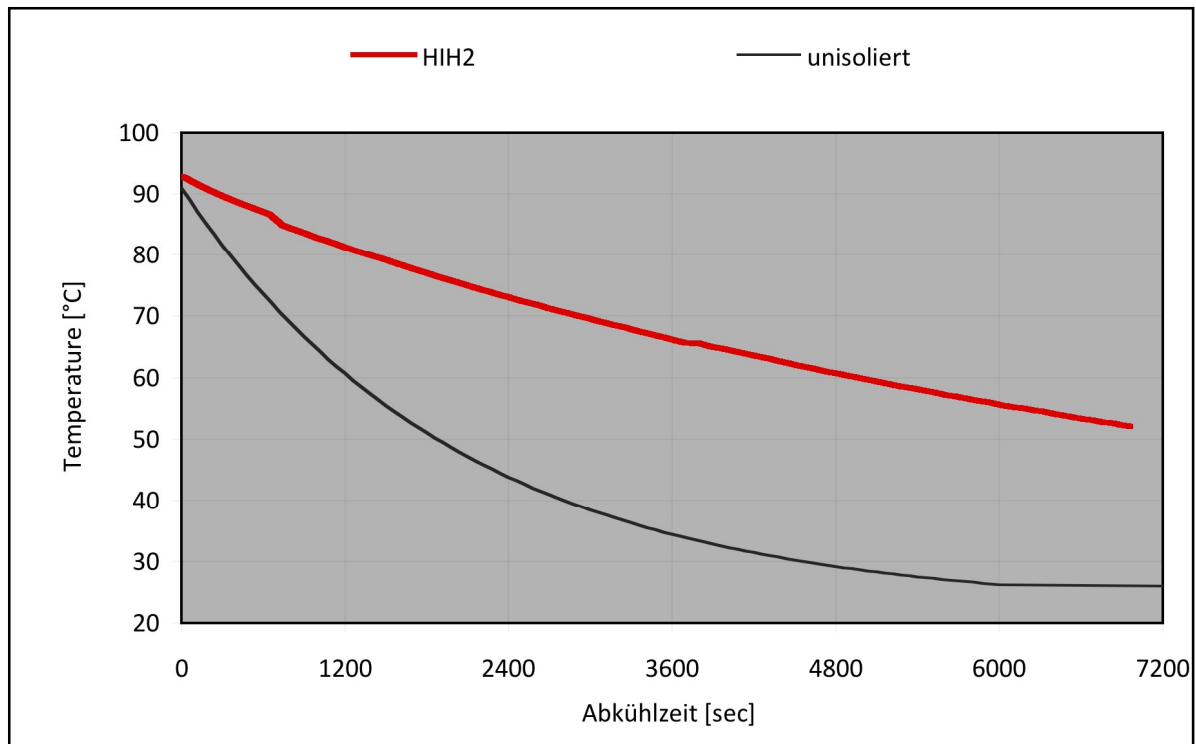


Fig. 3 Gemessene Abkühlkurven der ersten Funktionsmuster, nicht isoliert resp. vakuumisoliert mit doppelwandigem Glasbauteil (HIH2).

Die Messresultate zeigen eine deutliche Verbesserung des Abkühlverhaltens der thermisch relevanten Teile im Vergleich zu einer heutigen entsprechenden Kaffeemaschine. Damit ist klar, dass das angestrebte Ziel einer Strategie "Null-Standby-Energie" technisch machbar ist. Die Messungen zeigen aber auch, dass die mit diesen ersten Funktionsmustern erreichte Verbesserung das von uns angestrebte Ziel einer Temperatur von ca. 80°C nach einer Stunde Abkühlzeit noch deutlich verfehlt.

## 2. Kaffeemaschine, Funktionsmuster-Serie 2

Ein auf der Basis dieser Messresultate erstelltes erstes analytisches thermisches Modell des Funktionsmusters legte die Vermutung nahe, dass ein grosser Prozentsatz der Wärmeverluste durch überdimensionierte elektrische Zuleitungen einerseits und durch grosse Verluste über den Rand der Vakuum-Isolation andererseits stamme.

Um diese Vermutung zu verifizieren, wurden zusätzlich zu den angesprochenen ursprünglichen Funktionsmustern (repräsentiert durch HIH2) zwei zusätzliche

Funktionsmuster erstellt, die sich äusserlich nicht von dem in Fig. 2 gezeigten HIH2 unterscheiden.

Beim ersten derselben (HIH\_dünne\_Leiter) wurde der Querschnitt der ins Innere der Isolation führenden elektrischen Leiter auf ein normgerechtes Minimum (von 1 mm<sup>2</sup> vorher auf neu 0.38 mm<sup>2</sup>) reduziert und die Leiterlänge durch spiralgiges Verlegen ca. um den Faktor 5 verlängert.

Beim zweiten derselben (HIH\_Vakuum\_PU) wurde zusätzlich zu dieser Massnahme der freie Rand des doppelwandigen Vakuum-Glasbauteils mit einer Zusatzisolation aus PU-Schaum versehen.

Zum Vergleich, wurde ein drittes zusätzliches Funktionsmuster (HIH\_PU) erstellt, bei welchem das Vakuum-Glasbauteil durch eine 7.5 mm starke Hülle aus PU-Schaum ersetzt wurde.

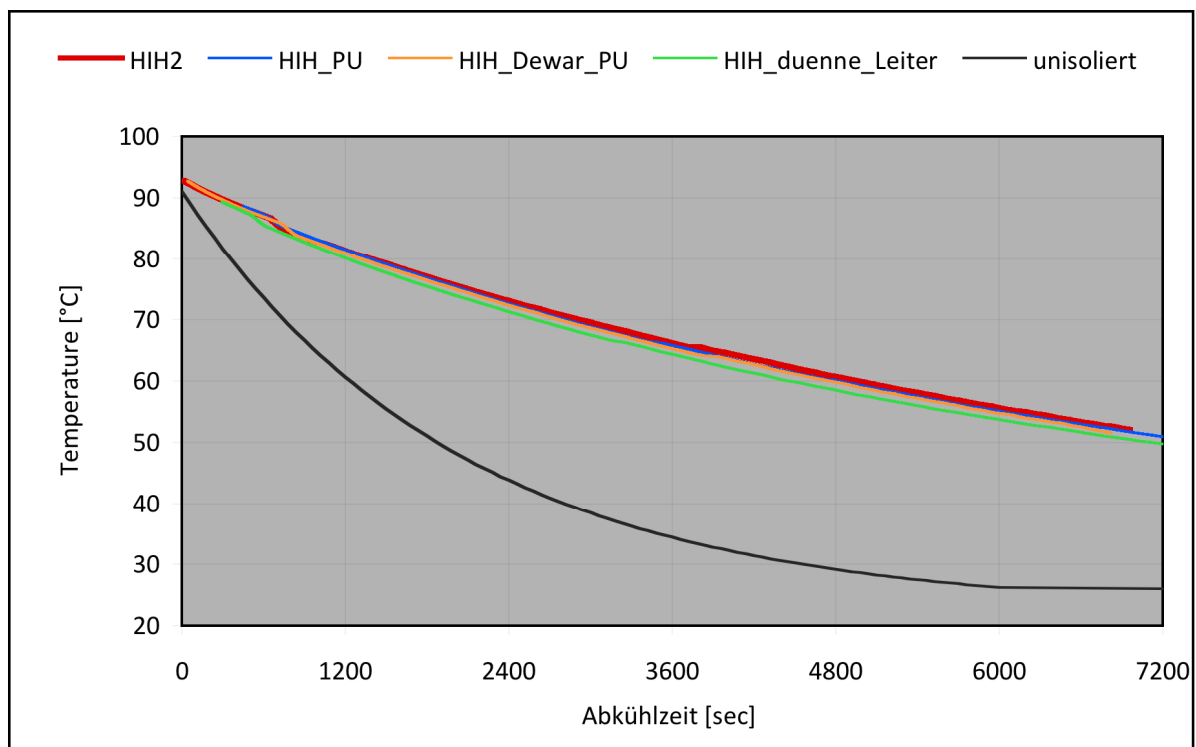


Fig. 4 Gemessene Abkühlkurven weiterer Funktionsmuster vakuumisoliert mit doppelwandiger Glas-Hülle (HIH2, HIH\_dünne\_Leiter, HIH\_dünne\_Leiter) und einer mit 7.5 mm PU-Schaum isolierten Vergleichsvariante (HIH\_PU).

Die Kurven in Fig. 4 zeigen deutlich, dass die für die neuen Varianten getroffenen Massnahmen keinerlei Verbesserung des Abkühlverhaltens zeitigen.

Auch die nur mit 7.5 mm PU-Schaum isolierte Vergleichsvariante zeigt exakt dasselbe Abkühlverhalten.

Diese Tatsache kann nur damit erklärt werden, dass der Wärmeverlust bei allen Funktionsmustern gleichermassen durch den Wärmedurchgang durch die Isolationswände dominiert wird und weitere Wärmeverluste über Leitungen usw. nahezu vernachlässigbar sind. Oder mit andern Worten, die mit dem eingesetzten doppelwandigen Vakuum-Glasbauteil erreichte Isolation ist nicht besser als eine Isolation mit 7.5 mm dickem PU-Schaum.

Dies ist nur dann möglich, wenn der Restdruck im Vakuum-Spalt zwischen den Glaswänden in der Grössenordnung von  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar bis  $1 \cdot 10^{-2}$  mbar beträgt, was bedeutet, dass er um ca. einen Faktor 1000 höher ist als der vom Hersteller der eingesetzten Vakuum-Glasbauteile angegebene Restdruck von höchstens  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar.

Da dieses sehr schlechte Verhalten nicht nur auf eines der Vakuum-Glasbauteile sondern auf alle 10 von uns bezogenen und getesteten zutrifft, ist ein Defekt der Glasbauteile auszuschliessen. Der weit überhöhte Restdruck lässt sich dann nur so erklären, dass die Glasbauteile vom Hersteller für Temperaturen weit unter  $0^\circ\text{C}$  ausgelegt sind und bei Temperaturen knapp unter  $100^\circ\text{C}$  dadurch versagen, dass in diesem Temperaturbereich ein sehr starkes Ausgasen der inneren Oberfläche stattfindet.

Eine plausible Vermutung zur Erklärung dieses starken Ausgasens bei höheren Temperaturen findet sich bei näherer Betrachtung in der Tatsache, dass die Glaswände, zur Minderung der Strahlungsverluste, vakuumseitig mit einer Silberschicht von einigen  $\mu\text{m}$  Dicke überzogen sind. Diese Silberschicht bindet bei niedrigen Temperaturen sehr viel Wasserdampf, der dann bei höheren Temperaturen ausgast.

### 3. Kaffeemaschine, Verbesserungs-Massnahmen

Theoretisch sind Massnahmen zur Vermeidung bzw. Beherrschung dieser Restdruckerhöhung durch Ausgasen der vakuumseitigen Wände eines derartigen Glasbauteils denkbar. Es könnte sich hier beispielsweise um Massnahmen wie das Anbringen der Silberschicht auf der Aussenseite oder das Einbringen von Gettermaterialien in den Vakuum-Spalt handeln.

Da dies aber bedeuten würde, dass wir die Verbesserung des Glasbauteils selbst an die Hand nehmen müssten, verzichten wir auf den Einsatz von Glas als Vakuum-Wandmaterial und konzentrieren uns auf den Einsatz von Stahl, mit dem auch eine allfällige notwendige Eigenentwicklung wesentlich schneller und beherrschbarer möglich ist.

Entsprechende Stahlbauteile mit Vakuum-Spalt sind wohlbekannt und kommen als Isoliergefässe für Getränke millionenfach zum Einsatz. Unsere Abklärungen haben ergeben, dass für unseren Fall brauchbare derartige Teile in grösseren Stückzahlen für Kosten von unter \$ 2.00 erhältlich sind, womit sie preislich im zulässigen Rahmen bleiben. Unsere weiter unten geschilderten Messungen mit derartigen marktüblichen Vakuum-Bauteilen aus Stahl zeigen im Vergleich zu den besprochenen Glasbauteilen bei hohen Temperaturen ein deutlich verbessertes Isolationsverhalten. Sie haben aber den Nachteil, dass sie mit ca. 0.5 mm Wandstärke relativ dickwandig sind und deshalb immer noch unnötig hohe Wärmeverluste zeitigen. Da zusätzlich davon ausgegangen wird, dass zur Sicherung einer genügend langen, d.h. ca. 10-jährigen Lebensdauer des Vakuums geeignete Gettermaterialien ins Vakuum eingebracht werden müssen und weil die Möglichkeit für eine weitere Optimierung eines Vakuum-Bauteils aus Stahl offen gehalten werden soll, wurden zunächst entsprechende strukturmechanische Berechnungen durchgeführt.

Diese strukturmechanischen Berechnungen hatten das Ziel abzuklären, welche Bauform ein entsprechendes Vakuum-Bauteil aus Stahl aufweisen sollte, damit es einerseits in grossen Stückzahlen möglichst kostengünstig hergestellt werden kann und andererseits zur Minimierung der Wärmeverluste möglichst dünnwandig sein kann.

In Fig. 5 ist das FEM-Modell eines solchen Entwurfes dargestellt. Die FEM-Berechnungen haben ergeben, dass solche Bauteile mit einer durchschnittlichen Wandstärke von höchstens 0.2 mm Dicke nicht nur dem Luftdruck sondern zusätzlich sämtlichen zu erwartenden mechanischen Belastungen standhalten können.

Die strukturmechanischen Berechnungen verdeutlichen also, dass eine eingehende Analyse des thermischen Verhaltens einer Kaffeemaschine mit derartigen Vakuum-Stahlbauteilen lohnend ist.

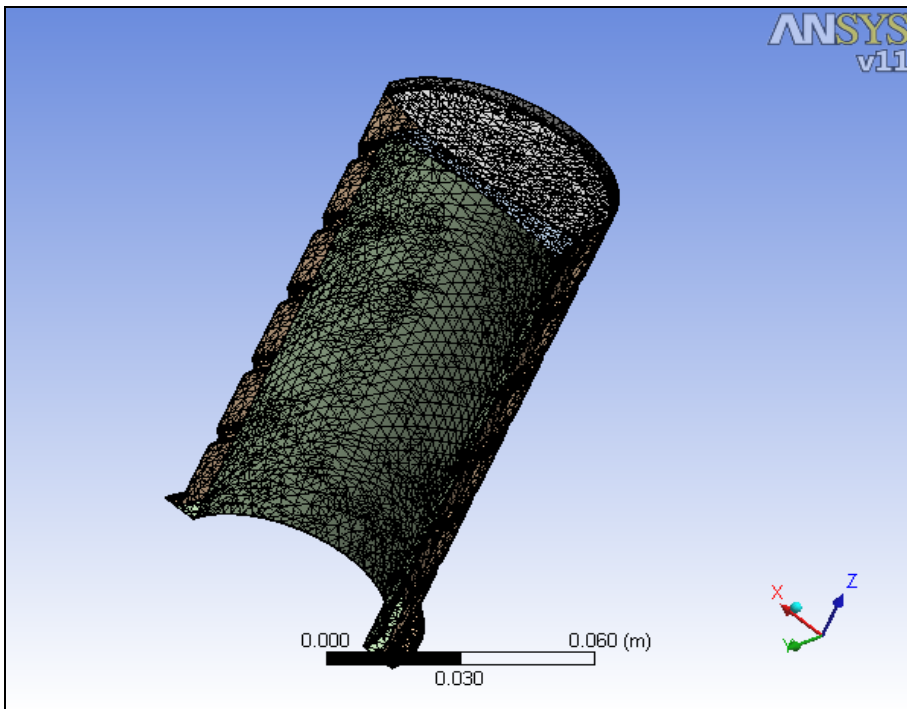


Fig. 5 Strukturmechanisches Modell einer geeigneten Vakuum-Isolation aus Stahl

#### 4. Kaffeemaschine, Messungen und Berechnungen mit Vakuum-Stahlbauteilen

Um zu brauchbaren Aussagen bezüglich des Abkühlverhaltens einer Kaffeemaschine mit einer Vakuum-Isolation aus Stahl zu kommen musste, ein neues analytisches Modell erstellt werden. Folgende Vorgehensweise wurde gewählt:

- a. Mit den in Fig. 3 und Fig. 4 dargestellten Messwerten wurden zunächst die Verlustleistungen der unisolierten sowie des mit einem Vakuum-Glasbauteil isolierten Funktionsmusters HIH2 bestimmt. Tabelle 2 zeigt die entsprechenden Resultate. Dargestellt sind auch die Werte der „in letzter Sekunde“, später besprochenen Funktionsmuster-Serie 3 Vakuum-Stahlbauteil.

	Temperaturgradient bei t=0	Wärmekapazität	Verlustleistung bei t=0
	°C/sec	J/°C	Watt
unisoliert	0.029	480	13.92
HIH2	0.009	480	4.32
HIH3	0.006	480	2.88

Tabelle 2 Verlustleistungen einer unisolierten bzw. einer mit Vakuum-Glasbauteil (HIH2) bzw. Vakuum-Stahlbauteil (HIH3) isolierten Kaffeemaschine bei Beginn des Abkühlens von 93 °C her.

Der Wert von ca. 14 Watt für die unisolierte Maschine entspricht selbstverständlich dem immer wieder gemessenen Erfahrungswert, der Wert von ca. 4.3 Watt für HIH2 bildet die erste Grundlage für das zu erstellende thermische Modell.

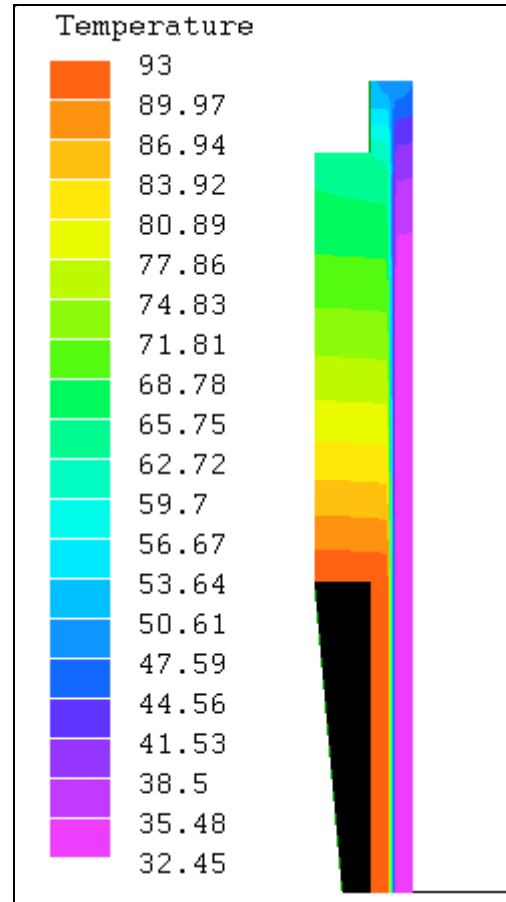
- b. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine geeigneten Vakuum-Stahlbauteile vorlagen, mit welchen ein weiteres Funktionsmuster hätte erstellt werden können, wurde in ein Vakuum-Stahlbauteil der Wandstärke 0.5 mm, welches verglichen mit dem eigentlich benötigten Bauteil in seinen Dimensionen nur wenige Millimeter zu klein ist, eine Wassermenge mit der Wärmekapazität 480 J/°C eingefüllt. Diese Wärmekapazität entspricht derjenigen des Heizelementes der Kaffeemaschine. Das Wasser wurde auf 93 °C aufgeheizt und einige Minuten auf dieser Temperatur gehalten um einen stabilen Zustand (steady state) zu erreichen. In diesem Zustand wurden zusätzlich zur

Wassertemperatur an drei Stellen des Stahlgefäßes die Temperaturen gemessen. Danach wurde das Wasser nicht mehr beheizt und die Abkühlkurve aufgezeichnet. Die entsprechenden Werte sind in Fig. 7 dargestellt.

c. Die entsprechenden Messungen wie in b. geschildert, wurden mit dem bei den oben geschilderten Funktionsmustern eingesetzten Vakuum-Glasbauteil durchgeführt. Die entsprechenden Werte sind ebenfalls in Fig. 7 dargestellt.

d. Mit Hilfe der in a., b. und c. gemessenen Werte wurde ein einfaches thermisches FEM-Modell so optimiert, dass bei der thermischen "steady state" Berechnung die berechneten Verlustleistungen und Temperaturverteilungen mit den gemessenen übereinstimmen.

Fig. 6 zeigt das Resultat einer solchen FEM-Berechnung. Die Figur auf der rechten Seite stellt den Querschnitt durch die Abwicklung des verwendeten Vakuum-Glasbauteils dar, wobei der schwarze Bereich der Figur das 93°C heisse Wasser repräsentiert und die Säule mit abnehmender Temperatur oberhalb des Wassers, den im Vakuum-Bauteil gefangenen Wasserdampf.



e. Ausgehend von den derart durch Messresultate optimierten und verifizierten FEM-Modellen des Vakuum-Glasbauteils und Vakuum-Stahlbauteils mit 0.5 mm Wandstärke wurden für zwei weitere FEM-Modelle die "steady state" Verlustleistungen berechnet. Für ein erstes Modell mit 0.2 mm Stahlwandstärke und ein zweites, "Stahl optimiert" benanntes bei welchem Massnahmen zur Minimierung der Wärmestrahlung durch das Vakuum und des Wärmetransports am Übergang von innen nach aussen berücksichtigt wurden.

f. Zur weiteren Verifizierung und zur Bestimmung der Abkühlkurven wurde für alle diese Varianten die "steady state" Verlustleistungen mit Hilfe eines unabhängig erstellten analytischen Modells berechnet.

Fig. 6 Resultat einer thermischen FEM "steady state" Berechnung mit 93°C heissem Wasser in dem Vakuum-Glasbauteil

Die Resultate dieser analytischen und FEM-Berechnungen sind zusammen mit den Werten der später besprochenen Funktionsmuster-Serie 3 (HIH3) in Tabelle 3 dargestellt.

Aufbau der Vakuum-Isolation	thermische Verlustleistung [W] (steady state bei 93°C)		
	Messung	analytisch	FEM
unisoliert	13.92	14.00	
Glas (HIH2)	4.32	4.31	4.32
Stahl 0.5 mm		3.24	3.12
Stahl 0.4 mm (HIH3)	2.88	2.87	
Stahl 0.2 mm		2.13	2.12
Stahl optimiert		1.08	0.80

Tabelle 3 Resultate der FEM und analytischen "steady state" Berechnungen der Varianten von Vakuum-Isolationsbauteilen für Kaffeemaschinen

Die mittels Messung und unterschiedlichen Berechnungsmethoden erarbeiteten Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung, wobei die mit FEM berechnete Verlustleistung für die Variante "Stahl optimiert" deutlich besser ist als die analytisch berechnete. Für die im Folgenden geschilderte Abschätzung der Abkühlkurven und für weitere Aussagen wird aber von dem höheren Wert der analytischen Berechnung ausgegangen.

- g. Auf der Basis der beschriebenen "steady state" Berechnungen wurden analytische Modelle zur Berechnung der Abkühlkurven erarbeitet und, soweit als möglich, mit den gemessenen Abkühlwerten verifiziert. Fig. 7 zeigt die entsprechenden Resultate.

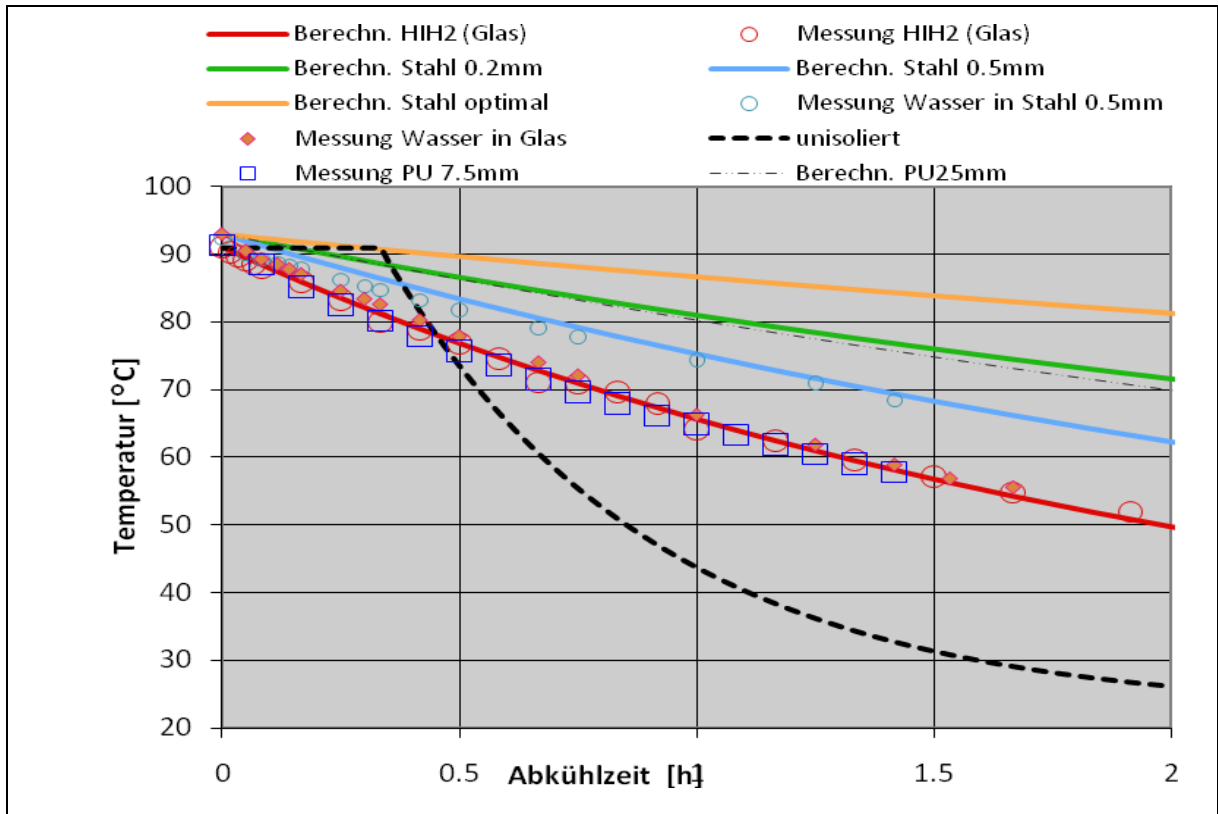


Fig. 7 Berechnete und gemessene Abkühlkurven von Kaffeemaschinen mit verschiedenen Isolationen

Die schwarz dargestellte, gemessene Abkühlkurve der unisolierten Kaffeemaschine zeigt das 20-minütige Halten der Bereitschaftstemperatur und dann innerhalb von ca. 1.5 Stunden ein Abkühlen auf Raumtemperatur. Nach einer Stunde Abkühlen (d.h. 1.33 Stunden total) ist die Temperatur der unisolierten Maschine bereits auf ca. 35°C abgesunken.

Die rot dargestellte, berechnete Abkühlkurve der Kaffeemaschine mit Vakuum-Glasbauteil ist nahezu identisch mit den gemessenen Werten des entsprechenden, weiter oben ausführlich besprochenen Funktionsmusters "HIH2" und auch des Funktionsmusters mit 7.5 mm PU-Isolation.

Ebenfalls identisch mit dieser Kurve sind die gemessenen Werte des unter "c." angesprochenen Versuches mit heissem Wasser in dem Vakuum-Glasbauteil. Dies beweist, dass es zum Zweck der Abschätzung des Potentials der Vakuum-Stahlbauteile zulässig ist, den Thermoblock der Kaffeemaschine durch heisses Wasser zu simulieren.

Entsprechend grosses Vertrauen darf in die blau dargestellte, berechnete Abkühlkurve des zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Vakuum-Stahlbauteils mit 0.5 mm Wandstärke gesetzt werden, welche im Übrigen sehr gut mit den gemäss "b." gemessenen Werten übereinstimmt.

Auch der nicht durch Messungen verifizierten, grün dargestellten Abkühlkurve einer Isolation mit einem Vakuum-Stahlbauteil von 0.2 mm Wandstärke darf Vertrauen geschenkt werden, weil für ihre Berechnung eine nur geringfügige Modifikation des analytischen Modells notwendig ist. Die Kurve zeigt, dass mit einer solchen, sehr preiswert herstellbaren Variante das von uns als Mindestresultat angestrebte Abkühlverhalten mit einer Temperatur von mindestens 80°C nach einer Stunde Abkühlzeit erreichbar sein sollte. Interessant ist auch, dass zum Erreichen eines ähnlich guten Resultates eine mehr als 25 mm dicke PU-Isolation notwendig wäre, was aus Platzgründen völlig unmöglich ist.

Wie die orange dargestellte Kurve zeigt, sind durch einfach durchzuführende Massnahmen zur Reduktion der Wärmestrahlung und durch etwas aufwändigere Massnahmen zur Reduktion des Wärmetransports im Übergang von innen nach aussen nochmals deutliche Verbesserungen möglich. Ob solche zum Einsatz kommen können, wird sich über die dadurch notwendigen zusätzlichen Herstellkosten entscheiden müssen.

- h. Mithilfe der analytischen Modelle zur Berechnung der Abkühlkurven können in Funktion der Abkühlzeit Aussagen zur notwendigen Aufheizzeit und zum Energieaufwand jeweils bis zum Erreichen der Bereitschaftstemperatur berechnet werden. Weiter ist es damit möglich eine Abschätzung der Energieeinsparung bezüglich der heutigen Kaffeemaschinen zu machen. Die entsprechenden Resultate sind in den Figuren 8, 9, 10 dargestellt.

Fig. 8 verdeutlicht, dass mit isolierten Kaffeemaschinen eine Null-Standby-Energie Strategie geradezu zwingend ist und dies nicht nur ohne jegliche Komfort-Einbusse, sondern im Sinne verkürzter Wartezeiten bis zur Bereitschaft der Maschine sogar mit Komfort-Gewinn. Null-Standby-Energie in diesem Sinne bedeutet, dass die Kaffeemaschine, inklusive der Elektronik, unmittelbar nach dem Kaffeebezug automatisch abgeschaltet wird. Selbst in den ersten 20 Minuten des Abkühlens innerhalb derer die

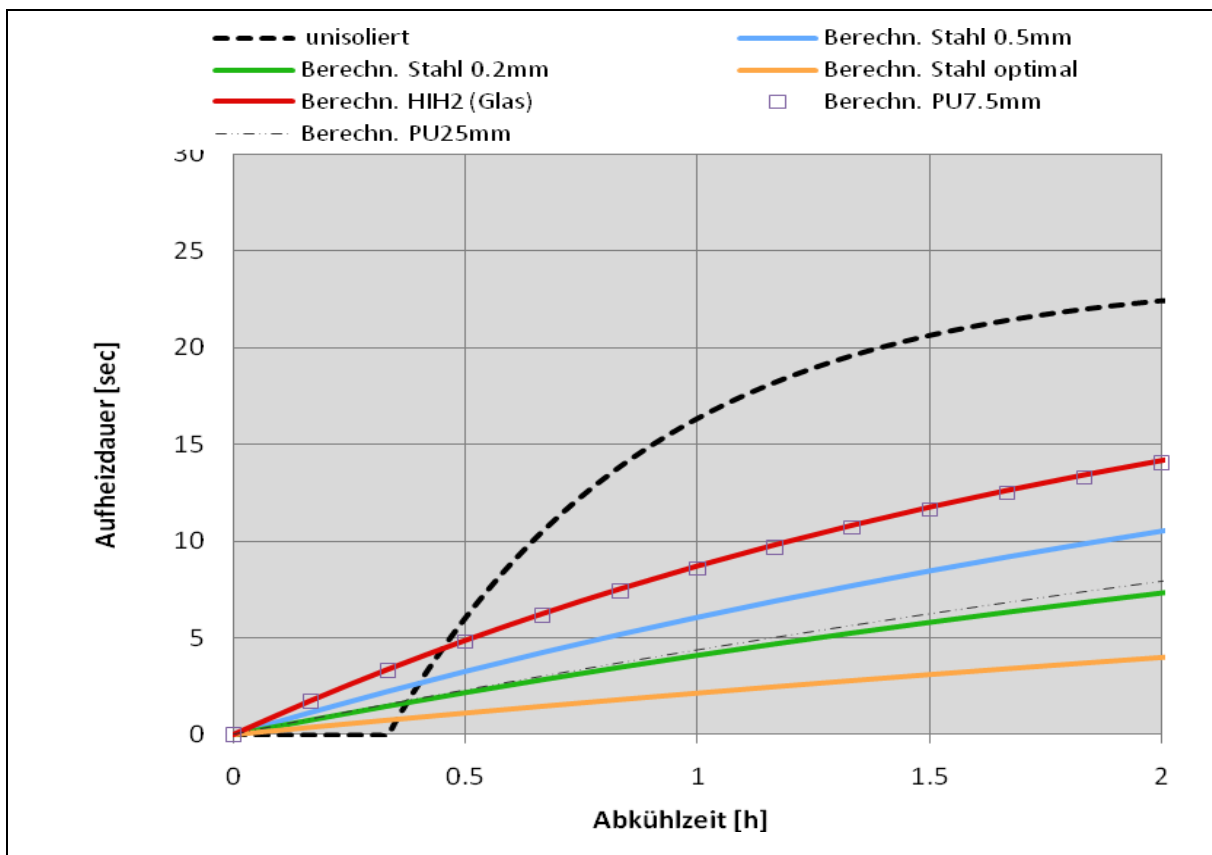


Fig. 8 Dauer des Aufheizens bis zur Bereitschaftstemperatur von ca. 93°C in Funktion der vorherigen Abkühlzeit für Kaffeemaschinen mit unterschiedlichen Isolationen.

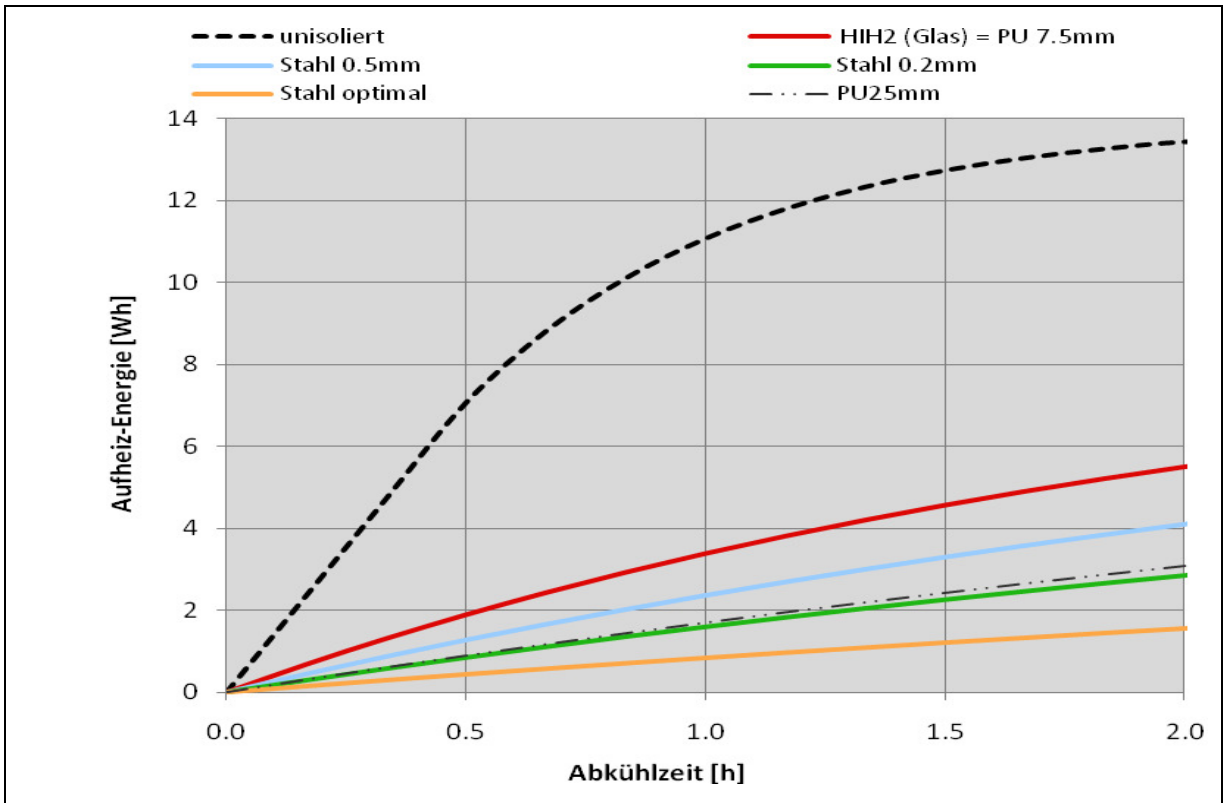


Fig. 9 Energieaufwand zum Erreichen der Bereitschaftstemperatur von ca. 93°C in Funktion der vorherigen Abkühlzeit für Kaffeemaschinen mit unterschiedlichen Isolationen. (unisoliert beinhaltet das mit 14 Watt 20 min. auf Temperatur halten)

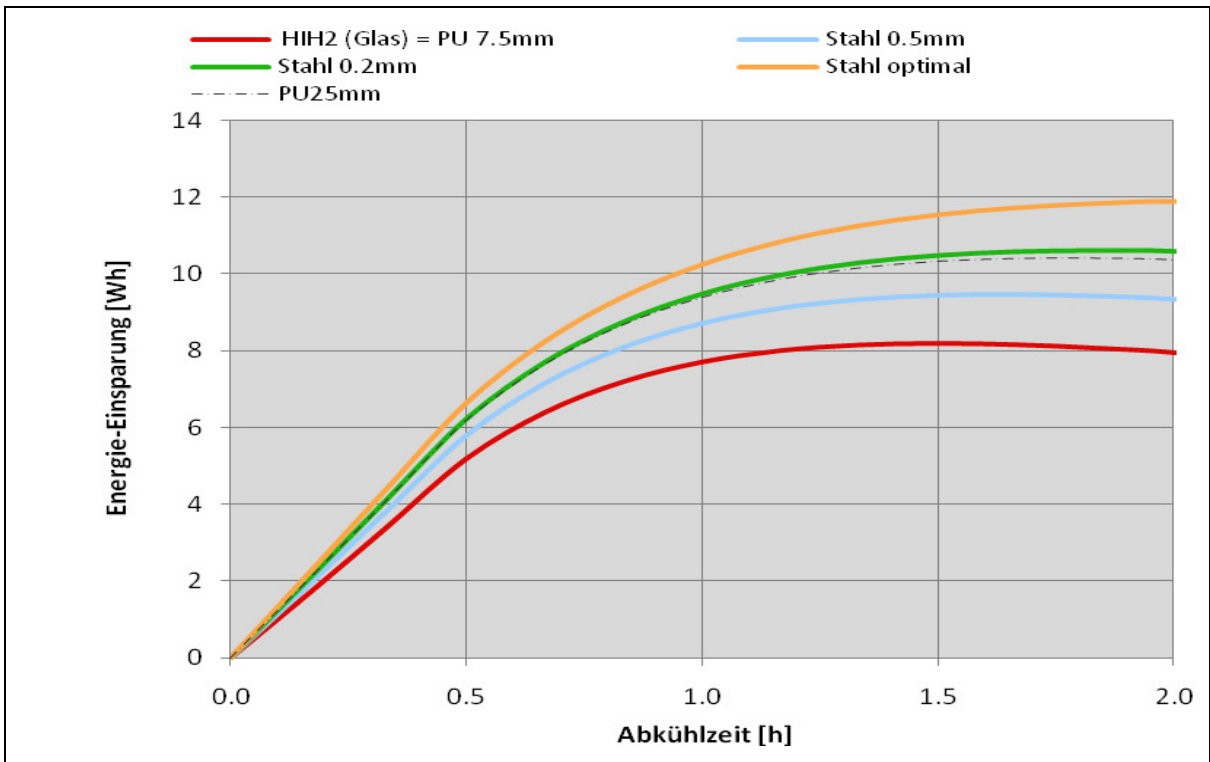


Fig. 10 Energie-Einsparungen zum Erreichen der Bereitschaftstemperatur von ca. 93°C in Funktion der vorherigen Abkühlzeit für Kaffeemaschinen mit unterschiedlichen Isolationen bezogen auf unisoliert.

heutige Dolce Gusto Kaffeemaschine auf Bereitschaftstemperatur gehalten wird, sind die durch dieses sofortige Abschalten der isolierten Maschine entstehenden Wartezeiten in dem Sinne vernachlässigbar, dass es mindestens gleich lange dauert, um die Kaffeekapsel in die Maschine einzulegen. Bereits nach maximal 30 min Abkühlzeit ist die Wartezeit im Vergleich zu heute deutlich kürzer.

Fig. 9 und Fig. 10 zeigen, dass durch hocheffiziente Isolation der Kaffeemaschine erhebliche Einsparung an Energie erreicht werden kann. Bereits nach einer halben Stunde Abkühlen beträgt das Einsparpotential ca. 6 Wh pro Inbetriebnahme der Kaffeemaschine und steigert sich auf ca. 10 Wh nach ca. einer Stunde Abkühlen.

Die Verkürzung der Wartezeit wird natürlich noch grösser, wenn, wie bei der nächsten Generation von Dolce Gusto Maschinen vorgesehen, die Maschine nur noch 5 Minuten statt wie bisher 20 Minuten lang auf Bereitschaftstemperatur gehalten wird. Selbstverständlich wird dadurch andererseits die Energieeinsparung einer vakuumisolierten Maschine (nach einer Abkühlzeit von 5 Minuten) um die durch die Reduktion der „bereit“ Dauer eingesparten 3.5 Wh weniger gross.

Eine Aussage über die daraus resultierende prozentuale Energie-Einsparung pro Tasse Kaffee ist nur unter statistisch nicht bekannten und deshalb eigentlich spekulativen Annahmen bezüglich des "mittleren Verhaltens der Kaffeetrinker" möglich, aber trotzdem interessant. Die folgende kleine Berechnung ist in diesem Sinne zu verstehen. Die verwendeten Werte stammen bezüglich der Erzeugungenergie pro Tasse Kaffee aus einer Tabelle welche - gemäss der Vereinbarung zwischen FEA und BFE für eine „energieEtikette“ für Kaffeemaschinen - für die Dolce Gusto Kaffeemaschine ausgearbeitet wurde. Der Wert für die Aufheizenergie nach total 2 h standby ist dort mit 15 Wh angegeben, hier rechnen wir mit 13.5 Wh, was für die Energieeinsparung Werte auf der sicheren Seite ergibt.

Die Kaffee-Erzeugung benötigt : 9.6 Wh Energie pro 120 g Kaffee

**Annahme: nach jeweils 2 Stunden werden 2 Tassen Kaffee a 120 g erzeugt**

heute	19.20	Wh	Erzeugungenergie für 2 Tassen
+	13.50	Wh	Aufheizenergie heute (20 min bereit)
=	16.35	Wh	pro Tasse heute (20 min bereit)
oder			
+	10.00	Wh	Aufheizenergie min. (5 min bereit)
=	14.80	Wh	Pro Tasse bei 5 min. bereit Dauer
isoliert	19.20	Wh	Erzeugungenergie für 2 Tassen
+	3.00	Wh	Aufheizenergie isoliert
=	11.10	Wh	pro Tasse, Kaffeemaschine isoliert
⇒ bezüglich 20 min standby	32 %		Energie-Einsparung pro 120 g Tasse Kaffee
⇒ bezüglich 5 min standby	25 %		Energie-Einsparung pro 120 g Tasse Kaffee

Da bei kleineren Kaffeetassen die Einsparung noch grösser wird, darf festgehalten werden, dass das Energie-Einsparpotential pro Tasse Kaffee durch eine hocheffiziente Isolation der Kaffeemaschine in der Grössenordnung von 25 bis 30% liegt.

## 5. Kaffeemaschine, Funktionsmusterreihe 3

Kurz vor Abschluss der vorliegenden Machbarkeitsstudie ist es gelungen einige Muster eines von den Dimensionen her geeigneten Stahlbauteils mit Vakuum-Spalt zu beschaffen. Die mittlere Wandstärke dieses Bauteils errechnet sich aus dessen Gewicht und Dimensionen zu 0.4mm.

Mit diesen Stahl-Bauteilen wurden 2 weitere, "HIH3" genannte Funktionsmuster der Kaffeemaschine gebaut, welche in ihrem äusseren Erscheinungsbild identisch mit Figur 2 sind.

Die mit dem Funktionsmuster HIH3 gemessene Abkühlkurve ist in Figur 11 dargestellt.

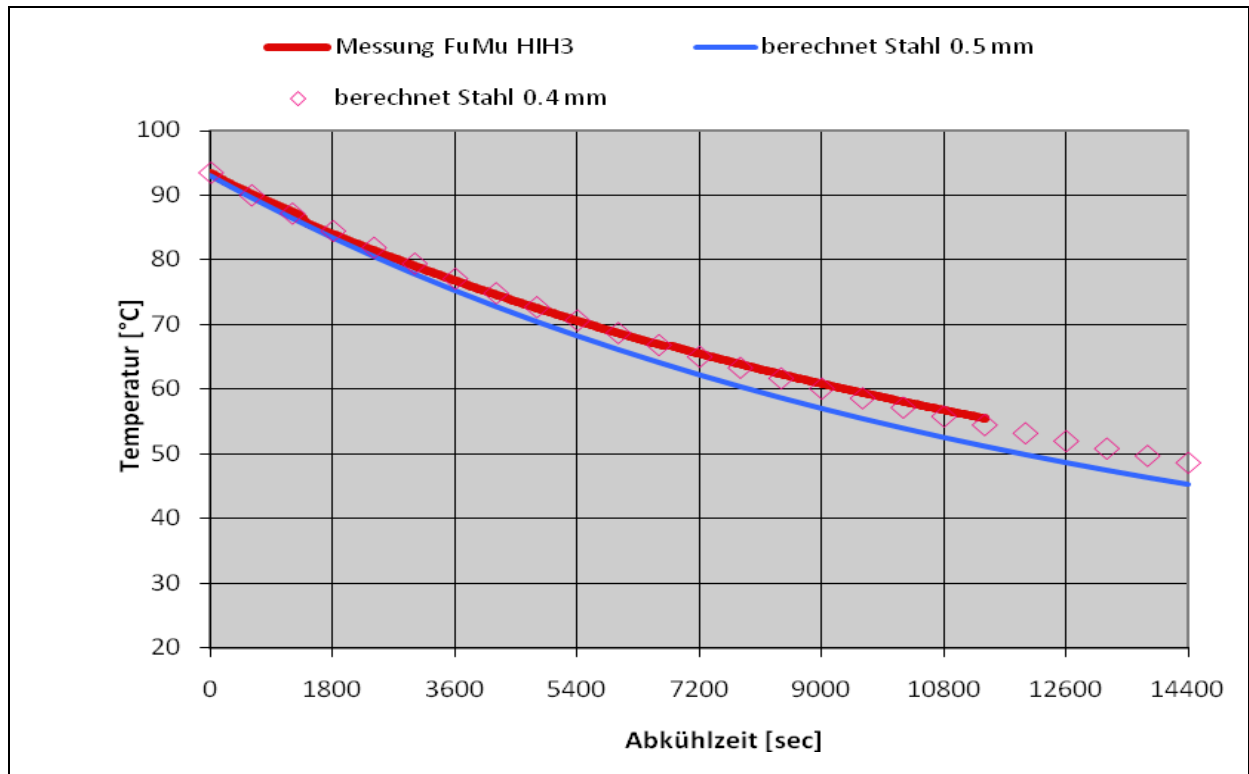


Fig. 11 Abkühlkurve des Funktionsmusters einer Kaffeemaschine mit einer 0.4 mm dicke Stahlwände aufweisenden Vakuum-Isolation

Als Referenz ist in Fig. 11 zusätzlich nochmals die bereits in Fig. 7 dargestellte berechnete Abkühlkurve eines Stahlbauteils mit Vakuum-Spalt und Wandstärke 0.5 mm gezeigt.

Zusätzlich sind die mit dem entsprechend analytischen Modell berechneten Werte für das im Funktionsmuster HIH3 verwendete Stahlbauteil mit Vakuum-Spalt und Wandstärke 0.4 mm dargestellt.

Es kann festgestellt werden, dass das gemessene Abkühlverhalten des Funktionsmusters HIH3 sehr gut mit den berechneten Werten übereinstimmt.

Dies bedeutet, dass dem Berechnungs-Modell auch bezüglich der in Fig. 7 gezeigten Verbesserungsvarianten "Stahl 0.2 mm" und "Stahl optimal" hohes Vertrauen entgegengebracht werden darf.

Damit sind auch die im vorigen Abschnitt in Fig. 8 bis 10 dargestellten Berechnungen und die Überlegungen bezüglich des Potentials zur Energie-Einsparung bestätigt.

## Hocheffizient isolierter Kühltank

Bezüglich des Kühltanks wurden 2 unterschiedliche Ansätze untersucht, nämlich ein Ansatz mit einem zylindrischen und ein anderer mit einem kubischen Aufbau des Kühltanks.

### 1. Kubischer Kühltank

Bei diesem Ansatz wird versucht eine potentiell kostengünstige Lösung zu finden bei welcher die übliche kubische Form eines Kühltanks beibehalten wird.

Bei einem plattenartigen Element mit Vakuum-Spalt ohne Kernmaterial treten starke Durchbiegungen der aus Gewichtsgründen möglichst dünnen Wände auf. Mit Hilfe von Distanzhaltern zwischen den Wänden muss ein minimaler Vakuum-Spalt beibehalten werden (siehe Fig. 12). Thermische Berechnungen haben ergeben, dass der Wärmefluss über die Summe dieser Distanzhalter nicht grösser werden darf als ca.  $0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$ , damit die anvisierten 80 % Energieeinsparung realisiert werden können. Wenn die Distanzhalter in Form von Druckstäben ausgelegt werden, führt dies beispielsweise in je 120 mm Abstand zu Stäben aus  $\text{ZrO}_2$  ( $\lambda=2.5 \text{ W/mK}$ ) von ca. 1 mm Durchmesser.

Bei plattenartigen Elementen mit Vakuum-Spalt ohne Kernmaterial ist darauf zu achten, dass der Wärmefluss über den Plattenrand klein bleibt. Thermische Berechnungen haben ergeben, dass dieser Wärmefluss nicht grösser werden darf als ca.  $0.015 \text{ W}/(\text{Laufmeter}, ^\circ\text{K})$ .

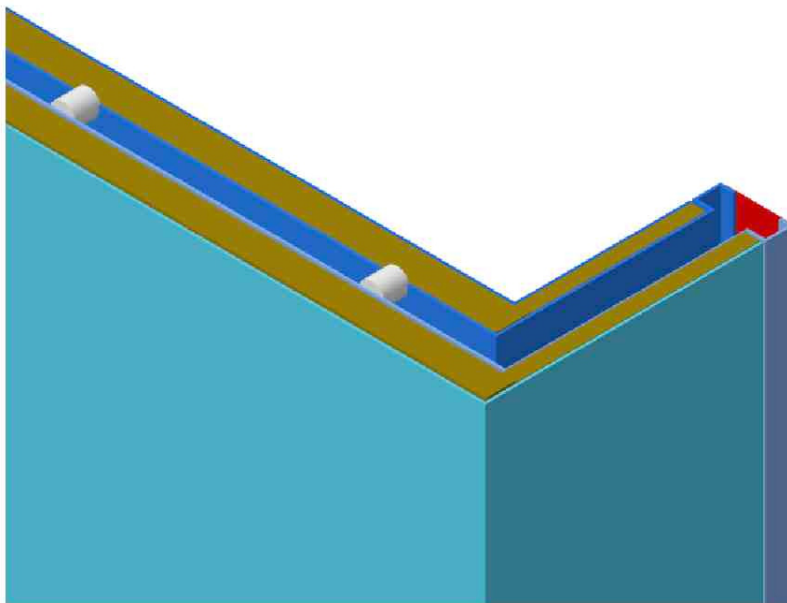


Fig. 12 Möglicher Aufbau einer Vakuum-Kühltanktüre mit Distanzhaltern und dünnem Randband

Ein erster Ansatz für einen diese Forderungen erfüllenden Randverbund führt über die Verwendung beispielsweise 20 bis 50  $\mu\text{m}$  dünner Stahlbänder (siehe Fig. 12).

Zwei plattenartige, 600 x 800 x 30 mm grosse derartige Funktionsmuster wurden mit fertigungstechnisch grossem Aufwand erstellt (siehe Fig. 13). Die Dicke des oberen und unteren Stahlbleches beträgt jeweils 0.5 mm, diejenige des den Randverbund bildenden Stahlbands beträgt 50  $\mu\text{m}$ . Die Verbindung zwischen den Stahlplatten und dem Randband wurde mittels Laserschweissen hergestellt.

Als Distanzhalter zwischen dem oberen und unteren Blech wurden in 100 mm-Abständen 20 mm lange  $\text{ZrO}_2$ -Stäbe mit einem Durchmesser von 1 mm verwendet. Damit eine Verbindung zwischen den Stahlplatten und den  $\text{ZrO}_2$ -Stäben möglich war, wurden die Stäbe an beiden Enden in hochdruckfeste, 5 mm dicke Stahlplatten mit  $\varnothing$  10 mm und einem zentralen Sackloch mit  $\varnothing$  1 mm eingepresst.

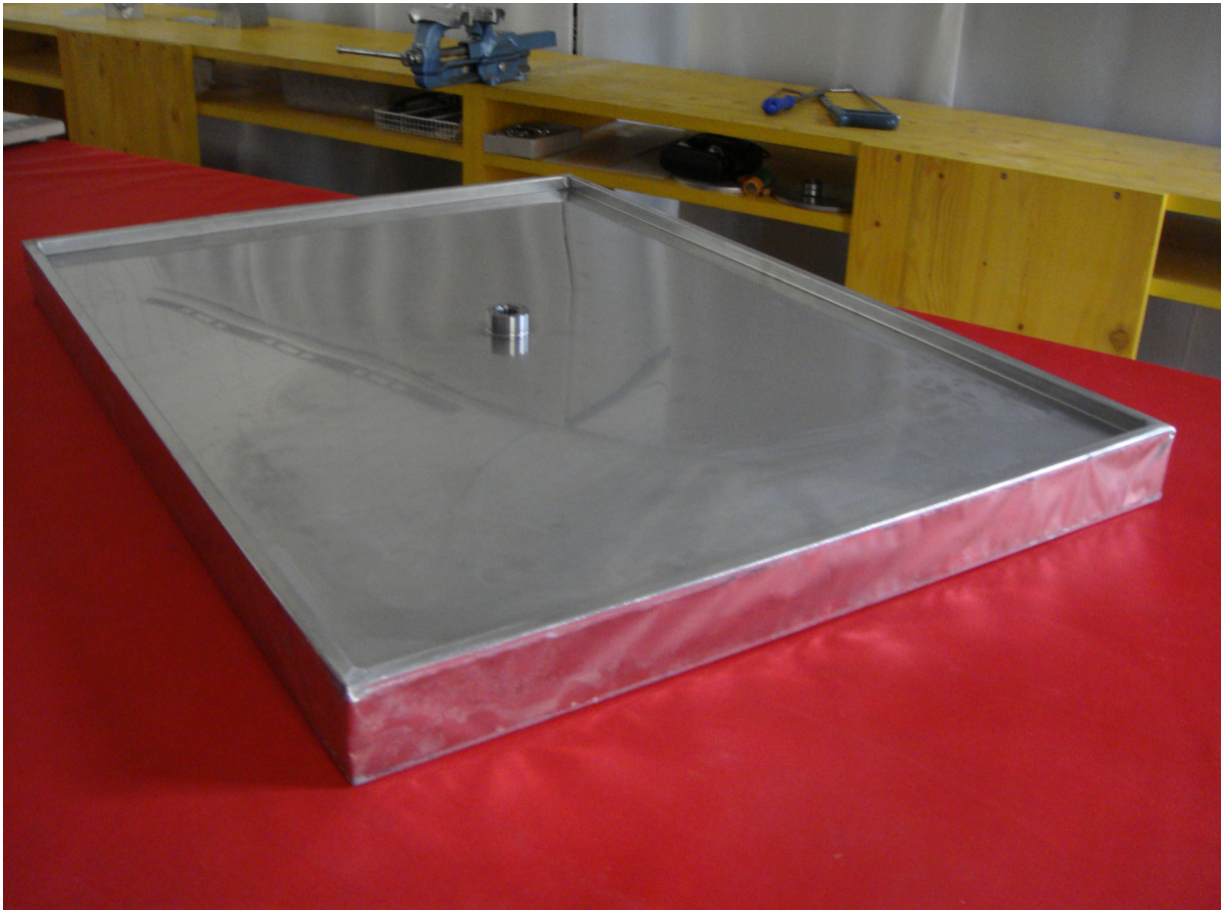


Fig. 13 Funktionsmuster einer Platte mit Vakuum-Isolation, mit 0.5 mm dicken Blechen und 50  $\mu\text{m}$  dickem Randband aus Edelstahl.

Nach Fertigstellung des Randverbundes hat sich sehr rasch erwiesen, dass ein derartiger Aufbau nicht praktikabel ist. Die  $\text{ZrO}_2$ -Stäbe halten zwar den sehr hohen Druckkräften stand, brechen aber schon bei geringen Querkräften. Weil ebendies bei den geschilderten Funktionsmustern während ihres Transportes geschah, wurde der Versuch vorzeitig abgebrochen.

Da es offensichtlich schwierig ist, den Aufbau solcher plattenartigen, bzw. für einen Kühlschrank schlussendlich kubischer, Elemente mit Vakuum-Spalt mittels Distanzhaltern sicher zu stellen, muss hier kurz erklärt werden, warum nicht einfach das als Kernmaterial für VIP bekannte, mikroporöse "fumed silica" als Platte z.B. zwischen die Stahlplatten eingebracht wird. Dieser scheinbar logische Ansatz scheitert schlicht und einfach am Preis. Der Preis von fumed silica Platten liegt im Moment (Mai 2010) auch bei sehr grossen Mengen (einige Millionen  $\text{m}^3$  pro Jahr) mindestens bei € 1900 / $\text{m}^3$ . Für einen genügend guten Dämmwert, der beispielsweise eine 40 % Verbesserung gegenüber einem A++ Kühlschrank

bringt, sind 30 mm Dicke des evakuierten Kernmaterials notwendig. Daraus ergibt sich, dass bei einem beispielsweise 560x560x1400 mm grossen Einbaukühlschrank die Kosten für das Kernmaterial alleine ca. € 200 betragen, was bei Weitem jeden Rahmen sprengt. Da die langjährige Beobachtung dieses Materials ergibt, dass sich diese Preise über die letzten 10 Jahre nicht wesentlich verändert haben, ist auch in den nächsten Jahren nicht mit einer substantziellen Preisreduktion zu rechnen.

Dies bedeutet, dass zur wirtschaftlichen Realisierung eines vakuumisolierten kubischen Kühlschranks die Aufgabe "Distanzhalter im Vakuum-Spalt" gelöst werden muss.

Strukturmechanische und thermische Berechnungen mit Distanzhaltern, welche so aufgebaut sind, dass die Druck- in Zugkräfte umgewandelt werden, haben ergeben, dass ein solcher Ansatz sehr viel versprechend ist. Fig. 14 zeigt ein derartiges Element, bei welchem

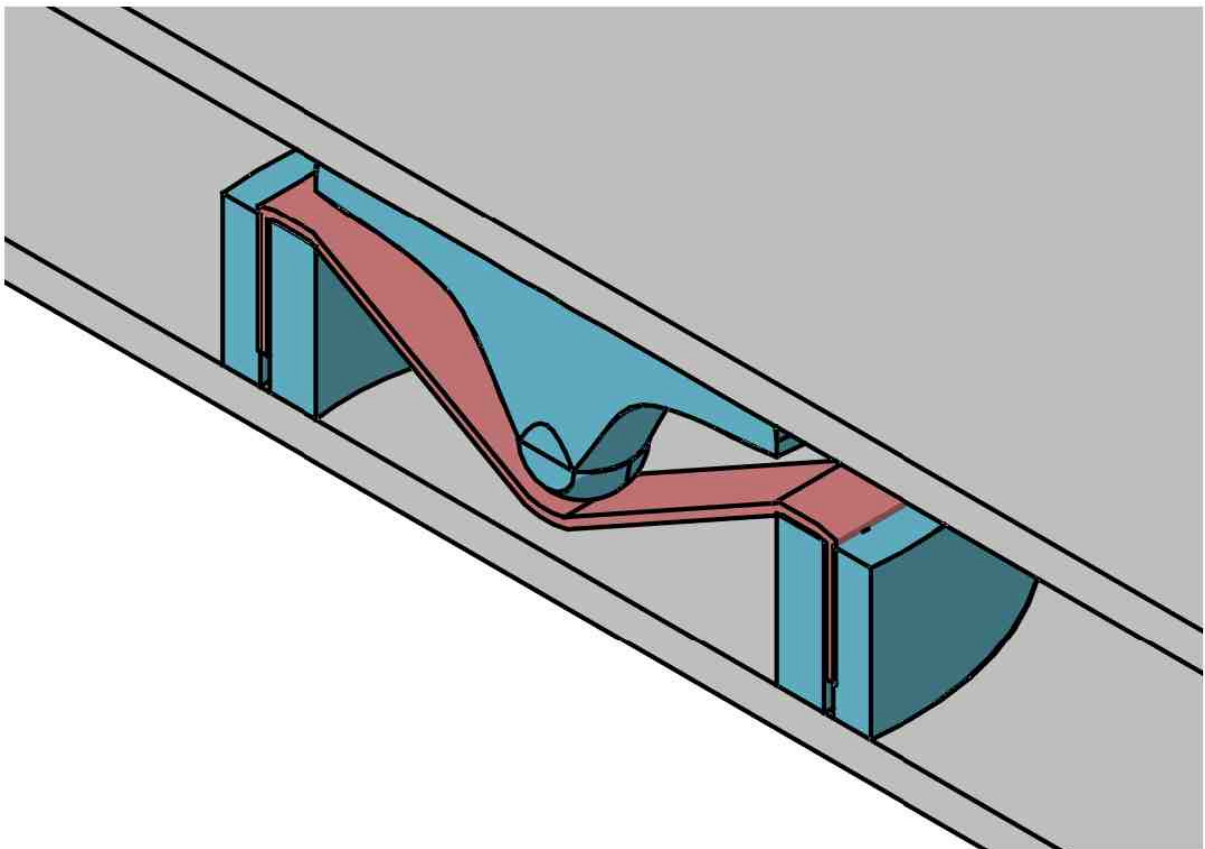


Fig. 14 Schnitt durch ein Distanzhalterelement bei welchem die Druckkräfte von einem Zugband übernommen werden

ein ringförmiges und ein stößelförmiges Bauteil die Druckkräfte zwischen den das Vakuum begrenzenden Platten auf ein nur auf Zug belastetes bandartiges, flexibles Element mit hoher Zugfestigkeit übertragen. Dass derartige Bauteile in hohem Masse unempfindlich gegen Querkräfte sind, ist offensichtlich.

Unsere Nachforschungen zeigen, dass geeignete bandartige Elemente in grossen Stückzahlen mit geringen Kosten am Markt erhältlich sind und laut Datenblatt Zugfestigkeiten in der Grössenordnung ca. 3500 N/mm<sup>2</sup> sowie eine geringe Wärmeleitfähigkeit von wenigen W/mK aufweisen.

Leider ist es im zeitlichen Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie noch nicht gelungen von den Herstellern entsprechender Zugbänder die notwendigen Muster zu erhalten und zu überprüfen, ob diese Werte auch bei der von uns vorgesehenen Bauart verifiziert werden können.

Geht man aber davon aus, diese Werte seien zutreffend, ergeben die durchgeführten analytischen und FEM-Berechnungen, dass auf diese Art Distanzhalter aufgebaut werden können, welche bei mindestens vierfacher mechanischer Sicherheit gegen Bruch in Summe einen "Kälteverlust" von  $0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$  erzeugen, wenn sie in 30 mm Abstand voneinander angeordnet werden.

Wie nicht anders zu erwarten, stellt bei derartig geringen Distanzhalterabständen die mechanische Stabilität einer doppelwandigen Leichtbaustruktur keinerlei Problem dar. Fig. 15 zeigt das Resultat einer strukturmekanischen FEM-Berechnung mit Stahlplatten von 0.5 mm Dicke, welche von Distanzhaltern in 30 mm Abstand gegeneinander abgestützt und mit  $0.1 \text{ N/mm}^2$ , d.h. mit Luftdruck, belastet sind. Die maximalen Durchbiegungen der Gesamtverformung liegen in der Größenordnung von wenigen 0.1 mm und auch das – hier nicht dargestellte - in vielen Fällen sehr kritische Eigenwertbeulen stellt kein Problem dar.

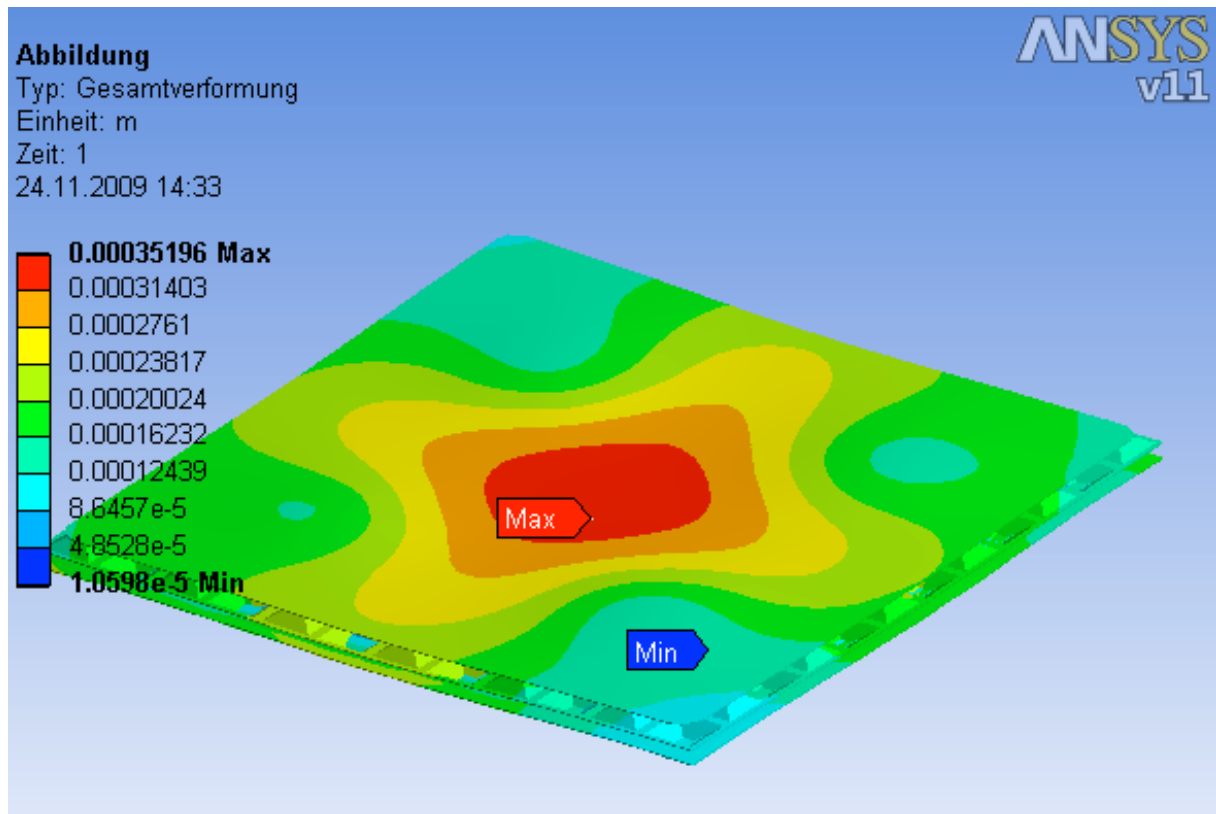


Fig. 15 Gesamtverformung zweier 0.5 mm dicker, mit Luftdruck belasteter Baustahlplatten, welche in 30 mm Abstand mit Distanzhaltern gegeneinander abgestützt sind.

Für die im Folgenden dargestellte Abschätzung der thermischen Leistungsverluste eines kubischen Kühlschranks mit den Aussenabmessungen  $560 \times 560 \times 1400 \text{ mm}$ , wurde vorsichtshalber davon ausgegangen die Zugfestigkeit des bandartigen Elementes sei nicht ca.  $3500 \text{ N/mm}^2$  sondern nur  $1400 \text{ N/mm}^2$ . Weiter wurden die Zugbänder so ausgelegt, dass sie eine Sicherheit gegen Bruch von 4 aufweisen.

Ausgehend von diesen Werten wurden – zur gegenseitigen Verifikation - sowohl mit analytischen als auch mit FEM-Modellen (Bsp. siehe Fig. 16) die "steady state" Leistungsverluste bei den durch die Norm vorgegebenen Temperaturen (innen  $5^\circ\text{C}$  und aussen  $25^\circ\text{C}$ ) durch die Isolation abgeschätzt.

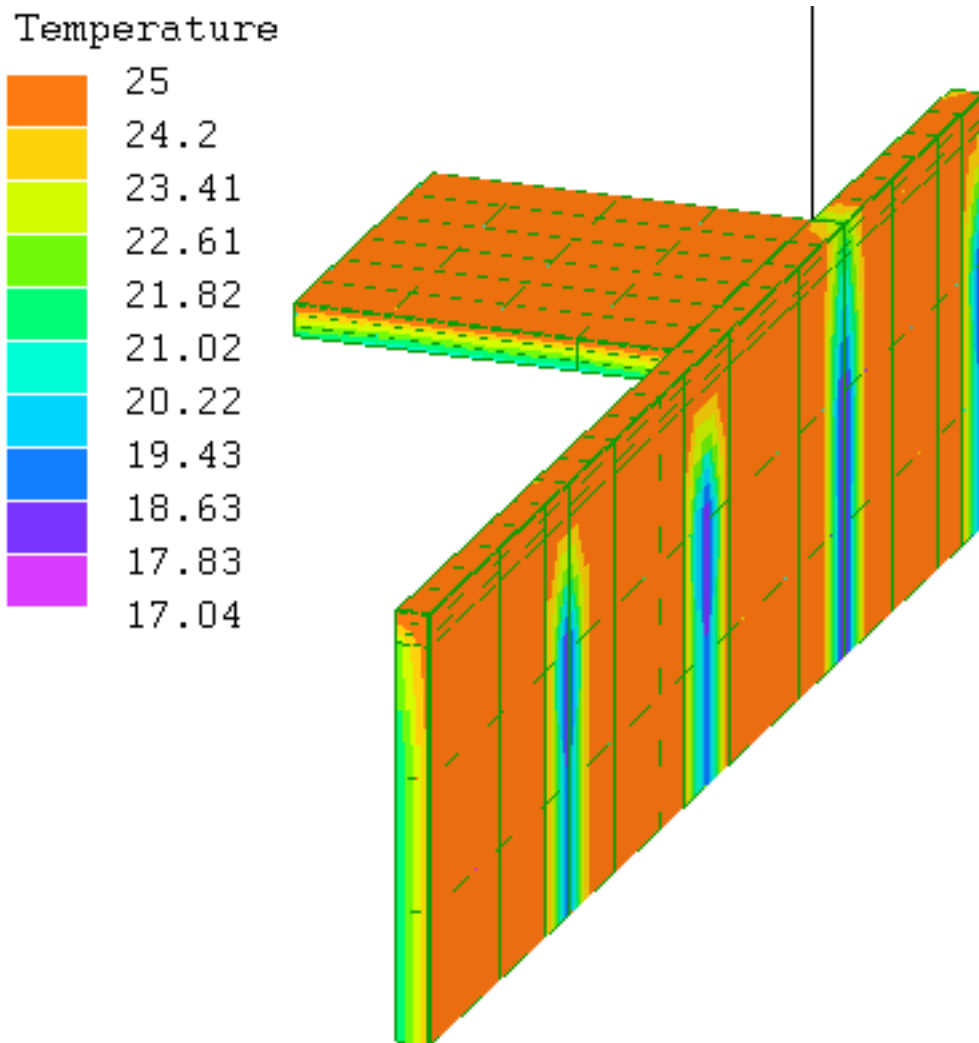


Fig. 16 Resultat der thermischen "steady state" FEM-Berechnung eines konventionell mit 48 mm PU-Schaum isolierten zur Vereinfachung abgewickelten und halbierten kubischen Kühlschranks.

Die Berechnungen wurden für vier verschiedenen Aufbau-Varianten durchgeführt. Zur Verifizierung der Modelle und als Vergleichsbasis wurde zunächst ein konventioneller Kühlschrank mit einer Isolation von 48 mm PU-Schaum (siehe Tabelle 1) modelliert.

Zum weiteren Vergleich wurde dann ein "VIP-Isolation" genannter kubischer Kühlschrank modelliert, bei dem angenommen wurde, er sei mit einem evakuierten, 30 mm dicken Kern aus "fumed silca", dem VIP-Kernmaterial, ausgerüstet, welcher von einer 0.1 mm dicken gasdichten Baustahlhülle umgeben ist, wobei die Randabschlüsse von einem 20 µm dicken Edelstahlband gebildet werden. (Dass ein solcher Aufbau aus Kostengründen eigentlich nicht in Frage kommt, ist weiter oben begründet.)

Weiter wurden zwei Varianten eines kubischen Kühlschranks mit Vakuum-Spalt und den oben besprochenen Spannelement-Distanzhaltern in 30 mm Abstand berechnet. Die beiden Varianten unterscheiden sich lediglich durch die Dicke der eingesetzten Randbänder aus Edelstahl.

Die Resultate dieser Berechnungen in Tabelle 4 zeigen, dass es möglich sein sollte auf die diskutierte Art kubische Kühlschränke mit Vakuum-Isolation zu bauen, deren spezifische Verlustleistung durch die Isolation nur noch 40 – 50 % heutiger A++ Kühlschränke beträgt und die darüber hinaus bei identischen Aussenabmessungen ein um ca. 40 % grösseres Nutzvolumen aufweisen.

Aufbau	$\Delta T$	Verlust Mittel A++ am Markt	Verlustleistung analytisch		Verlustleistung FEM		Verlust in % A++	Wand- stärke [mm]	Nutz- Volumen (Aussen- masse: 560x560 x1400 mm) [Liter]
	°C		W/ Liter	W/ m <sup>2</sup>	W/ Liter	W/ m <sup>2</sup>			
A++ => 48mm PU- Isolation	20	0.039	2.82	0.036	2.49	0.036	100%	52	257
VIP- Isolation 30mm, Baustahl- Hülle, Rand 20 $\mu$	20		1.91	0.021	1.89	0.027	69%	30.4	322
Vakuum, Spalt, Spann- elemente, Baustahl- Hülle, Rand 50 $\mu$	20		1.78	0.017	1.55	0.015	45%	16	369
Vakuum, Spalt, Spann- elemente, Baustahl- Hülle, Rand 20 $\mu$	20		1.47	0.014	1.36	0.013	37%	16	369

Tabelle 4 Resultate analytischer und FEM-Berechnungen kubischer Kühlschränke mit unterschiedlichen Isolationen

## 2. Zylindrischer Kühltank

Bei diesem Ansatz werden 2 konzentrisch umeinander rotierbare zylindrische Teile untersucht, welche je einen Vakuumschlitz zwischen Doppelwänden aufweisen und so gestaltet sind, dass sie sich in einem Winkelbereich von  $270^\circ$  überlagern und bei entsprechender Rotationslage einen Zugang von  $90^\circ$  zum Innern freigeben (siehe Fig. 17).

Der Vorteil der zylindrischen Bauweise ist, dass die Vakuumschichten in sich so stabil gestaltet werden können, dass keine Distanzhalter zwischen den Vakuumschichten notwendig sind. Nachteilig im Vergleich zum kubischen Aufbau ist selbstverständlich der Platzverlust durch die nicht benutzten Volumina in den Eckbereichen, die sich aber dank der dünnen Wände in etwa ausgleichen lassen.

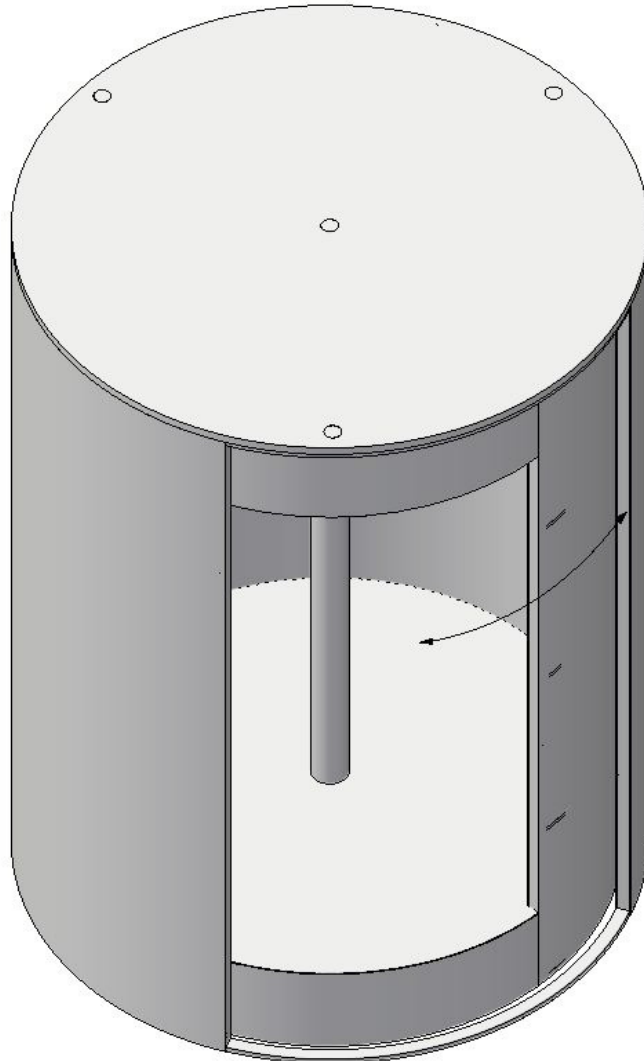


Fig. 17 Skizze eines zylindrischen, vakuumisolierten Kühltanks

Vor dem Bau eines entsprechenden Funktionsmodells wurden die minimal notwendigen Wandstärken und Dimensionen allfälliger Verstärkungsstrukturen mittels strukturmechanischen FEM-Berechnungen abgeklärt. Fig. 18 zeigt das Resultat einer solchen Berechnung. Die Berechnungen und der spätere Bau eines Funktionsmodells haben gezeigt, dass bei Einsatz einiger ringförmiger Verstärkungsstrukturen eine mittlere Wandstärke von ca. 0.25 mm für ein Funktionsmodell mit bis zu  $\varnothing 350$  mm genügend ist. Für einen zylindrischen Kühltank in "Sollgröße", d.h. mit Durchmesser 600 mm muss die mittlere Wandstärke auf ca. 0.5 mm gesteigert werden.

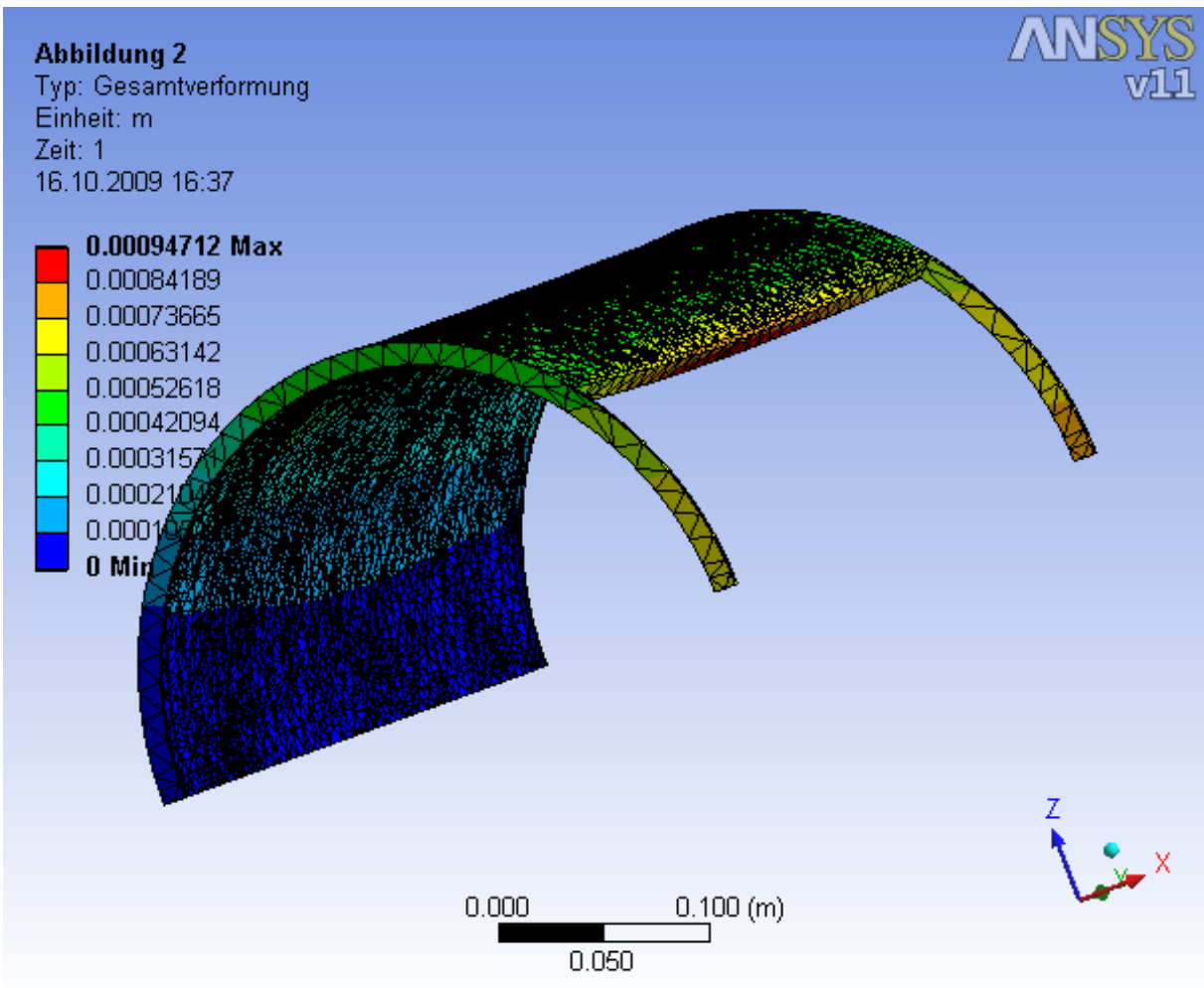


Fig. 18 Gesamtverformung eines zylindrischen Bauteils mit Vakuum-Spalt

Ein auf die geschilderte Bauart, bezogen auf übliche Kühlschranks-Abmessungen ca. im Massstab 1:2, realisiertes Funktionsmuster ist in Fig. 19 zu sehen.

Es weist einen äusseren Durchmesser  $\varnothing_a = 326$  mm, einen inneren "Nutzdurchmesser"  $\varnothing_i = 289$  mm und eine äussere Höhe  $H_a = 450$  mm und eine innere "Nutzhöhe"  $H_i = 350$  mm auf.

Die 0.5 mm dicken Wandbleche bestehen aus Edelstahl, der Vakuum-Spalt ist jeweils 12 mm dick und der Luftabstand zwischen innerem und äusserem Zylinder beträgt 5.5 mm.

Das innere der beiden röhrenartig ausgebildeten zylindrischen Elemente ist unten und oben mit einer je 50 mm dicken Isolationsschicht aus PU-Schaum abgeschlossen.



Fig. 19 Funktionsmuster eines mit Vakuum-Spalt isolierten zylindrischen Kühlschranks.

Für eine messtechnische Abschätzung der Leistungsverluste dieses Aufbaus wurden die inneren, zylindrischen Wände mit Folienheizungen belegt. Der Wirkungsgrad dieser Heizungen kann zu 100 % angenommen werden, weil sie rein ohmsche Elemente sind und weil alle elektrischen Zuleitungen im Innern des Aufbaus verlaufen. Die Leistungszufuhr zu dieser Heizungen wurde gemessen und so geregelt, dass eine gewünschte Temperaturdifferenz zu der den Aufbau umgebenden Lufttemperatur dauerhaft (steady state) eingehalten wurde. Die innere Temperatur des Aufbaus wurde dazu im Zentrum desselben gemessen. Um die Schwankungen der Lufttemperatur durch Luftzug zu minimieren wurde der Aufbau in ca. 1 m Abstand mit Paravent ähnlichen Elementen umstellt.

Gemessen wurde der Leistungsverlust bei  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$  (bzw.  $-20^\circ\text{C}$ , des für einen Kühlschrank umgekehrten Temperaturgradienten wegen) einmal an dem nicht evakuierten, d.h. nur mit stehender Luft isolierten Aufbau und an dem auf  $1 \cdot 10^{-6}$  mbar evakuierten Funktionsmuster. Zusätzlich wurde der Leistungsverlust des evakuierten Aufbaus bei  $\Delta T = 14^\circ\text{C}$  und  $25^\circ\text{C}$  bestimmt. In Tabelle 5 sind die Resultate dieser Messungen dargestellt.

Aufbau	$\Delta T$ °C	Messung W/m <sup>2</sup>	analytisch		FEM	
			W/m <sup>2</sup>	W/Liter	W/m <sup>2</sup>	W/Liter
Funktionsmuster nicht evakuiert, d.h. mit stehender Luft isoliert	-20	25.53	25.34	0.69	26.12	0.72
Funktionsmuster evakuiert  Ø320x450 mm Vakuum-Wände: Stahl hoch legiert, Boden+Decke: PU	-14	7.50	9.05	0.25	9.08	0.25
	-20	10.69	12.93	0.35	12.97	0.36
	-25	14.04	16.17	0.44		

Tabelle 5 Resultate der Leistungsverlust-Messungen am Funktionsmuster des zylindrischen Kühlschranks zusammen mit den mittels eines analytischen sowie eines FEM-Modells des Funktionsmusters berechneten Werten.

Auf der Basis dieser Messwerte wurden – zur gegenseitigen Verifikation - ein thermisches analytisches und ein FEM-Modell des Funktionsmusters erstellt. Die so berechneten Leistungsverluste finden sich ebenfalls in Tabelle 5. Die berechneten Leistungsverluste des evakuierten Aufbaus liegen ca. 20 % höher als die gemessenen Werte. Auf eine entsprechende Anpassung der mathematischen Modelle wurde verzichtet, weil sich damit deren Aussagen "auf der sicheren Seite" bewegen.

Die mit dem FEM-Modell berechneten, hier nicht dargestellten, Temperaturverteilungen konnten im Übrigen auch mit den Aufnahmen einer hochpräzisen Thermobildkamera bestätigt werden. Fig. 20 zeigt eine dieser Thermographien. Es ist deutlich sichtbar, dass die grössten Wärmeverluste entlang den Wänden beim Luftspalt zwischen den umeinander rotierbaren Zylindern auftreten, wobei festgehalten werden muss, dass die Temperaturwerte des Thermobildes in den Ecken (gelb) durch Spiegelungseffekte leicht überhöht sind. Weiter sind relativ hohe Wärmeverluste nach oben und unten (im Bild rechts und links) festzustellen, was sich damit erklären lässt, dass hier nur eine 50 mm dicke PU-Isolation vorhanden ist. Diese Resultate entsprechen den Erwartungen.

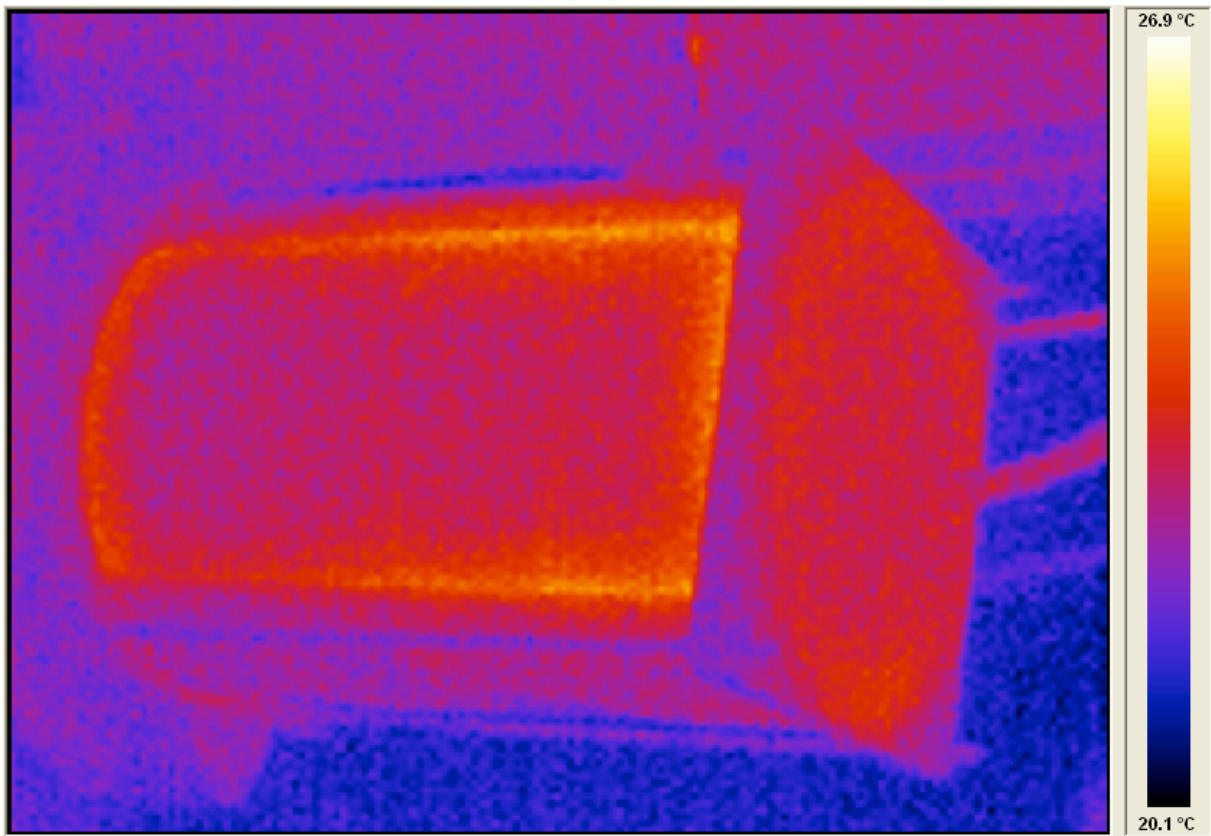


Fig. 20 Thermobild des (quer gelegten) Funktionsmusters eines zylindrischen Kühlschranks, der auf seiner Innenseite auf eine Temperaturdifferenz von 25 °C gegenüber der Umgebung aufgeheizt ist.

Es ist festzuhalten, dass der spezifische Leistungsverlust des evakuierten Funktionsmusters (0.35 W/Liter bei  $\Delta T=20\text{ °C}$ ) ca. um einen Faktor 9 höher liegt als bei einem A++ Kühlschrank (0.038 W/Liter bei  $\Delta T=20\text{ °C}$ ). Dies war von vornherein klar und erwartet, weil bei dem Funktionsmuster im Massstab 1:2 alle negativen Randeffekte weit überproportional in das Resultat eingehen.

Trotzdem ist deutlich zu erkennen, dass die Isolation mittels Vakuum-Spalt sehr gut ist, nimmt doch der Leistungsverlust von nicht evakuierten, d.h. nur mit stehender Luft isolierten, Funktionsmuster zum evakuierten Zustand von 25.53 auf 10.69, also um ca. 58 % ab.

Im Weiteren dienen die am Funktionsmuster gemessenen Werte aber nur der Verifikation der mathematischen Modelle, welche auf dieser Basis auf die "Sollgrösse" skaliert werden dürfen.

Mit den auf "Sollgrösse" ( $\varnothing a=580\text{ mm}$ ,  $H_a=1400\text{ mm}$ ) skalierten Modellen wurden analytisch und mittels FEM jeweils unterschiedliche Varianten berechnet und in Tabelle 6 dargestellt.

Als Vergleichsbasis wurden die Wärmeverluste eines rundum mit 2 x 15 mm sowie oben und mit 48 mm PU-Schaum isolierten zylindrischen Kühlschranks abgeschätzt.

Als Variante 1 wurde ein im Aufbau dem Funktionsmuster entsprechender, jedoch statt mit Wänden aus sehr teurem, hoch legiertem Edelstahl ( $\lambda=15\text{ W/mK}$ ) mit Wänden aus kostengünstigem Baustahl ( $\lambda=47\text{ W/mK}$ ) ausgestatteter, unten und oben je mit 100 mm PU-Schaum isolierter zylindrischer Kühlschrank berechnet.

Variante 2 entspricht der Variante 1, mit dem Unterschied, dass ein, allenfalls preislich noch tragbarer niedrig legierter Stahl ( $\lambda=21\text{ W/mK}$ ) als Vakuum-Wand betrachtet wurde.

Bei Variante 3 wurden bezüglich Variante 2 die PU-Isolation unten und oben durch einen eingesetzten Deckel mit Vakuum-Spalt ersetzt.

Variante 4 schliesslich entspricht der Variante 3, mit dem Unterschied, dass ein, preislich vermutlich nicht mehr tragbarer hoch legierter Stahl ( $\lambda=15$  W/mK) als Vakuum-Wand betrachtet wurde.

Aufbau	$\Delta T$ °C	Mittelwert A++		zylindrisch analytisch		zylindrisch FEM		% A++	Wand total mm	Nutz- vol. Liter
		W/m <sup>2</sup>	W/L	W/m <sup>2</sup>	W/L	W/m <sup>2</sup>	W/L			
A++ kubisch: 48 mm PU	20	2.82	0.039					100%	52	258
zylindrisch: rundum 2x15mm PU, Boden + Decke: 48 mm PU	20			3.36	0.032	2.99	0.029	82%	40.5	254
Variante 1: Vakuum-Wände: Baustahl, Boden + Decke: 80 mm PU	20			2.65	0.024	2.39	0.021	61%	15	285
Variante 2: Vakuum-Wände: Stahl niedrig legiert, Boden + Decke: 80 mm PU	20			2.20	0.020	2.21	0.020	51%	15	285
Variante 3: Vakuum-Wände: Stahl niedrig legiert, Boden + Decke: 2* Vakuum- Deckel	20			1.39	0.012	1.59	0.014	36%	15	283
Variante 4: Vakuum-Wände: Stahl hoch le- giert Boden + Decke: 2* Vakuum- Deckel	20			1.29	0.012	1.50	0.013	34%	15	283

Tabelle 6 Berechnete Leistungsverluste unterschiedlich isolierter zylindrischer Kühlschränke mit  $\varnothing_{\text{ausssen}}=580$  mm und  $H_{\text{ausssen}}=1400$  mm.

Hoch interessant ist bereits der, eigentlich nur zu Vergleichszwecken berechnete, zylindrische Kühlschrank, welcher nicht mit Vakuum sondern nur mit PU-Schaum isoliert ist, weist er doch im Vergleich zu einem mittleren kubischen A++ Kühlschrank mit den Aussenmassen 560x560x1400 mm bei ca. 20 % Leistungseinsparung ein gleich grosses Nutzvolumen (254 L statt 258 L) auf.

Dieses zunächst überraschende Resultat lässt sich bezüglich des Nutzvolumens einerseits durch die leicht kleinere und trotzdem gut isolierende Wandstärke (35 statt 48 mm) und andererseits dadurch erklären, dass man annehmen darf, die Aggregate können bei einem

zylindrischen Einbau-Kühlschrank in den vom Zylinder frei gelassenen Eckvolumina untergebracht werden.

Bezüglich der spezifischen Verlustleistung ist zu berücksichtigen, dass zusätzlich zu den 2 x 15 mm PU in ca.  $\frac{3}{4}$  des Umfangs eine 5 mm dicke Schicht mit stehender Luft vorhanden ist. Damit ist zunächst einmal klar, dass die Wirkung dieser auf  $\frac{3}{4}$  des Umfangs insgesamt 35 mm und auf ca.  $\frac{1}{4}$  des Umfangs nur 15 mm starken Isolation kleiner ist als diejenige einer total ca. 48 mm dicken Isolation eines konventionellen A++ Kühlschranks. Allerdings wird dies zu einem beträchtlichen Teil durch die deutlich kleineren Wärmeverluste über den Türspalt ausgeglichen. Insgesamt drückt sich dies so aus, dass der auf die Fläche bezogene Leistungsverlust des geschilderten, nur mit PU isolierten, zylindrischen Kühlschranks ca. um 20 % höher liegt als derjenige eines mittleren A++ Kühlschranks (3.36 statt 2.82 W/m<sup>2</sup>).

Dass die auf den Nutzinhalt bezogenen Verluste trotzdem um die angesprochenen 20 % kleiner sind (0.032 statt 0.039 W/L) als beim mittleren A++ Kühlschrank erklärt sich mit dem beim zylindrischen Aufbau deutlich besseren Verhältnis von innerer Kühlschrankfläche zu Nutzvolumen (9.6 statt 12.6).

Die mittels Vakuum-Spalt isolierten Varianten 1 bis 4 weisen alle ein ungefähr um 10 % grösseres Nutzvolumen als ein kubischer A++ Kühlschrank mit den Aussenmassen 560x560x1400 mm auf, so dass festgestellt werden kann, dass aus Nutzraum-Gründen sicher nichts gegen einen zylindrischen Aufbau spricht.

Bereits die, dank Verwendung von Baustahl und PU Abschlüssen oben und unten, sehr kostengünstig realisierbare Variante 1 verspricht ca. 39 % Einsparung an spezifischen Leistungsverlusten (0.024 statt 0.039 W/L).

Variante 2, bei der Baustahl durch einen niedrig legierten, preislich vermutlich noch im Rahmen liegenden Edelstahl ersetzt ist, erhöht die Einsparung an Leistungsverlust um weitere 10 % auf total 49 % (0.020 statt 0.039 W/L). Diese starke Auswirkung des Materialwechsels erklärt sich durch die grosse Differenz des Wärmeleitwertes (23 statt 45 W/mK) einerseits und andererseits durch den sehr stark von der Wärmeleitfähigkeit der Wände abhängigen Beitrag zur Verlustleistung durch die Wärmeleitung entlang des Spaltes zwischen den beiden Zylindern. Der in Variante 2 berechnete Aufbau entspricht weitgehend dem auf den Massstab 1:1 vergrösserten Funktionsmuster. Damit sollte sich die Reduktion der Leistungsverluste von nicht evakuiert zu evakuiert beim Funktionsmuster (= 58 %) einerseits und von PU-isoliert zu vakuumisolierter Variante 2 (= 51 %) in der gleichen Grössenordnung bewegen. Da sich die Differenz zwischen den beiden Werten 58 % und 51 % dadurch erklären lässt, dass beim berechneten, PU-isolierten Modell Kunststoffwände ( $\lambda = 0.25$  W/mK) statt Stahlwänden ( $\lambda = 15$  W/mK) berechnet wurden, bestätigt sich dies und darf als Verifikation der mathematischen Modelle begriffen werden.

Der Ersatz der PU-Abschlüsse oben und unten durch Deckel mit Vakuum-Spalt in Variante 3 und 4 bringt nochmals eine Einsparung an Verlustleistung um 15 % auf total 64 % Einsparung der Verlustleistung eines mittleren A++ Kühlschranks (0.014 statt 0.039 W/L). Dass der Wechsel von preiswertem niedrig legiertem Stahl zu teurem hoch legiertem Stahl keine grosse Verbesserung mehr bringt, erklärt sich mit den relativ ähnlichen Wärmeleitkoeffizienten (15 statt 23 W/mK) und macht deutlich, dass Bemühungen in diese Richtung nicht notwendig sind.

# Diskussion und Schlussfolgerungen

## Kaffeemaschine

### Diskussion

- Die Resultate Messung der Funktionsmuster-Serie 3 (HIH3) sind an sich schon sehr ermutigend, ist doch die Temperatur des Heizelementes nach 1.5 Stunden Abkühlen nicht wie bei der unisolierten Maschine auf Raumtemperatur abgesunken, sondern beträgt immer noch ca. 70 °C. Damit sind auch deutlich kürzere Aufheizzeiten auf die Betriebstemperatur von ca. 93°C verbunden, nach 1.5 h beträgt sie ca. 7 Sekunden statt wie heute 23 bis 25 Sekunden. Die daraus resultierende Energieeinsparung pro Aufheizevorgang beträgt damit ca. 10 Wh.
- Die mit dem – auch durch FEM-Berechnungen verifizierten – analytischen Modell berechneten Abkühlkurven stimmen sehr genau mit den gemessenen Kurven überein, womit auch den noch nicht durch Messungen verifizierten Berechnungen Vertrauen geschenkt werden darf. Diese zeigen, dass zum Beispiel einfach durch – mittels strukturmechanischen Berechnungen erlaubter - Reduktion der Wandstärken des isolierenden Stahlbauteils mit Vakuum-Spalt und durch weitere, in Grossserie nicht kostentreibende Massnahmen nochmals eine deutliche Verbesserung des thermischen Verhaltens möglich ist.

### Schlussfolgerungen, weiteres Vorgehen

- Ein Weiterziehen des Projektes „hocheffizient isolierte Kaffeemaschine“ auf der Basis eines Stahlbauteils mit Vakuum-Spalt ist lohnend.
- In einem nächsten Schritt muss zunächst das Heizelement der Kaffeemaschine so umkonstruiert werden, dass es in Grossserie kostengünstig mit einer doppelwandigen Stahlhülle mit Vakuum-Spalt versehen werden kann.
- Parallel hat die Auslegung der möglichst dünnwandigen, auf das Heizelement angepassten Stahl-Vakuum-Hülle so zu erfolgen, dass diese erstens in Grossserie kostengünstig hergestellt werden kann und zweitens möglichst wenig zusätzlichen Platz benötigt.
- Mit diesen Resultaten ist ein Prototyp einer entsprechenden Kaffeemaschine auszulegen.

## Kubischer Kühlschrank

### Diskussion

- Die prinzipiell plattenartigen Wände des Vakuum-Spaltes eines kubischen Kühlschranks müssen mittels Distanzhaltern gegeneinander abgestützt werden. Damit die Wärmeleitung über diese Distanzhalter nicht zu hoch wird, müssen diese, wenn sie als reine Druckelemente ausgelegt sind, derart schlank (dünn und lang) gestaltet werden, dass sie zwar in der Lage sind die Druckkräfte zu übernehmen, aber bei geringen – notabene beispielsweise beim Transport unvermeidlichen – Querkräften reihenweise brechen.
- Der Weg über eine derartige Umgestaltung der Distanzhalter, dass die Druckkräfte von reinen Zugelementen übernommen werden und damit auch Querbelastungen problemlos aufgenommen werden können ist unter Verwendung bandartiger Zugelemente prinzipiell möglich.
- Von den Festigkeits- und Wärmeleitfähigkeitswerten der entsprechenden Datenblätter ausgehende Berechnungen bestätigen dies. Leider ist es bis zum Abschluss dieser Arbeit

nicht gelungen entsprechende Muster für Testzwecke zu erhalten und diese Berechnungen zu bestätigen.

- Die thermischen Berechnungen zeigen, bei einem Gewinn an Nutzvolumen von ca. 40%, ein Potential zur Reduktion der spezifischen Verlustleistung von bis zu 60%.

Schlussfolgerungen, weiteres Vorgehen

- Das Weiterziehen des Projektes „hocheffizient isolierter kubischer Kühlschrank“ ist aus momentaner Sicht nur dann lohnend, wenn die in den Datenblättern angegebenen Werte der vorgesehenen Zuelemente bestätigt werden können.
- In einem nächsten Schritt muss deshalb zunächst dies geschehen. Dazu ist einerseits die Zugfestigkeit entsprechender Bänder bei Temperaturen bis 500°C zu bestimmen und andererseits muss bestätigt werden, dass Kriechen unter Last auf Dauer kein Problem ist.
- Wenn sich das in den Datenblättern ausgewiesene gute Verhalten bestätigen lässt, ist es lohnend in einem zweiten Schritt das Funktionsmuster eines entsprechenden Kühlschranks zu bauen.

## **Zylindrischer Kühlschrank**

Diskussion

- Die Messungen an dem im Massstab 1:2 gebauten Funktionsmuster und die thermischen Berechnungen mit den durch diese Messungen verifizierten mathematischen Modellen im Massstab 1:1 zeigen zusammen mit den durchgeführten strukturmechanischen Berechnungen, dass ein zylindrischer, mit Vakuum-Spalt isolierter Kühlschrank in Leichtbauweise machbar ist.
- Bereits eine sehr kostengünstige Variante deren aus Baustahl bestehenden rohrartigen Vakuum-Bauteile oben und unten mit ca. 50 mm PU isoliert sind, verspricht gegenüber einem mittleren A++ Kühlschrank, bei sicher nicht kleinerem Nutzraumangebot, eine Reduktion der Verlustleistung durch die Isolation um ca. 40 %.
- Ein Ersatz der PU-Isolation am oberen und unteren Ende durch Deckel mit Vakuum-Spalt und die Verwendung von preiswertem niedrig legiertem Edelstahl bringt theoretisch eine weitere Reduktion der Verlustleistung auf insgesamt mehr als 60%.

Schlussfolgerungen, weiteres Vorgehen

- Ein Weiterziehen des Projektes „hocheffizient isolierter zylindrischer Kühlschrank“ auf der Basis von Stahlbauteilen mit Vakuum-Spalt ist lohnend.
- In einem nächsten Schritt muss ein kühlbares Funktionsmuster im Massstab 1:1, also beispielsweise mit den Dimensionen  $\varnothing=600$  mm und  $H=1400$  mm hergestellt und ausgemessen werden.
- Hierfür ist zunächst die notwendige strukturmechanische Auslegung der Vakuum-Bauteile zu leisten, welche sicherstellen muss, dass die möglichst leichten Elemente dem Luftdruck und den beim Transport auftretenden Kräften standhalten.
- Schlussendlich muss zusätzlich zu den technischen Werten klar sein mit welchen, stark materialabhängigen Herstellkosten ein solcher Kühlschrank in Serie herstellbar wäre.