Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht, 30. Juni 2011

Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte Kaffeemaschinen

Auftraggeber:
Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:
Helbling Technik AG
Hubstrasse 24
CH-9500 Wil
www.helbling.ch

Autoren:
Hans Tischhauser, Helbling Technik AG, hans.tischhauser@helbling.ch
Gerhard Staufert, freier Mitarbeiter Helbling Technik AG, gs@galileo-ag.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter: Roland Brüniger
BFE-Vertrag Nr: SI/500552-01

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		6
1.	Vorbereitende Tätigkeiten	6
1.1	Patentrecherche und Analyse	6
1.2	Stand der Technik von Haushalts-Kaffeemaschinen	7
1.3	Lastenheft	8
2	Technologieverifikation	9
2.1	Alternativen zur Heisswasseraufbereitung mit Thermoblock	9
2.1.1	Alternativen zu Thermoblock	9
2.1.2	Diskussion der Alternativen zu Thermoblock	10
2.1.3	Alternativen zu Thermoblock bewerten	10
2.2	Alternative Isolationsarten	11
2.2.1	Betrachtete Varianten	11
2.2.1.1	Isolation mit PU-Schaum Halbschalen	11
2.2.1.2	Isolation mit Luftspalt	12
2.2.1.3	Isolation mit Vakuum-Spalt	12
2.2.2	Approbationsfähigkeit der Varianten prüfen	13
2.2.3	thermische Berechnungen (analytisch, FEM)	14
2.2.3.1	Berechnungen mit PU-Halbschalen	14
2.2.3.2	Berechnungen mit Luftspalt	15
2.2.3.3	Berechnungen mit Vakuum-Isolation	18
2.2.4	Testmuster entwickeln, bauen, testen	21
2.2.4.1	Testmuster mit PU-Halbschalen	21
2.2.4.2	Testmuster mit Luftspalt	21
2.2.4.3	Testmuster mit Vakuum-Isolation	23
2.2.5	Alternativen im Sinne von Kosten-/Nutzen-Analyse bewerten	24
2.2.6	Vergleich TopTen und Energie-Etikette	28
2.3	Überlegungen zur Fertigung und den Kosten der Vakuum-Isolation	31
2.3.1	Fertigungsabklärungen Gesamt- Kaffeemaschine	31
2.3.2	Fertigungstechnologien Vakuum-Isolation	32
2.3.3	Abschätzung der Herstellkosten	33
2.3.4	Abschätzung der Energieeinsparung und der grauen Energie	33
3	Funktionsmuster	35
3.1	Varianten	35
3.2	Funktionsmuster bauen	36
3.2.1	Funktionsmuster mit Vakuum-Rohr	36
3.2.1	Funktionsmuster mit Dewar	37
3.3	Funktionsmuster testen	39
3.3.1	Funktionsmuster mit Vakuum-Rohr	39
3.3.2	Funktionsmuster mit Dewar	41
Diskussion und Schlussfolgerungen		42
Ausblick		43

Zusammenfassung

Mit Hilfe des Standes der Technik von Kaffeemaschinen und deren Heisswasser-Aufbereitung wurden Zielsetzungen für die thermische Isolation von Haushalts-Kaffeemaschinen erarbeitet. Das thermische Verhalten, die Geometrieanforderungen und die geschätzten Kosten unterschiedlicher Isolationsarten wurden mit Berechnungen, Testmustern und für die zwei Vakuum-Isolationsarten "Vakuum-Rohr" und "Dewar" mit Funktionsmustern ermittelt und anhand der Zielsetzungen bewertet. Es zeigt sich, dass im Sinne einer konventionellen Isolation eine 10 mm starke PU-Doppelschale in der Bewertung gut abschneidet, während die Idee einer Isolation mit Luftspalt sich als unvorteilhaft erweist. Bei starker Gewichtung der Energieeinsparung durch Isolation schneiden die Isolationsvarianten mit Vakuum deutlich besser ab als die konventionelle Variante. Obwohl das realisierte Funktionsmuster des Vakuum-Rohrs den Anforderungen noch nicht genügt, wird aufgrund von Berechnungen und erarbeiteten Fertigungsansätzen davon ausgegangen, dass die Isolations-Variante mit optimiertem Vakuum-Rohr bezüglich einer Kosten-Nutzen Betrachtung am besten ist.

Abstract

Based on the state of the art of the coffee machines and their water heating systems, some goals for the thermal insulation of the household coffee machines have been defined.

The thermal behavior, the geometrical requirements, as well as the expected costs have been estimated for different insulation types by means of calculations and test setups. An experimental prototype has been elaborated for two vacuum-insulation systems in particular: the vacuum-tube and the Dewar, in order to evaluate them according to the defined goals.

The evaluation results show that the conventional insulation with a 10 mm-thick PU double-envelope performs well, while the insulation with only an air gap proves rather disadvantageous. With a strong weighting on the energy saving with the insulation, the vacuum insulation methods perform much better than the conventional one. Although the elaborated experimental prototype of the vacuum-tube doesn't yet fulfill the requirements, it has been demonstrated that the insulation alternative with an optimized vacuum tube is the best solution according to a Cost-Benefit Analysis based on calculations and on the manufacturability.

Résumé

A l'aide de l'état de l'art des machines à café et leur système de chauffage d'eau, des objectifs ont été définis pour l'isolation thermique des machines à café domestiques.

Différents systèmes d'isolation ont été étudiés. Leur comportement thermique, leurs exigences géométriques, ainsi que leurs coûts ont été calculées et testés. Un prototype expérimental a été construit et évalué pour deux systèmes en particulier, le tube sous vide et le Dewar.

Il s'est avéré qu'une isolation conventionnelle avec une double-enveloppe de 10 mm de PU donne de très bons résultats lors de l'évaluation alors qu'une isolation avec seulement une couche d'air serait plutôt désavantageuse. Dans le cas d'une forte pondération sur l'économie d'énergie grâce à l'isolation, les méthodes d'isolation à vide donnent de meilleurs résultats que la méthode conventionnelle. Bien que le prototype expérimental du tube sous vide n'a pas répondu aux exigences, il s'est avéré qu'une variante d'isolation avec un tube sous vide optimisé serait la meilleure solution compte tenu d'une Analyse Coût-Bénéfice se basant sur les calculs et la fabricabilité.

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 Kaffeemaschinen folgende Zusammenfassung gemacht werden:

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 langsameres 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.

Damit ist die prinzipielle Machbarkeit der folgenden Zielsetzungen nachgewiesen:

- Komfortgewinn durch kurze Wartezeit bis zur Bereitschaft, d.h. durch eine kurze Aufheizzeit nach einer längeren Abkühlperiode.
- Drastische Reduktion der benötigten Standby Energie, bzw. "Null Standby-Energie"
- Namhafte Reduktion der mittleren Energie pro Tasse Kaffee

Bei der in der Machbarkeitsstudie untersuchten Methode zur Heisswasseraufbereitung handelt es sich um die Erhitzung des Wassers mittels eines Thermoblocks, d.h. mittels eines Erhitzers mit relativ grosser thermischer Masse. Da seit einiger Zeit die eine deutlich kleinere thermische Masse aufweisenden Durchlauferhitzer vermehrt zum Einsatz kommen, muss untersucht werden, ob bei derartigen Geräten mittels thermischer Isolation ebenfalls substanzielle Verbesserungen möglich sind.

Zusätzlich zeigen die Resultate der genannten Machbarkeitsstudie, dass beispielsweise mit einer, wesentlich einfacher herstellbaren, 10 mm dicken Isolationsschicht aus PU-Schaum deutlich reduzierte Wartezeiten sowie Energieeinsparungen in der Grössenordnung von 20% realisiert werden können. Dies bedeutet, dass vertieft untersucht werden soll, ob nicht eine sehr preiswert realisierbare Isolation mittels stehender Luft im ökologisch-wirtschaftlichen Sinne gegenüber der eher aufwändigen Isolation mit Vakuum zu bevorzugen wäre.

Ziel der Arbeit

1. Erstellung und Untersuchung von Funktionsmustern einer Heisswasseraufbereitung mit hocheffizienter Isolation für Kaffeemaschinen.
   1.1. Prüfung von Alternativen zum Thermoblock und allfälliger Einsatz derselben
   1.2. Ausarbeitung und Prüfung von Alternativen zur Isolation mittels Stahlbauteil mit Vakuumspalt und allfälliger Einsatz derselben
2. Aufzeigen der Vorteile zu bestehenden Technologien
3. Aufzeigen möglicher Verfahren für eine Serien-Herstellung von Kaffeemaschinen mit isolierter Heisswasseraufbereitung
4. Abschätzung der Kosten für eine Serien-Herstellung von Kaffeemaschinen mit isolierter Heisswasseraufbereitung
5. Erarbeitung der Energiekostenrechnung (effektive und graue Energie) für Kaffeemaschinen mit isolierter Heisswasseraufbereitung

Erwartete Ergebnisse:

1. Entscheidungsgrundlagen bezüglich des prinzipiellen Einsatzes hocheffizienter Isolation für Kaffeemaschinen
2. Entscheidungsgrundlagen bezüglich des Typs von hocheffizienter Isolation in Abhängigkeit von der Art der Heisswasseraufbereitung

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

1. Vorbereitende Tätigkeiten

1.1 Patentrecherche und Analyse

Mit diesem Teil der Arbeit sollte sichergestellt werden, dass einer thermischen Isolation des Wassererhitzers einer Kaffeemaschine aus patentrechtlicher Sicht prinzipiell nichts entgegensteht.

Eine ausführliche Recherche auf "worldwide.espacenet.com" in der Klasse A47J31 (apparatus for making beverages) und dem Stichwort "insul*" ergab insgesamt 585 allenfalls relevante Patente, von denen nach kurzer Durchsicht ca. 50 als relevant zur genaueren Analyse ausgewählt wurden.

Eine grosse Zahl der betrachteten Patente beschreibt die thermische Isolation von Heisswasser-Behältern.

Insbesondere finden sich bezüglich vakuumisolierten Komponenten von Maschinen zur Erzeugung von Getränken total knapp 20 Patente, die sich allesamt auf die Isolation von unterschiedlichen Wasser- oder Getränkebehältern beziehen, die entweder beheizt oder unbeheizt sind und die entweder als Kannen für sich alleine stehen oder Teil von Kaffeemaschinen sind.
Für die Fragestellung dieser Arbeit, der thermischen Isolation des Wassererhitzers (Thermoblock oder Durchlauferhitzer), sind alle diese Patente irrelevant.

Bezüglich der thermischen Isolation des Wassererhitzers wurde 1927 in GB289689A ein thermisch gut isolierter "water heater" einer Kaffeemaschine beschrieben, der als Vorläufer heutiger Durchlauferhitzer und Thermoblöcke gelten kann.
Ein weiteres Patent von 1977 GB1466866A beschreibt bezüglich Isolation prinzipiell dasselbe, wobei der "water heater" den heute verwendeten Komponenten wesentlich ähnlicher ist.
Da die beiden genannten Patente seit langem abgelaufen sind, beschreiben sie einen allgemein zugänglichen, minimalen Stand der Technik. Damit ist die thermische Isolation von Durchlauferhitzern und von Thermoblöcken an sich nicht mehr patentierbar, aus patentrechtlicher Sicht aber auch frei verwendbar. Patentierbar sind allenfalls spezifische Ausführungsformen der thermischen Isolation von Wasser-Erhitzern für Maschinen zur Erzeugung von Getränken.

1.2 Stand der Technik von Haushalts-Kaffeemaschinen.

Eine thermische Isolation von Kaffeemaschinen ist sinnvoll zur Erhöhung der Energieeffizienz. Wir begrenzen uns deshalb zur generellen Betrachtung des Standes der Technik auf eben diesen Parameter.

Eine zuverlässige Quelle hierfür ist die Webpage "TopTen.ch", weil die dort ausgewiesenen Energiewerte nach einem klar geregelten und leicht nachvollziehbaren Vorgehen gemessen werden müssen (siehe "Measuring Method and Calculation Formula for the Electricity Consumption of Coffee Machines for Household Use") und periodisch dem neusten Stand der Technik angepasst werden.

In der am 21.10.2010 aktualisierten TopTen Liste von Portionen-Kaffeemaschinen für den Haushalt finden sich 17 unterschiedliche Modelle.

	Beste (nicht Espressofähig)	Beste (Espresso - fähig)	Referenzmodel HIH1 (Espressofähig)	Schlechteste (Espressofähig)
Pumpendruck bar	3.3	22	15	20
Kaufpreis CHF	249	299	229	129
Stromkost. CHF/10a	60	67	84	134
Energie kWh/a	30	34	42	67
Standby Watt	0.07	0.05	0.4	0
Verzöger'zeit vor Auto-Off min	0	1	20	15

Tab. 1: Auszug aus TopTen.ch vom 21.10.10 für Portionen-Kaffeemaschinen

Die für uns interessanten Extremwerte, sowie die Werte der von uns im vorgängigen Projekt HIH1 "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten" verwendeten Referenzmaschine finden sich in der obigen Tab. 1.
Bezüglich des Energieverbrauchs ist unser Referenzmodell an 9ter Stelle, also exakt in der Mitte des Feldes platziert. Am Rande zu bemerken ist hier, dass die von der Referenzmaschine zur Erhöhung des Nutzer-Komforts eingehaltene lange Verzögerungszeit von 20 min vor dem Auto-Off ca. 5.5 kWh/a Energie pro Jahr "kostet".

Für Vollautomaten-Kaffeemaschinen ist der entsprechende Auszug aus der insgesamt ebenfalls 17 Maschinen umfassenden TopTen Liste aus Tab. 2 ersichtlich.

	Beste (Espressofähig)	Mitte (Espressofähig)	Schlechteste (Espressofähig)
Kaufpreis CHF	1500	892	1390
Stromkost. CHF/10a	82	102	131
Energie kWh/a	41	51	66
Standby Watt	0	0.7	0
Verzöger'zeit vor Auto-Off min	0.5	2	2

Tab. 2: Auszug aus TopTen.ch (21.10.10) für Vollautomaten-Kaffeemaschinen

Insgesamt kann festgehalten werden, dass heute Kaffeemaschinen gebaut werden, welche mit einem Energieverbrauch von mindestens 30 kWh pro Jahr auskommen. Allerdings ist dabei einschränkend zu sagen, dass eine sehr kleine Verzögerungszeit vor der automatischen Abschaltung oftmals eine Einbusse an Benützungs-Komfort im Sinne von längeren Wartezeiten bis zur Betriebsbereitschaft mit sich bringt.
Dieser Nachteil lässt sich, wie in unserer vorgängigen Arbeit (siehe Ausgangslage) bewiesen, durch thermische Isolation der Wassererhitzer der Kaffeemaschine weitgehend vermeiden.

1.3 Lastenheft

Da die wichtigste Zielsetzung ist, bezüglich Energieverbrauch und Kosten die beste espressofähige Maschine anbieten zu können, lässt sich aus dem zitierten Stand der Technik für das laufende Projekt "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte – Kaffeemaschine" folgendes in Tab. 3 dargestellte Lastenheft ableiten:

Zielsetzung	Minimal	Mittel	Gross	Maximal
dank Isolation erreichte Reduktion des Jahresverbrauchs auf [kWh/a]	≤ 32	≤ 30	≤ 28	≤ 26
bezüglich Referenzmodel HIH1 (Dolce Gusto KP2106) einzusparen [kWh/a]	≥ 10 (= 24%)	≥ 12 (= 29%)	≥ 14 (= 33%)	≥ 16 (= 38%)
Zulässige Durchmesserzunahme des Wassererhitzers durch Isolation [mm]	20	20	20	20
Zulässige Höhenzunahme des Wassererhitzers durch Isolation [mm]	20	30	40	50
Zulässige zusätzliche Herstellkosten für die Isolation [CHF]	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 3.0

Tab. 3: Lastenheft für die thermische Isolation einer Kaffeemaschine

2 Technologieverifikation

2.1 Alternativen zur Heisswasseraufbereitung mit einem Thermoblock

Aufgabenstellung dieser Arbeit ist die hocheffiziente thermische Isolation von Kaffeemaschinen zur Reduktion des Energieverbrauchs derselben.
Die Betrachtung alternativer Methoden zur Heisswasseraufbereitung mit einem Thermoblock - wie in unserem Referenzmodell der Vorgängerarbeit angewendet - beschränkt sich deshalb darauf abzuklären, ob alternative Methoden existieren, welche allenfalls die energetische Verbesserung durch thermische Isolation irrelevant machen und ob diese Methoden in naher Zukunft den Einsatz von Thermoblöcken mit grosser Wahrscheinlichkeit weitgehend reduzieren werden.

2.1.1 Alternativen zu Thermoblock

Die langjährige Markt- und Technik-Beobachtung der innerhalb von Helbling Technik im Bereich Kaffeemaschinen tätigen Gruppen lässt es als wahrscheinlich erscheinen, dass sich die Auswahl an Alternativen zum Thermoblock im Wesentlichen auf Durchlauferhitzer und boilerartige Aufbauten (beheizte Wasserbehälter) beschränkt.
Mit einer ausführlichen Patent-Recherche sollte diese begründete Vermutung verifiziert werden.

Die Recherche auf "worldwide.espacenet.com" in der Klasse A47J31 (apparatus for making beverages) und dem Stichwort "heat*" ergab im Zeitraum von 2005 bis Oktober 2010 1118 allenfalls relevante Patente.

150 derselben mit Prioritätsdaten von 2004 bis 2009 wurden nach kurzer Durchsicht zur näheren Betrachtung ausgewählt: Es ergab sich folgendes in Tab. 4 dargestellte Bild:

Art des Wassererhitzers	Anzahl Patente	Bemerkungen
Durchlauferhitzer	31	Einer mit Induktionsheizung, die anderen mit Widerstandsheizung
Boiler	34	Alle mit Widerstandsheizung Bezeichnungen in den Patenten: Boiler, vessel, reservoir, tank
Thermoblock	5	Alle mit Widerstandsheizung
Andere relevante	3	- beheizte Kammer einer Pumpe - transformatorähnliche Heizung - Heizplatte
Total	73	Die restlichen 77 betrachteten Patente sind nicht relevant

Tab. 4: In 150 Patenten aufgefundene Arten von Wassererhitzern

Eine zusätzliche Recherche auf "worldwide.espacenet.com" in der Klasse F24H1 (Water heaters...) und dem Stichwort "heat*" ergab im Zeitraum von 2005 bis Oktober 2010 1640 allenfalls relevante Patente. 150 derselben mit Prioritätsdaten von 2001 bis 2009 wurden näher betrachtet mit dem Zweck allfällig relevante weitere Methoden zur Erhitzung von Wasser aufzufinden. Gefunden wurden folgende weitere Methoden:

- Elektrochemische Heizung
- Elektrolyse Heizung
- Elektro-Magnetischer Rotor
- Flüssig-Widerstands Heizung mit Wärmetauscher

- Mehrfach Spirale mit Dünnfilm Widerstandsheizung
- Mikrowellen Heizung
- Nanotube+Mikrowelle

Da uns keine der anderen aufgezählten Methoden in Anwendung für Kaffeemaschinen bekannt ist und da solche Anwendungen auch nicht mit Internet-Suche aufgefunden werden konnten, bestätigt die durchgeführte Patent-Recherche und Analyse, dass sich die heute - und für die nächsten Generationen - relevanten Methoden zur Wassererhitzung in Kaffeemaschinen im Wesentlichen auf die bekannten Methoden Thermoblock, Durchlauferhitzer und Boiler beschränken.

2.1.2 Diskussion der Alternativen zu Thermoblock im Hinblick auf thermische Isolation

Boilerartige Anordnungen besitzen eine grosse gespeicherte Heisswassermenge mit einer ausserordentlich grossen thermischen Masse (= spezifische Wärmekapazität * Masse), womit klar ist, dass gerade bei derartigen Anordnungen eine hocheffiziente thermische Isolation sinnvoll ist.

Der Übergang der betrachteten Durchlauferhitzer zum Thermoblock ist fliessend. D.h. bei den meisten der geschilderten Durchlauferhitzer werden erhebliche thermische Massen aufgeheizt, so dass auch hier eine thermische Isolation sinnvoll wäre. Dies bestätigt sich auch durch die Tatsache, dass bei der Recherche nach thermischer Isolation in Kaffeemaschinen (siehe Punkt 1.1) mindestens 3 Patente aufgefunden wurden, bei welchen von isolierten Durchlauferhitzern die Rede ist.
Der ideale, keine thermische Isolation benötigende Durchlauferhitzer wäre zweifellos einer mit extrem geringer thermischer Masse, der aber so nicht existiert.
Dem scheint - von den aufgefundenen Anordnungen - der Durchlauferhitzer mit Induktionsheizung am nächsten zu kommen, bei welchem eine dünne Wassersäule durch ein induktiv angeregtes, sehr dünnwandiges Rohr beheizt wird. Eine Anwendung dieser Anordnung ist aber nicht bekannt.

Ein wichtiger Nachteil von Durchlauferhitzern ist, neben der erhöhten Verkalkung, die Tatsache, dass zum Erreichen einer zum Thermoblock vergleichbaren thermischen Stabilität (konstante Brüh-Wassertemperatur von der ersten bis zur x-ten Tasse) erheblich grössere regeltechnische Aufwendungen, verbunden mit deutlich mehr und teurer Sensorik, notwendig sind. Zusätzlich wird bei einigen der in den Patenten geschilderten Durchlauferhitzern das kalte Wasser zwischen Durchlauferhitzer und Brühkopf mit aufwändigen Ventilsteuerungen und Rückführschläuchen so lange vor den Durchlauferhitzer zurückgeführt, bis die gewünschte Brühwassertemperatur erreicht ist.
Aus diesen Gründen ist davon auszugehen, dass - zumindest in einigen der kommenden Generationen - der Thermoblock nicht vollständig von Durchlauferhitzern verdrängt wird.

In Summe bedeuten die obigen Feststellungen, dass das Auffinden von preiswerten Möglichkeiten zur hocheffizienten thermischen Isolation von Kaffeemaschinen auf jeden Fall Sinn macht.

2.1.3 Alternativen zu Thermoblock bewerten

Bei allen Anordnungen ausser bei wenigen Durchlauferhitzern macht eine thermische Isolation Sinn zur Verkürzung von Aufheizzeiten nach Stillstand und zur Reduktion der benötigten Energie.
Der Thermoblock wird von keiner der beiden anderen gängigen Alternativen in nächster Zeit vollständig verdrängt werden.

Da Resultate, die für die hocheffiziente Isolation eines Thermoblocks erarbeitet werden können, ohne grossen Aufwand auf Boiler und Durchlauferhitzer übertragen werden dürfen, macht es Sinn, dass wir uns im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf den Thermoblock beschränken.

2.2 Alternative Isolationsarten

2.2.1 Betrachtete Varianten

Näher betrachtet wurden die Isolation mit Vakuum-Spalt in Form eines Vakuum-Rohrs und eines Vakuum-Dewars, die Isolation mit 2 PU-Halbschalen und die Isolation mittels Luftspalt. Auf der Basis der Ergebnisse der Vorgängerarbeit wurde auf eine Berücksichtigung der Möglichkeit zur Isolation mit einem VIP-artigen Aufbau (VIP-Rohr oder VIP-Becher) verzichtet, begründet dadurch, dass sich das Kosten-Nutzen Verhältnis dieser Variante als zu schlecht erwiesen hat und sich an den zugrunde gelegten, sehr hohen Preisen der VIP-Kernmaterialien und -Hüllen in der Zwischenzeit nichts wesentliches geändert hat.

2.2.1.1 Isolation mit PU-Schaum Halbschalen

Als eine der Alternativen zur Isolation mit Vakuum wurde die in Fig. 1 skizzierte Isolation mit zwei in ihrer inneren Form dem Thermoblock angepassten Halbschalen aus PU-Schaum betrachtet.

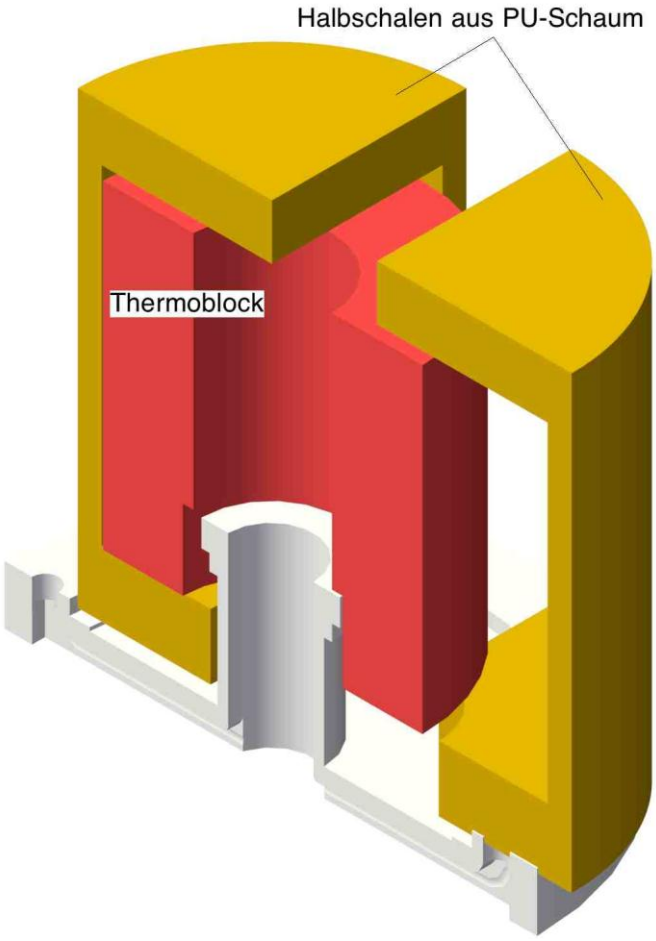

Fig. 1 Prinzipskizze der Isolation mit 2 Halbschalen aus PU-Schaum

2.2.1.2 Isolation mit Luftspalt

Als tendenziell kostengünstige Variante wurde zusätzlich die bezüglich der thermischen Isolation auf den ersten Blick theoretisch zu PU-Schaum gleichwertige Variante eines reinen Luftspaltes mit rohrartig geformter Aluminium-Folie zur Strahlungsminderung betrachtet, wobei der Durchmessers des Rohres aus Aluminiumfolie ca. 15 bis 20 mm grösser ist als derjenige des Thermoblocks. Fig. 2 zeigt die entsprechende Prinzipskizze.

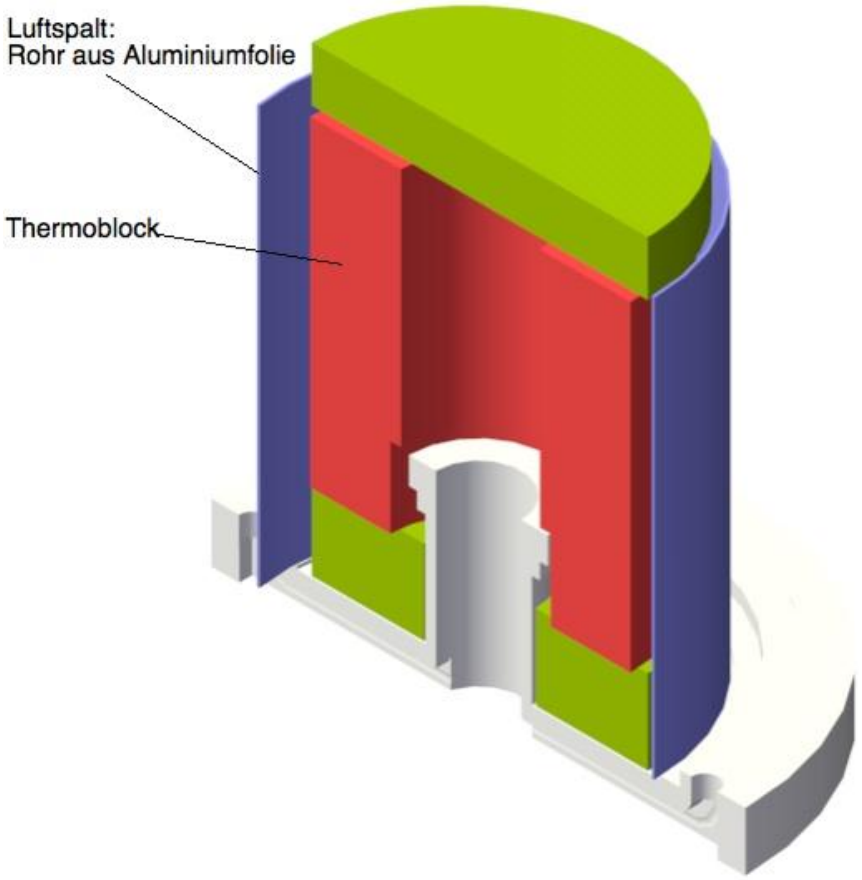

Fig. 2 Prinzipskizze einer Isolation mit Luftspalt und Aluminiumfolie

2.2.1.3 Isolation mit Vakuum-Spalt

Zunächst muss klar gestellt werden, dass in dieser Arbeit der Begriff "Vakuum-Isolation" immer eine Isolation mit Vakuumspalt bedeutet, wobei sich in diesem Spalt keinerlei Kernmaterialien oder Distanzhalter und dergleichen befinden. Damit eine genügend kleine Wärmeleitfähigkeit im Spalt erhalten bleibt, darf der Restdruck der im Vakuumspalt noch vorhandenen Luftmoleküle einen Wert von 10^{-3} mbar nicht überschreiten. Zum Erreichen einer Langzeit-Stabilität der Isolationsfähigkeit erfordert dies eine hohe Dichtigkeit der Wandungen des Vakuumspalts. Diese Dichtigkeit kann wirtschaftlich nur mit Glas oder Metallen wie Stahl bzw. Aluminium erreicht werden. In dieser Arbeit ist ausschliesslich von Wänden aus Edelstahl die Rede.

In der mehrfach erwähnten Vorgänger-Arbeit wurden als Vakuum-Isolations-Varianten derartige mit Dewar-artigen Vakuum-Bauteilen (Fig. 3a) betrachtet. Derartige Bauteile erzielen hervorragende Isolationseigenschaften. Weil ihr Inneres - und damit ein eingebauter Thermoblock - aber nur einseitig zugänglich ist, haben sie den Nachteil, dass der konstruktive

und montagetechnische Aufwand zu ihrem Einsatz in Kaffeemaschinen relativ hoch ist und die resultierenden Konstruktionen sich relativ stark von den heutigen unterscheiden müssen.
Um diese Nachteile zu vermeiden wurde in der vorliegenden Arbeit die Alternative eines rohrartigen Vakuum-Bauteils untersucht, das oben und unten mit einem 10 bis 20 mm dicken PU-Stopfen verschlossen ist. Da in einem solchen Aufbau die Leitungen zum Thermoblock ohne Zusatzaufwand zweiseitig durch die PU-Stopfen geführt werden können, kann ein solcher rohrartiger Aufbau ohne starke Änderung der heutigen Gesamtkonstruktion einer Kaffeemaschine dem Thermoblock übergestülpt werden. Fig. 3b zeigt die Prinzipskizze eines derartigen Aufbaus.

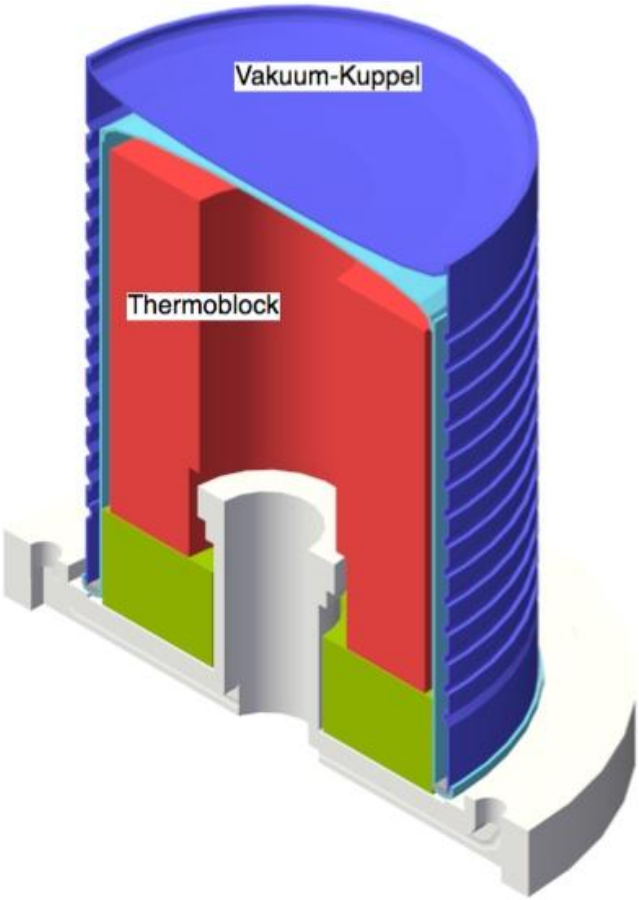

Fig. 3a Prinzipskizze einer Vakuum-Isolation mit Dewar-artigem Aufbau

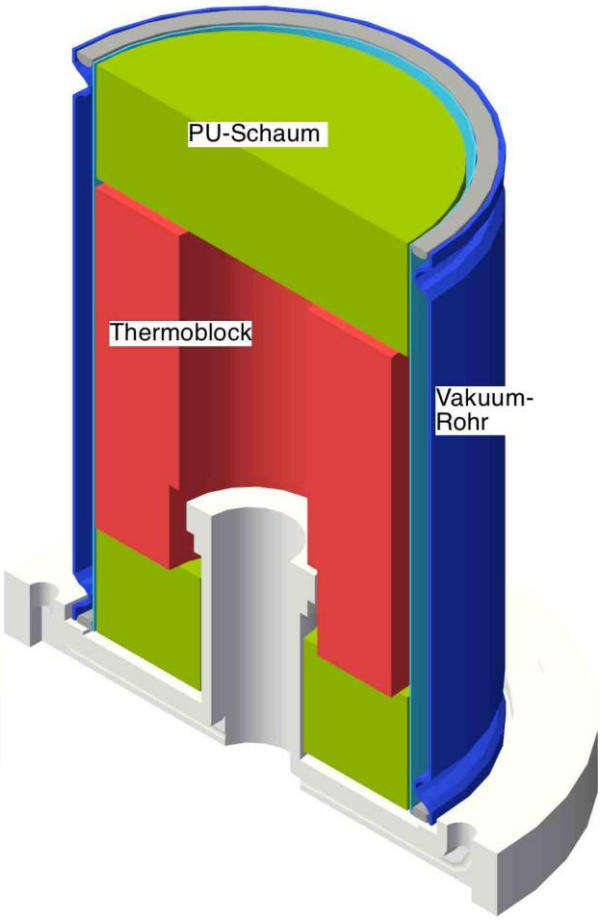

Fig. 3b Prinzipskizze einer Vakuum-Isolation mit rohrartigem Aufbau

2.2.2 Approbationsfähigkeit der Varianten prüfen

Die Approbationsfähigkeit (Norm- und Sicherheits-Konformität) der Isolationsvarianten leitet sich in erster Linie von der elektrischen Sicherheit des Aufbaus ab, wobei zu berücksichtigen ist, dass der Thermoblock mit 230 VAC zu versorgen ist. Da einerseits der, im wesentlichen aus Aluminium bestehende, Thermoblock mit der gesamten thermischen Isolation innerhalb eines Kunststoffgehäuses verschlossen ist und dieses vom Benutzer der Kaffeemaschine nur mit Gewalt zu öffnen ist und da anderseits der Schutzleiter der dreiadrigen Stromzufuhr zum Thermoblock durchgeführt ist, ändert das Anbringen der Isolation nichts an der heute vorhandenen Sicherheit gegen elektrischen Schlag.
In zweiter Linie ist die thermische Sicherheit, d.h. die Sicherheit gegen Überhitzung und Brand von Wichtigkeit. Die beiden stromführenden Leiter der elektrischen Zuführung zum Thermoblock sind - ohne oder mit thermischer Isolation - mit Überhitzungs-Sicherungen ver-

sehen, welche in direktem Kontakt mit dem Thermoblock stehen. Bei einem Überhitzen des Thermoblockes, was nur bei einem Versagen der Temperaturregelung möglich ist, unterbricht mindestens eine dieser thermischen Sicherungen die Stromzufuhr zur gesamten Kaffeemaschine dauerhaft. Auch hier bedeutet also das Anbringen einer Isolation kein zusätzliches Sicherheitsrisiko.
Im Falle eines von aussen her ausgelösten Brandes spielt auch die Brandfestigkeit der verwendeten Isolation eine - der geringen Mengen wegen - eher untergeordnete Rolle. Alle metallischen Komponenten, wie Vakuum-Rohr oder Aluminiumfolie sind in dieser Hinsicht unproblematisch. Da PU-Schäume auch in schwer entflammbarer Form (EN-13501, Klassierung B) vorliegen, und natürlich nur derartige Verwendung finden werden, ist auch dieser Werkstoff als unproblematisch einzustufen. Dies gilt insbesondere für PIR-Hartschäume, den modernen Ersatz der PU-Schäume, welche, bei mindestens gleich guten Isolationseigenschaften, spezifisch auf hohe Temperaturbeständigkeit und gutes Brandverhalten ausgelegt sind. Im Rahmen dieser Arbeit beinhaltet deshalb der Begriff PU-Schaum auch PIR-Hartschäume.

2.2.3 thermische Berechnungen (analytisch, FEM)

Um möglichst grosse rechnerische Sicherheit zu bekommen, wurden die im folgenden Abschnitt dargestellten Ergebnisse jeweils mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden durchgeführt.
Angewendet wurden analytische Berechnungen unter Verwendung von Tabellenkalkulations Programmen (MS-Excel, LibreOffice) sowie Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente. Die verwendeten FEM-Programme sind einerseits ein Low-Cost Programm (LISA), das für alle unterschiedlichen Modelle verwendet wurde und anderseits, für einige Kontrollen, das wohlbekannte ANSYS. Mit LISA beschränkten wir uns auf die Berechnung von 2D-Modellen, während wir mit ANSYS 3D-Modelle verwendeten. Die Modellierungen und Berechnungen mit LISA bzw. ANSYS wurden von zwei verschiedenen Personen unabhängig voneinander durchgeführt und führten zu Ergebnissen von wenigen Prozent Abweichung.

Die Resultate der unterschiedlichen Berechnungsmethoden stimmen für die jeweils entsprechenden Modelle auf wenige Prozent genau überein.

2.2.3.1 Berechnungen mit PU-Halbschalen

Die Isolation des Thermoblocks mit einer Hülle aus PU-Schaum (bzw. PIR-Schaum) ist in der vorgängigen Arbeit (siehe Ausgangslage) mittels Berechnungen und Messungen an entsprechenden Testaufbauten mit eingeschäumten Thermoblöcken gründlich untersucht worden. Der unter Punkt 2.2.1.1 skizzierte Ansatz mit zwei Halbschalen aus PU unterscheidet sich thermisch in keiner Hinsicht von einem Einschäumen des Thermoblockes, so dass die Resultate der vorgängigen Untersuchung hier übernommen werden dürfen.
Es hat sich dort gezeigt, dass der Wärmeverlust des konstant auf ca. 92°C gehaltenen Thermoblockes von ca. 14 W im nicht isolierten Zustand auf ca. 4.3 W bzw. 3.6 W gesenkt werden kann, wenn der Thermoblock mit 7.5 mm bzw. 10 mm PU-Schaum umhüllt ist.
Bezüglich der Abkühlung des Thermoblocks nach Abschaltung der Heizung bedeutet dies, dass die Temperatur des Thermoblockes statt nach 2 Stunden auf Raumtemperatur abgesunken zu sein immer noch ca. 50°C bzw. 56°C hoch ist (siehe Fig. 4).

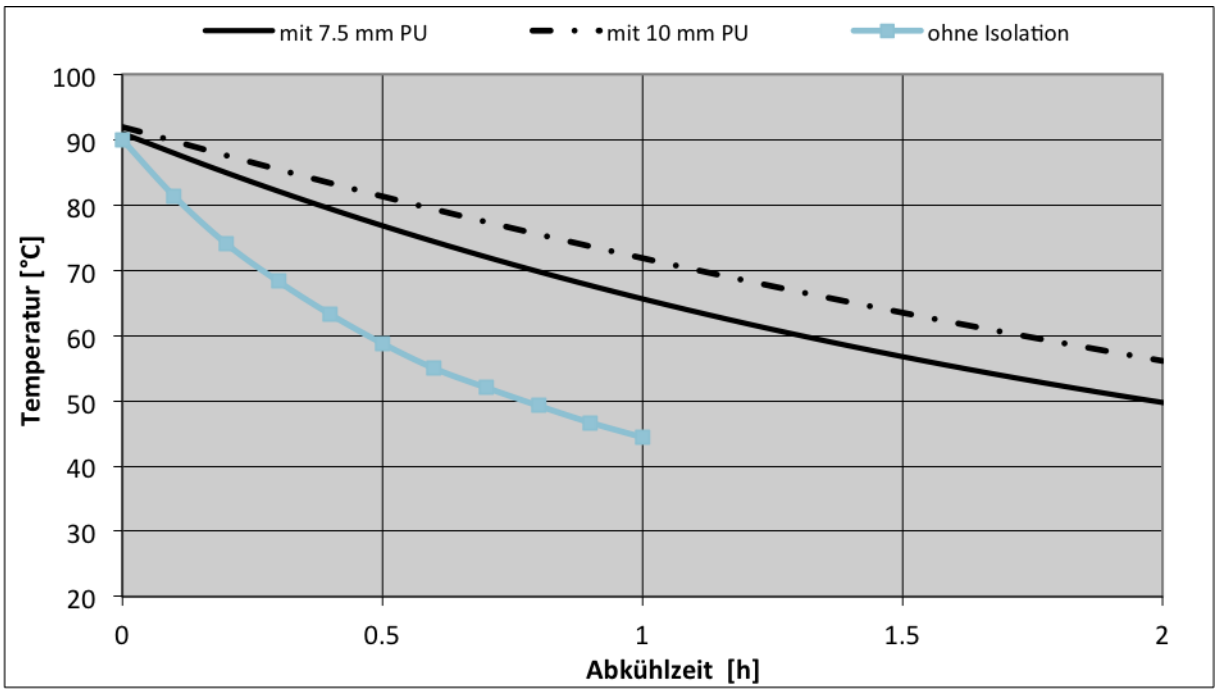

Fig. 4 Abkühlkurven eines Thermoblockes ohne und mit PU- Isolation

2.2.3.2 Berechnungen mit Luftspalt

In der Literatur - auf die wir hier nicht näher eingehen - findet sich mehrfach ähnliche Annahmen wie die, dass die Konvektion im Spalt zwischen vertikalen ebenen Platten unterschiedlicher Temperatur dann für den Wärmetransport zwischen diesen Platten eine untergeordnete Rolle spielt, wenn das Verhältnis von Plattenhöhe zu Plattenabstand grösser als 10 und die Prandtl-Zahl kleiner als 1000 ist.
Wendet man diese Annahme auf einen Luftspalt zwischen Thermoblock und einen diesen umgebenden Zylinder aus Aluminiumfolie an, so kommt man zum Schluss, dass bei einem Temperaturunterschied zwischen den beiden Teilen von bis zu 80°C, der Abstand zwischen Thermoblock und Aluminiumfolie ca. 10 mm gross sein darf, ohne dass ein erheblicher Wärmetransport durch Konvektion stattfindet. Sieht man von der Wärmestrahlung ab, so würde dies bedeuten, dass sich die thermische Isolationswirkung eines solchen Luftspaltes mit der Wärmeleitfähigkeit stehender Luft berechnet und damit derjenigen von PU-Schaum ähnlich ist.
Die auftretende Wärmestrahlung ist dank dem kleinen Strahlungskoeffizienten von Aluminiumfolie (ca. 0.05) relativ klein und kann beispielsweise durch einen zweiten Aluminium-Zylinder so stark reduziert werden, dass sie in erster Näherung vernachlässigbar ist.

Im folgenden Abschnitt (2.2.4) wird ein Versuchsaufbau mit einem derartigen "Doppel-Luftspalt" beschrieben. Die Messungen an diesem Versuchsaufbau haben gezeigt, dass die oben geschilderte, einfache Annahme in keiner Weise zutrifft (siehe Fig. 5)

Dies hat uns zu einer vertieften Literatursuche veranlasst bei welcher wir unter anderem auf folgenden Artikel gestossen sind:
"R. Baetens et al., Gas-filled panels for building applications, Energy and Buildings 42 (2010) 1969–1975", journal homepage: www.elsevier.com/locate/enbuild.

Zitat:

{*The heat flux through the gas is modeled as the sum of the heat flux due to conduction and the heat flux due to convection. The gas conduction can be derived from* $q_g=\lambda_g A_{cs}\Delta T_{23}/\delta_{cs}$ *with* λ_g *the stillgas thermal conductivity of the fill-gas, while an additional heat flux due to*

transport of gas in the cavity has to be included in the model, defined as an heat flux due to convection q_{cv}:

$q_{cv}=q_g Nu$ *(or* $\lambda_{cv} = \lambda_g Nu$*)*

where Nu is the dimensionless Nusselt number defining the ratio between convective heat transfer and conductive heat transfer q_g. Griffith et al.[7] used this equation for Nu:

$$\mathrm{Nu} = \left[0.825 + \frac{0.387(Pr\mathrm{Gr})^{1/6}}{\left(1+\left(0.492/\mathrm{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2 \left(\frac{\log\left(L/\delta\right)+0.53}{1.35} \right) \quad (4)$$

$$Pr = \frac{\mu_g c_g}{\lambda_g} \quad \text{and} \quad \mathrm{Gr} = \frac{g\beta^* \Delta T_{23} \delta^3}{\nu^2} \quad \text{with } \beta^* = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T_g}\right)_{p_g} \quad (5)$$

where L the cavity length as for free convection from a vertical plate, Pr the Prandtl number defining the ratio between the kinematic viscosity and the thermal diffusivity on a vertical plate (modified in Eq. (4) with the logarithmic for the increased heat flux due to convection), where the Grasshof number Gr defines the ratio between buoyancy and the kinematic viscosity for a gap width δ and a characteristic length and where μ_g (Pa sec) is the dynamic viscosity of the fill-gas, c_g the specific heat of the fill-gas, g the standard gravity, $\beta^*(K^{-1})$ the volumetric thermal expansion coefficient, ν (m^2/s) the kinematic viscosity and for which subscript p_g stands for a constant gas pressure. The notion that convection is suppressed in cavities with a gapwidth smaller than certain thresholds depending on the gas is not supported in the model for the heat flux.}

Berechnet man mit diesen Formeln und mit der Höhe H des umhüllten Thermoblockes sowie der mittleren Temperaturdifferenz ΔT, die totale Wärmeleitfähigkeit der Luft im Spalt zwischen Thermoblock und Aluminiumfolie, so erhält man für unterschiedliche Spalt-Abstände δ die in Tab. 5 dargestellten Resultate:

ΔT =	60	°C			
Höhe H =	0.15	m			
Abstand δ	Gr	Nu	λ-g @60°C	λ_{cv}	λ_{tot}
m			W/mK	W/mK	W/mK
0.0001	0.0052	2.4918	0.0279	0.0695	0.0974
0.0005	0.64	2.7474	0.0279	0.0766	0.1046
0.001	5.16	3.0271	0.0279	0.0844	0.1124
0.002	41.25	3.4728	0.0279	0.0968	0.1248
0.005	644.57	4.4401	0.0279	0.1238	0.1518
0.010	5156.55	5.5851	0.0279	0.1558	0.1837
0.020	41252.42	7.2060	0.0279	0.2010	0.2289
0.050	644569.04	10.1082	0.0279	0.2820	0.3099

Tab. 5: theoretische totale Wärmeleitfähigkeit eines Luftspalts um den Thermoblock

Es ist deutlich, dass die totale Wärmeleitfähigkeit der Luft im Spalt deutlich über der Wärmeleitfähigkeit von ruhender Luft liegt. Bei einem Spaltabstand von nur 1 mm und einer Spalthöhe von 150 mm beispielsweise ist λ_{tot} ca. 0.11 W/mK und liegt damit ca. um einen Faktor 4 höher als die Wärmeleitfähigkeit der ruhenden Luft λ_g.

Schätzt man mit diesen totalen Wärmeleitfähigkeiten den Wärmeverlust des konstant auf ca. 92°C gehaltenen Thermoblockes ab, so erhält man einen Wert von ca. 10.7 W statt von ca.

14 W im nicht isolierten Zustand und ca. 4.3 W bzw. 3.6 W, wenn der Thermoblock mit 7.5 mm bzw. 10 mm PU-Schaum umhüllt ist. Die entsprechende theoretische Abkühlkurve des Thermoblockes ist in Fig. 5 dargestellt und entspricht mit vernünftiger Genauigkeit den gemessenen Werten (siehe Abschnitt 2.2.4).

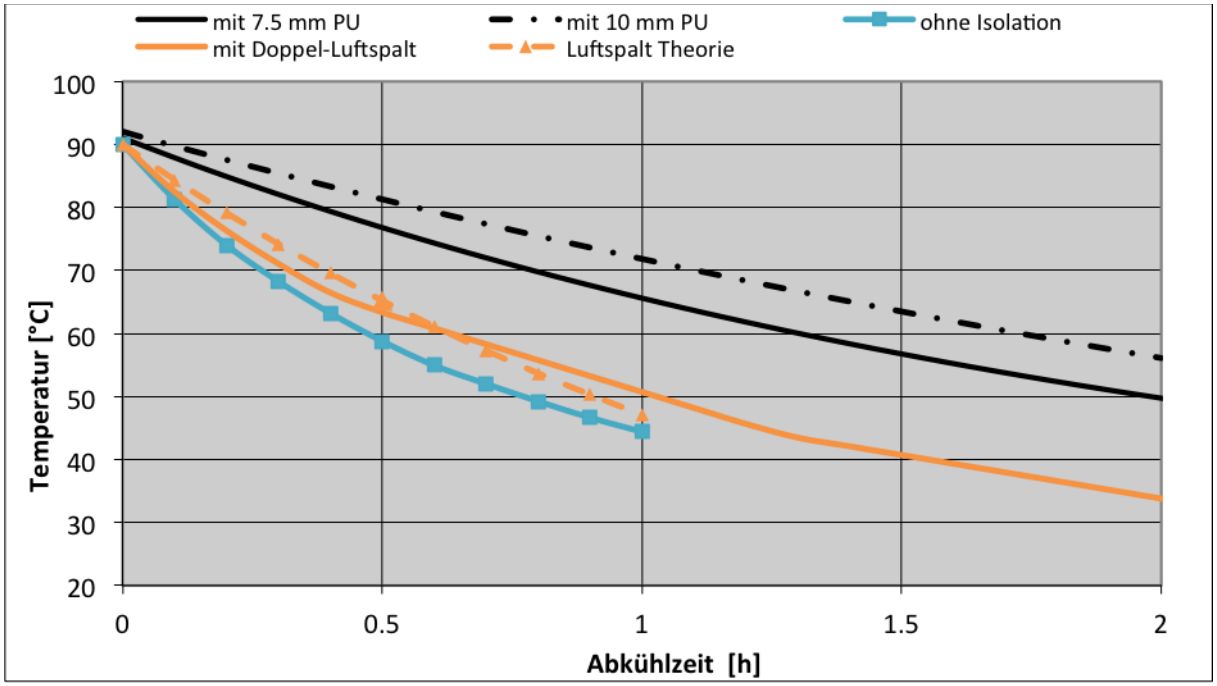

Fig. 5 Abkühlkurven eines Thermoblockes mit Doppel-Luftspalt-Isolation

Eine Verbesserung ist theoretisch möglich, wenn man den Luftspalt in einzelne kleine Kammern unterteilt. Dies kann beispielsweise so geschehen, dass man statt Aluminium-Folie eine hoch reflektierende Kunststoff-Folie verwendet und die Wandung des aus dieser Folie gefertigten Zylinders mit in Umfangsrichtung verlaufenden Wellen versieht. Eine entsprechende Berechnung ergibt Tab. 6.

	ΔT =	60	°C			
	Abstand δ =	0.005	m			
Anz. vertikale Kammern	H-Kammer m	Gr	Nu	λ-g @60°C W/mK	λ-cv W/mK	λ-tot W/mK
2	0.075	644.57	3.7742	0.0279	0.1053	0.1332
3	0.05	644.57	3.3846	0.0279	0.0944	0.1223
6	0.025	644.57	2.7187	0.0279	0.0758	0.1038
15	0.010	644.57	1.8384	0.0279	0.0512	0.0792
30	0.005	644.57	1.1724	0.0279	0.0320	0.0606
75	0.002	644.57	0.2921	0.0279	0.0081	0.0361

Tab. 6: theor. Wärmeleitfähigkeit eines in Kammern unterteilten Luftspalts

Es wird deutlich, dass λ_{tot} nur mit einer Vielzahl sehr kleiner Kammern in die Grössenordnung von λ_g gebracht werden kann. Dies wäre herstellungsmässig sehr aufwendig.

Schlussfolgerung:
Die Konvektion im Luftspalt lässt sich nur durch relativ aufwendige Massnahmen (Kammerbildung mittels vielen Zwischenwänden mindestens in Höhen-Richtung) einigermassen in Griff bekommen. Optimal ist so eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 0.04 W/mK erreichbar. Bei

unseren einfachen Aufbauten (siehe Abschnitt 2.2.4) liegt die totale Wärmeleitfähigkeit der Luft bei deutlich über 0.1 W/mK.
=> Ein Weiterverfolgen der Isolationsart "Luftspalt“ macht angesichts der Möglichkeit einer einfach und preiswert realisierbaren PU-Schale keinen Sinn.

2.2.3.3 Berechnungen mit Vakuum-Isolation

In Fig. 6 sind die berechneten Abkühlkurven von 4 Isolationsvarianten mit Vakuumspalt (Funktionsmuster Rohr, Rohr optimal, Funktionsmuster Dewar, Dewar optimal) dargestellt. Die beiden Kurven der Funktionsmuster sind mittels Messungen verifiziert worden. Zusätzlich sind die schon weiter oben besprochenen Abkühlkurven der Isolation mit Luftspalt bzw. mit PU-Schaum zu sehen.
In der mehrfach erwähnten Vorgänger-Arbeit wurden als Vakuum-Isolations-Varianten derartige mit Dewar-artigen Vakuum-Bauteilen (Fig. 3a) betrachtet. Bei kleiner Wandstärke erzielen solche Bauteile hervorragende Isolationseigenschaften. Der hauptsächliche Energieverlust (ca. 45% des Gesamtverlustes beim Funktionsmuster Dewar) eines derartig nach Bild 3a isolierten Thermoblockes, erfolgt durch die inneren Dewar-Wand entlang der PU-Isolation nach aussen. Wie die berechneten Werte für den "Dewar optimal" zeigen, kann dieser Energieverlust durch dünnere Wandstärke (z.B. 0.1 mm) und dickere PU-Isolation (z.B. 40 mm) und damit mit längerem Leitweg durch die Stahlwand stark reduziert werden. Weil das Dewar-Innere - und damit ein eingebauter Thermoblock - aber nur einseitig zugänglich ist, haben derartige Aufbauten den Nachteil, dass der konstruktive und montagetechnische Aufwand zu ihrem Einsatz in Kaffeemaschinen relativ hoch ist und die resultierenden Konstruktionen sich relativ stark von den heutigen unterscheiden müssen.
Um diese Nachteile zu vermeiden wurde in der vorliegenden Arbeit die Alternative eines rohrartigen Vakuum-Bauteils untersucht, das oben und unten mit einem 20 bis 30 mm dicken PU-Stopfen verschlossen ist. Da in einem solchen Aufbau die Leitungen zum Thermoblock ohne Zusatzaufwand zweiseitig durch die PU-Stopfen geführt werden können, kann ein solcher rohrartiger Aufbau ohne starke Änderung der heutigen Gesamtkonstruktion einer Kaffeemaschine dem Thermoblock übergestülpt werden. Fig. 3b zeigt die Prinzipskizze eines derartigen Aufbaus. Der offensichtliche Nachteil gegenüber einem Dewar-artigen Aufbau ist, dass der geschilderte Energieverlust durch die innere Wand des Rohres nach unten und nach oben erfolgt und damit ca. doppelt so gross ist wie beim Dewar.
Wie in Kapitel 3 ausführlich besprochen, ist dieser Tatsache das ausgesprochen schlechte thermische Verhalten des von uns gebauten Funktionsmusters der rohrartigen Vakuum-Isolation zu zuschreiben. Die innere Rohrwand des Funktionsmusters ist wesentlich zu dick und der Weg nach aussen wesentlich zu kurz geraten. Wie aber die weiterführenden Berechnungen zeigen, kann mit einer optimierten Variante des Vakuum-Rohres durchaus ein gutes thermisches Verhalten erreicht werden.
Für die Bestimmung der "optimalen" Varianten von Dewar und Vakuum-Rohr wurden zahlreiche verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Wandstärken und Geometrie berechnet. Für die Darstellung in Fig. 6 wurde jeweils nur das hinsichtlich thermischem Verhalten und Fertigungsaufwand vermutlich optimale Resultat verwendet.
Die Kurve "unisoliert" in Fig. 6 entspricht dem Verhalten der Referenz-Kaffeemaschine, welche den Thermoblock während 20 Minuten nach Bezug eines Kaffees auf der Bereitschaftstemperatur von 91°C hält. Bei allen anderen Kurven wurde davon ausgegangen, dass die Kaffeemaschine eine Null-Standby Energie Automatik aufweist, d.h. dass die gesamte Stromzufuhr direkt nach Bezug eines Kaffees automatisch ausgeschaltet wird.

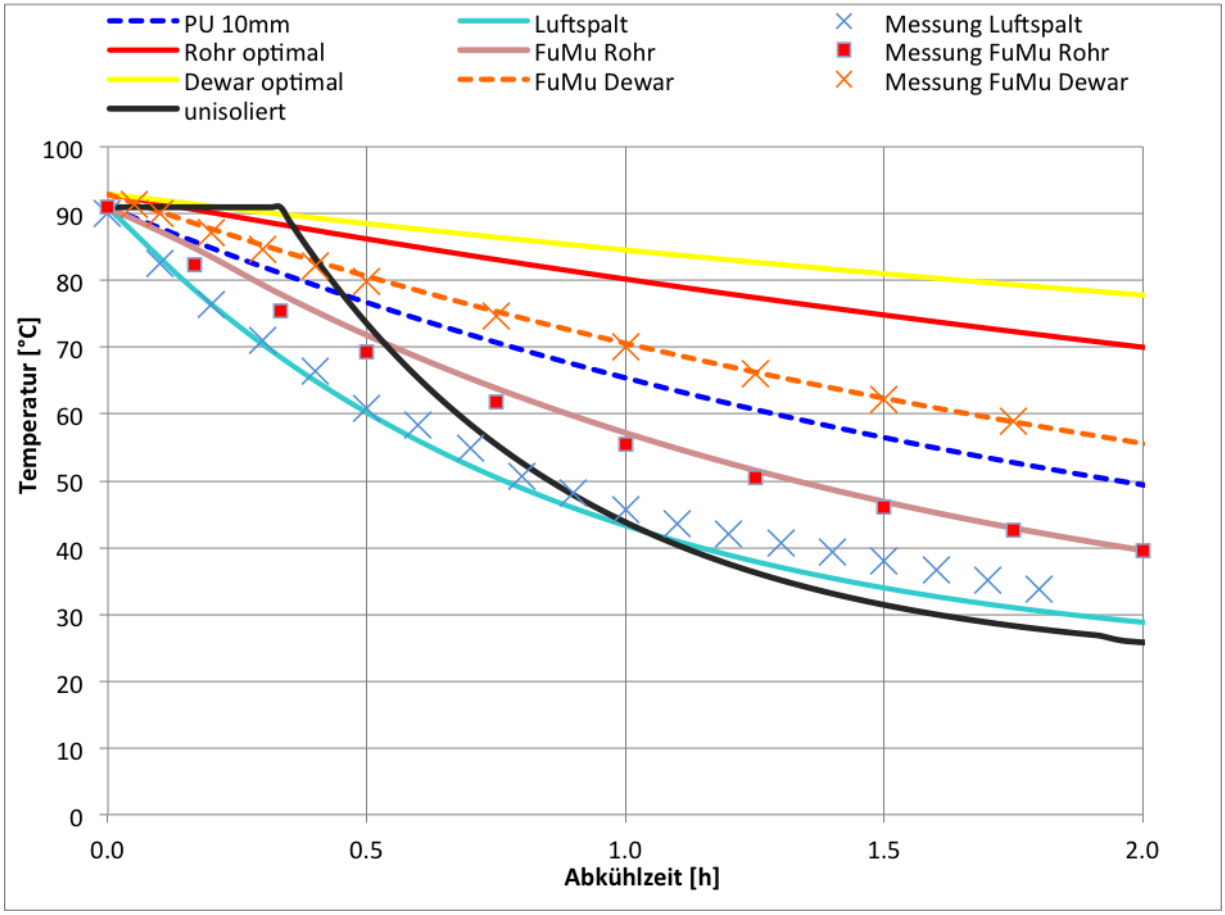

Fig. 6 Abkühlkurven eines Thermoblockes mit Vakuum-Isolation (Dewar, Rohr)

In Tab. 7 sind die mit den unterschiedlichen Isolationsarten resultierenden "steady-state" Wärmeflüsse dargestellt, welche auch den Gradienten zum Zeitpunkt 0 der in Fig. 6 dargestellten Abkühlkurven bestimmen.

Aufbau der Isolation	thermische Verlustleistung [W] (steady-state bei 91°C)		
	Messung	analytisch	FEM
unisoliert	13.92	14	
Luftspalt	10	10.46	
Funktionsmuster Rohr	7.55	7.52	7.35
Funktionsmuster Dewar	4.21	4.25	
PU 10 mm		4.35	4.37
Dewar optimiert		1.49	1.43
Rohr optimiert		2.16	2.17

Tab. 7 "Steady-state" Wärmeflüsse

Zur Abschätzung des Einflusses der unterschiedlichen Baukomponenten auf das gesamte thermische Verhalten wurden an den Beispielen des Funktionsmusters des Vakuum-Rohrs und des optimierten Vakuum-Rohrs entsprechende steady-state Berechnungen durchgeführt.

Im Falle der analytischen Berechnungen ist der Einfluss der einzelnen Komponenten per se direkt aus der Berechnung ablesbar, da hier der gesamte Wärmefluss als Summe des Flusses durch die einzelnen Komponenten berechnet wird. Im Falle der FEM Berechnungen wurde zur Abschätzung des Einflusses der einzelnen Komponenten so vorgegangen, dass

für jeweils eine der Modell-Komponenten die thermische Leitfähigkeit vernachlässigbar gesetzt wurde und der daraus resultierende Unterschied des gesamten Wärmeflusses bestimmt wurde. Tab. 8 zeigt die Resultate dieser Berechnungen für das Funktionsmuster des Vakuum-Rohrs.

Bau-Komponente	Wärmefluss [W] FEM		Wärmefluss [W] analytisch	
PU-Stopfen	1.32	17.97%	0.59	8.10%
Leitung+Strahlung durch Restgas	0.35	4.83%	0.53	7.24%
Thermoblock Anschlüsse	1.23	16.69%	2.08	28.47%
Rohr Innenwand	4.32	58.78%	4.11	56.19%
Total	7.35	98.27%	7.31	100.00%

Tab. 8: Wärmeflüsse der einzelnen Baukomponenten des für den Thermoblock mit Ø 64 hergestellten Funktionsmusters Vakuum-Rohrs

Die Unterschiede welche sich mit den beiden Berechnungsarten ergeben, sowie die Tatsache, dass sich die Anteile der einzelnen Komponente im Falle der Abschätzung mit FEM nicht ganz zu 100% addieren, lassen sich mit der relativ starken gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Komponenten erklären, die sich nur in der FEM Berechnung niederschlägt.

Die wesentliche Aussage ist, dass - im Falle des Prototyps mit Vakuum-Rohr - knapp 60% des gesamten Wärmeverlustes über die Innenwand des Vakuum-Rohrs erfolgt.

Dieser Tatsache wurde bei der Modellierung der optimalen Rohr-Variante dadurch Rechnung getragen, dass von einer deutlich reduzierten Wandstärke (0.05 mm statt 0.2 mm) und einer deutlichen Erhöhung des Überstandes des Rohrs über den Thermoblock (25 mm statt ca. 10 mm) ausgegangen wurde.

Ein ebenfalls nicht unerheblicher Wärmeverlust erfolgt über die Wasser- und Elektro-Leitungen des Thermoblocks. Diese Verlustkomponente kann durch entsprechende Umgestaltung (Materialwahl, Minimierung der Materialstärken) dieser Leitungen drastisch reduziert werden. Auch diese Tatsache wurde bei der Optimierung der Isolationsvarianten berücksichtigt.

Die Resultate der entsprechenden Detail-Berechnungen für das optimierte Vakuum-Rohr finden sich in Tab. 9.

Bau-Komponente	Wärmefluss [W] FEM		Wärmefluss [W] analytisch	
PU-Stopfen	0.76	34.89%	0.55	25.66%
Leitung+Strahlung durch Restgas	0.53	24.46%	0.59	27.32%
Thermoblock Anschlüsse	0.17	7.80%	0.19	8.96%
Rohr Innenwand	0.67	30.85%	0.82	38.06%
Total	2.17	98.00%	2.16	100.00%

Tab. 9: Wärmeflüsse der einzelnen Baukomponenten des für den Thermoblock mit Ø 64 optimierten Vakuum-Rohrs

Tab. 9 zeigt, dass die Summe der thermischen Verluste über die Innenwand des Rohrs und über die Anschlüsse des Thermoblocks mit den besprochenen konstruktiven Änderungen von ca. 80% auf ca. 40% gesenkt werden kann. Ein weiteres Senken der thermischen Verluste über diese beiden Komponenten ist schwer möglich: Einerseits wäre es denkbar die Wandstärke des Innenrohrs weiter zu senken, was aber aus Stabilitäts-Gründen sehr aufwendig wäre und zu deutlich höheren Preisen führen würde. Andererseits könnte der Überstand des Rohrs über den Thermoblock weiter erhöht werden, was zu Reduktionen der

thermischen Verluste über die Innenwand des Rohrs, über die Anschlüsse des Thermoblockes und über die dann auch höheren PU-Stopfen führen würde. Diese Massnahme ist aber nicht erwünscht, weil sie zu einer Gesamthöhe führen würde, welche die im Lastenheft definierte maximal zulässige Gesamthöhe (siehe Tab. 3) überschreiten würde.

Die bisher diskutierten Resultate beziehen sich alle auf den Thermoblock der von uns als Referenz verwendeten Dolce Gusto Kaffeemaschine, deren Thermoblock Aussenabmessungen von ca. Ø 64 mm und Höhe 64 mm aufweist.

Im Falle der Isolation mit einer Dewar-ähnlichen Hülle und noch stärker im Falle der Verwendung eines Vakuum-Rohrs, sind die thermischen Verluste durch die Isolation aber auch abhängig von der Geometrie des Thermoblocks und der daraus resultierenden Geometrie der Vakuum-Isolation.

Tab. 10 zeigt die Resultate von thermischen Verlusten durch ein Vakuum-Rohr mit Überhöhung 2 x 25 mm für 3 Thermoblöcke unterschiedlicher Geometrie, die aber alle dasselbe Volumen und damit dieselbe thermische Masse aufweisen. Der Thermoblock mit Ø 56 und Höhe 84 ist in einer Dolce Gusto Maschine anderen Typs seit längerem im Einsatz. Derjenige mit Ø 40 und Höhe 160 ist ein hypothetisches Modell an Hand dessen aufgezeigt werden kann, dass die thermische Isolation mit zunehmender Schlankheit des Thermoblockes besser wird.

Masse Thermoblock Ø x H [mm]	Volumen Thermoblock [dm^3]	Überhöhung Rohr (2x) [mm]	Wärmefluss FEM [W]	Wärmefluss analytisch [W]
64 x 64	0.206	25	2.14	2.14
56 x 84	0.207	25	1.96	1.90
40 x 160	0.201	25	1.72	1.68

Tab. 10 Einfluss der Schlankheit des Thermoblockes auf die thermischen Verluste durch ein Vakuum-Rohr

Tab. 10 macht deutlich, dass durch schlankere Gestaltung des Thermoblocks ein deutliches Verbesserungspotential besteht. Wieweit dieses genutzt werden kann wird im Endeffekt weitgehend vom Design der Kaffeemaschine bestimmt sein.

2.2.4 Testmuster entwickeln, bauen, testen

2.2.4.1 Testmuster mit PU-Halbschalen

Ein Testmuster mit PU-Halbschalen wurde nicht gebaut, weil ein solches Muster gegenüber der vorgängigen Arbeit (siehe Ausgangslage), während welcher der Thermoblock direkt eingeschäumt wurde, keine zusätzlichen Erkenntnisse bringt.

2.2.4.2 Testmuster mit Luftspalt

Zur Erstellung einfacher Testmuster wurde zunächst ein Standard-Thermoblock so umgebaut, dass alle Leitungen direkt nach oben und unten geführt werden konnten (siehe Fig. 7). Der verwendete Thermoblock ist damit ein fast idealer Zylinder mit Ømax = 52 mm.

Fig. 7 umgebauter Thermoblock, Standard-Thermoblock

Danach wurden die folgenden 3 Testaufbauten erstellt und die resultierenden Abkühlkurven des Thermoblocks gemessen:

Aufbau 1:
Modifizierter Thermoblock Ø52 umgeben von 0.1 mm dicker, oben offener Aluhülle Ø60 innerhalb des wieder geschlossenen Gehäuses der Kaffeemaschine.

Aufbau 2:
Modifizierter Thermoblock Ø52 umgeben von einer 0.1 mm dicken Aluhülle mit Ø60 und - zur Minimierung der Wärmestrahlung - umgeben mit einer zweiten 0.1 mm dicken Aluhülle mit Ø68, das Ganze innerhalb des wieder geschlossenen Gehäuses der Kaffeemaschine. Beide Aluhüllen oben mit Schaumgummi verschlossen.

Aufbau 3:
Modifizierter Thermoblock Ø52 umgeben von einer 0.1 mm dicken Aluhülle mit Ø58 und einer zweiten 0.1 mm dicken Aluhülle mit Ø66 innerhalb eines Plastikrohrs mit Ø72. Beide Aluhüllen oben mit Schaumgummi verschlossen. Dieser Aufbau ist in den Figuren 8a bis 8d dargestellt.

Die mit diesen 3 Aufbauten gemessenen Abkühlkurven sind nahezu identisch. Diejenige des Aufbaus 3 ist zusammen mit der theoretisch abgeschätzten Abkühlkurve weiter oben in Abschnitt 2.2.3.2 dargestellt. Sie bestätigt die theoretischen Berechnungen und damit auch die bereits dort gemachte Schlussfolgerung:
=> Ein Weiterverfolgen der Isolationsart "Luftspalt“ macht angesichts der Möglichkeit einer einfach und preiswert realisierbaren PU-Schale keinen Sinn.

Fig. 8a Thermoblock umgeben von 2 Aluhüllen

Fig. 8b innere Aluhülle oben und unten verschlossen mit Schaumstoff

Fig. 8c äussere Aluhülle oben und unten verschlossen mit Schaumstoff

Fig. 8d Alles in Plastik-Rohr

2.2.4.3 Testmuster mit Vakuum-Isolation

Da die entsprechenden Resultate aus der vorgängigen Arbeit vorlagen, wurden keine Testmuster sondern später direkt Funktionsmuster mit Vakuum-Isolation gebaut.

2.2.5 Alternativen im Sinne von Kosten-/Nutzen-Analyse bewerten

In Fig. 9 sind die berechneten, zum Erreichen der notwendigen Brühtemperatur (91°C) notwendigen Aufheizzeiten, Aufheiz-Energien und die Energie-Einsparung bezüglich der unisolierten Referenz-Maschine in Funktion der Abkühlzeit dargestellt. Die dargestellten Isolations-Varianten entsprechen denjenigen, deren Abkühlkurven weiter oben in Fig. 6 gezeigt sind. Die berechneten Kurven für unisoliert, PU 10 mm, Funktionsmuster Rohr und Funktionsmuster Dewar sind durch Messungen verifiziert. Auf die beiden Funktionsmuster Rohr und Dewar wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

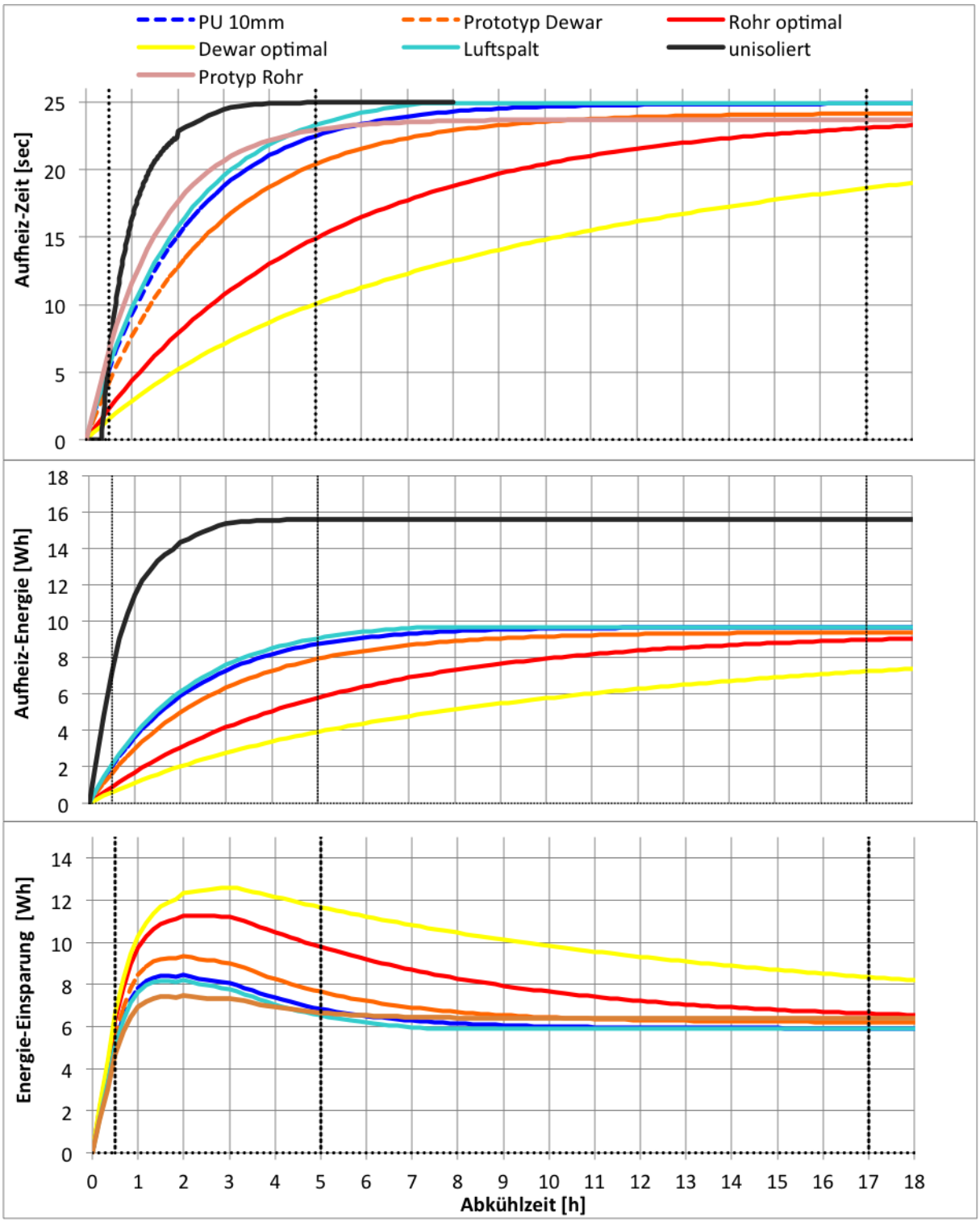

Fig. 9 Aufheizzeiten, Aufheiz-Energien und Energie-Einsparung von untersuchten Isolationstypen bezüglich der unisolierten Referenz-Maschine

Mit Hilfe der in Fig. 6 gezeigten, berechneten Abkühlkurven können auch die in Fig. 9 dargestellten entsprechenden Kurven für die bis zum Erreichen der Brühtemperatur von ca. 91°C notwendigen Aufheizzeiten und Aufheizenergien berechnet und mit denjenigen der unisolierten Referenzmaschine verglichen werden. Aus diesem Vergleich resultieren die entsprechenden Kurven der Energie-Einsparung.
Bei diesem Vergleich ist zu beachten, dass die Referenzmaschine die Brühtemperatur während 20 Minuten aufrecht erhält und erst dann die Heizung abschaltet. Bei den isolierten Varianten hingegen, wird davon ausgegangen, dass die Heizung unmittelbar nach vollendetem Brühvorgang vollständig abgeschaltet wird, d.h. eine "Zero Standby Energy" Strategie gefahren wird. Aus dieser Tatsache resultiert eine Energie-Einsparung von ca. 6 [Wh], die auch nach langen Abkühlzeiten nicht unterschritten wird.

Referenz Dolce Gusto KP2106
Jahresverbrauch 42 kWh/a

TopTen Energieverbrauch:	Theor. TopTen Energieminium:
2* pro Tag 3 Tassen a 120 g innerhalb einer Stunde und zwar nach 0, 30, 60 Minuten jeweils eine Tasse Annahme Zeiträume: Kaffee-Stunde 1 von 9:00 bis 10:00 Intervall bis Kaffee-Stunde 2: 5 h Kaffee-Stunde 2 von 15:00 bis 16:00 Intervall bis Kaffee-Stunde 1: 17 h	120g H_2O, 65°C heizen: 9.13 Wh > für 6 Tassen/d 54.78 Wh/d > pro Jahr 19.20 kWh/a (1 TopTen-Jahr = 350 Tage)

Energieeinsparung ES durch Isolation:
pro Tag = ES(17h)+2*ES(0.5h)+ES(5h)+2*ES(0.5h), pro Jahr = 350* ES/d

Isola. typ	Energie-Einspar. pro Tag [Wh]	Energie-Einspa. pro Jahr [kWh]	Jahres-verbr. result. [kWh/a]	Wirk' grad	Schätz. Mehr-kosten Isolation CHF	Mehr-Bau-höhe [mm]	Mehr-Ø [mm]	Last' heft Ziel er-reicht	Aufw. Nutzen Be-wert.
keine	0	0	42.0	45.7%	0	0	0	keines	-11.0
Luftspalt	23.3	8.2	33.8	56.7%	0.5	20	20	keines	-2.4
FuMu Dewar	36.1	12.6	29.4	65.2%	1.5	70	20	mittel	-0.9
FuMu Rohr	31.7	11.1	30.9	62.0%	1.5	40	10	min	1.3
PU 10 mm	33.5	11.7	30.3	63.3%	0.5	20	20	min	6.2
Dewar optimal	46.6	16.3	25.7	74.6%	2.5	40	10	sehr gross	9.1
Rohr optimal	41.6	14.6	27.4	70.0%	1.5	50	6	gross	10.4
Gewicht G:			20		10	5	5		
Minimalziel Min			32		0.5	50	20		
Abweich-Spanne S			7.9		2	50	14		

Aufwand-Nutzen-Bewertung = $\sum(G_i * (Min_i - Wert_i)/ S_i)$

Tab. 11: Aufwand-Nutzen Bewertung mit starker Gewichtung der Energie-Einsparung

Mit Hilfe des in Tab. 11 im oberen Teil beschriebenen Vorgehens zur Bestimmung des Energieverbrauchs einer Kaffeemaschine gemäss "TopTen", können aus den Kurven "Energie-Einsparung" die mit den unterschiedlichen Isolationsarten realisierbaren Einsparungen ES(t) zu den für "TopTen" relevanten Abkühlzeiten herausgelesen werden. Damit können dann gemäss der Formel

Energieeinsparung ES pro Tag = ES(17h)+2*ES(0.5h)+ES(5h)+2*ES(0.5h)

die jeweiligen Energieeinsparungen pro Tag und pro Jahr sowie der resultierende Jahresverbrauch der entsprechenden Maschine berechnet werden. Es zeigt sich, dass mit unterschiedlichen Isolationsarten unsere in Tab. 11 gezeigten Zielsetzungen zur Reduktion des Energieverbrauchs minimal bis sehr gross erreichbar sind.

Für eine weitere Vergleichsmöglichkeit wurde der theoretisch gemäss "TopTen" nicht unterschreitbare Energieverbrauch einer Kaffeemaschine bestimmt. Dieses Energieminimum errechnet sich als Energiebedarf von ca. 19.2 kWh/a, der notwendig ist, um die 6*120 g Wasser der 6 "TopTen"-Kaffeetassen um 65°C zu erhitzen. Der in Tab. 11 dargestellte Wirkungsgrad berechnet sich dann als Quotient aus dieser Minimal-Energie dividiert durch den effektiven Verbrauch eines bestimmten Maschinentyps. Der Wirkungsgrad unserer Referenzmaschine ist lediglich ca. 46%, derjenige der besten espressofähigen TopTen-Maschine (Jahres Verbrauch ca. 34 kWh, siehe Tab. 1) liegt bei ca. 57%. 10 mm PU-Isolation erhöht den Wirkungsgrad auf ca. 63%. Mit Vakuum-Isolation erreichbar sind Wirkungsgrade von 70% bis 75%.

Zur Durchführung einer Aufwand-Nutzen Bewertung wurde die für unterschiedliche Isolationsarten notwendigen zusätzlichen Herstellkosten pro Kaffeemaschine geschätzt und in Tab. 11 berücksichtigt. Die Überlegungen welche zu diesen geschätzten Kosten der Vakuum-Isolationsarten führen finden sich weiter unten in Abschnitt 2.3.3.

Zusätzlich wurde das für Design und Konstruktion wichtige, durch die Isolation notwendige Mehr an Bauhöhe und Durchmesser pro Thermoblock in Tab. 11 angeben.

Von den Werten des Jahresverbrauchs, der Mehrkosten, der Mehr-Bauhöhe sowie dem Mehr-Durchmesser wurden die im Lastenheft (Tab. 3) und in Tab. 11 ersichtlichen Werte der entsprechenden Minimalzielsetzungen M abgezogen und mit der Abweichungs-Spanne S der entsprechenden Spalte normiert. Diese normierten Abweichungen vom Ziel wurden mit den Gewichten G der Tabelle 11 multipliziert und die Ergebnisse dann pro Isolationstyp addiert.

Die Gewichte in Tab. 11 sind so gewählt, dass die normierte Abweichung des Jahresverbrauchs vom Minimalziel gleich stark in den Vergleichswert eingeht wie die Summe der restlichen 3 normierten Abweichungen.

Bei dieser, die Energie-Einsparung betonenden Bewertung liegen die beiden optimal mit Vakuum isolierten Typen deutlich vor einer rundum mit 10 mm PU-Schaum (bzw. PIR-Hartschaum) isolierten Variante. Die Variante mit optimiertem Vakuum-Rohr ist des kleineren Aufwands wegen besser bewertet als die in energetischer Hinsicht beste Variante mit optimiertem Dewar.

Deutlich aus Tab. 11 wird auch, dass das von uns gebaute - in Kapitel 3 ausführlich besprochene - Funktionsmuster des Vakuum-Rohrs deutlich sub-optimal ist. Dasselbe gilt in weniger starkem Masse auch für das Funktionsmuster mit Dewar.

Es ist nicht erstaunlich, dass sich ein anderes Bild ergibt, wenn man - wie in Tab. 12 - die Mehrkosten für die Isolation stärker gewichtet. In Tab. 12 sind die Gewichte so gewählt, dass die normierte Abweichung der Mehrkosten vom Minimalziel gleich stark in den Vergleichswert eingeht wie die normierte Abweichung des Jahresverbrauchs vom Minimalziel.

Isola. typ	Energie-Einspar. pro Tag [Wh]	Energie-Einspa. pro Jahr [kWh]	Jahres-verbr. result. [kWh/a]	Wirk' grad	Schätz. Mehr-kosten Isolation CHF	Mehr -Bau-höhe [mm]	Mehr-Ø [mm]	Last' heft Ziel er-reicht	Aufw. Nutzen Be-wert.
keine	0	0	42.0	45.7%	0	0	0	keines	-9.2
FuMu Dewar	36.1	12.6	29.4	65.2%	1.5	70	20	mittel	-6.6
FuMu Rohr	31.7	11.1	30.9	62.0%	1.5	40	10	min	-3.7
Luftspalt	23.3	8.2	33.8	56.7%	0.5	20	20	keines	-2.4
Dewar optimal	46.6	16.3	25.7	74.6%	2.5	40	10	sehr gross	-0.9
Rohr optimal	41.6	14.6	27.4	70.0%	1.5	60	6	gross	5.4
PU 10 mm	33.5	11.7	30.3	63.3%	0.5	20	20	min	6.2
Gewicht G:			20		20	5	5		
Minimalziel Min			32		0.5	40	20		
Abweich-Spanne S			7.9		2	50	14		
Aufwand-Nutzen-Bewertung = $\sum(G_i * (Min_i - Wert_i)/ S_i)$									

Tab. 12: Aufwand-Nutzen Bewertung mit starker Gewichtung der Mehrkosten

Bei dieser Bewertung werden nur 2 Isolationstypen positiv bewertet, wobei die kostengünstige Isolationsvariante "10 mm PU-Schaum" nur um weniges besser abschneidet als das "optimierte Vakuum-Rohr". Die thermisch beste Isolationsvariante mit Dewar wird wegen der hohen geschätzten Kosten negativ bewertet.

2.2.6 Vergleich TopTen und Energie-Etikette

Zur besseren Einordnung der gemäss TopTen bestimmten Vergleichswerte wurde eine entsprechende Bewertung gemäss den Kriterien der Energie-Etikette vorgenommen.

Als Vergleichsbasis für die mit Vakuumspalt isolierten Maschinen zeigt Tabelle 13a zunächst einmal die im Jahre 2009 vorgenommene Bewertung unserer Referenzmaschine Krups KP2106 nach den Kriterien der Energie-Etikette.

Zum besseren Verständnis seien hier die in Tabelle 13a auftauchenden Bewertungspunkte 4.1 bis 4.7 kurz besprochen:

- 4.1 bestimmt die Energie welche nach dem Abkühlen vom Vortage her notwendig ist, um die Maschine auf Betriebstemperatur aufzuheizen.
- 4.2 bestimmt die Summe der notwendigen Energie um 2 Tassen Kaffee à 40g und 120g und nach einer Stunde Wartezeit zwei weitere Tassen à 40g und 120g zu brühen.
- 4.3 "Steaming" ist für KP2106 nicht relevant.
- 4.4 bestimmt die Energie um die Maschine eine Stunde lang auf Betriebstemperatur zu halten.
- 4.5 bestimmt die während einer Stunde "Stand-By" verbrauchte Energie.
- 4.6 bestimmt die zum einmaligen Aufheizen nach 2 Stunden "Stand-By" notwendige Energie.
- 4.7 Die hier bestimmte Energie entspricht für die KP2106 derjenigen von Punkt 4.5.

Criteria assessment tool energy label Espresso machines

Declaration for energy use of Coffee Machines

Machine brand: Nescafé Dolce Gusto

Type number: Krups KP210640

Version: 11 May 09

Results reflect energy consumption in Wh over 24 hr use.

Ref	Task	Procedure	Weight based on use frequency	Benchmark for function [Wh]	Calculated std consumption [Wh]	Function available? (yes=1; no=0)	Benchmark result based on calibration	Measured result for function	Calculated real consumption [Wh]	Relative performance per item
4.1	Heating up from "off"	One time heating up	1	20	20		20	8.8	8.8	44%
4.2	Brewing coffee	Sum of 1xsingle and 1x doubles of 40g and same for 120g.	1	55.8	55.8		51	45	45.5	89%
4.3	Steaming	Avrg 3 measurements	1	15	15	0	0	0	0.0	0%
4.4	Ready to use time	60 min measurement	5	15	75		75	12.2	61.0	81%
4.5	Standby time	According to IEC 62301	11	2	22		22	0.42	4.7	21%
4.6	Heatup after standby	One time heating up	2	16	32		32	7.7	15.4	48%
4.7	"off" mode time	According to IEC 62301	8	1	8		8	0.42	3.4	43%
		Total consumption					208		138	67%

Tabelle 13a Bewertung unserer Referenzmaschine nach Energie-Etikette (2009)

Es zeigt sich, dass die Dolce Gusto KP2106 - verglichen zu der von der Energie-Etikette vorgegebenen Benchmark-Maschine - für einen gesamten Messzyklus nur noch 67% der Energie verbraucht.

Tabelle 13b zeigt die Abschätzung der entsprechenden Werte für eine Maschine deren Thermoblock mit einem optimalen Vakuum-Rohr isoliert ist.

Dabei wurde angenommen, dass die Maschine nach jedem Kaffeebezug automatisch vollständig abgeschaltet (automatische Betätigung des Hauptschalters) und beispielsweise bei Einschieben einer neuen Kapsel automatisch wieder angeschaltet wird.

Weiter wurde angenommen, zwischen dem letzten Bezug von Kaffee am Vortag und dem neuen Messzyklus seien 14 Stunden vergangen.

Type number:	**Krups KP210640 with VacuTube**							
		Weight based on use frequency	insulation energie saving [Wh]	estimated result with insulation	estimated real con-sumtion with insulation [Wh]	esti. rel. perform. comp. to benchm.	esti. rel. perform. comp. to KP2106 uninsulated	comment
4.1	Heating up from "off"	One time heating up	1	1.06	7.8	7.8	39%	88%	thermoblock temp. Ttb(14h) is still 28°C after cooling down overnight
4.2	Brewing coffee	Sum of 1xsingle and 1x doubles of 40g and same for 120g.	1	5.4	40	40.1	78%	88%	heatup-saving after 1 h cooling down. Ttb(1h)=79°C, ta(1h)= 4.5 sec
4.3	Steaming	Avrg of 3 measure-ments	1	0	0	0.0	0%	0%	
4.4	Ready to use time	60 min measure-ment	5	9.5	2.4	12.0	16%	20%	3 times heating up within 2 (Tmin=85°C, ta-max=3 sec)
4.5	Standby time	According to IEC 62301	11	0.4	0	0.0	0%	0%	compl. shut down directly after brewing
4.6	Heatup after standby	One time heating up	2	5.5	2	4.4	14%	28%	heatup-saving after 2 h cooling down. Ttb(2h)=69°C, ta(2h)=8 sec
4.7	"off" mode time	According to IEC 62301	8	0.4	0	0.0	0%	0%	compl. shut down directly after brewing
		Total consumption				64	31%	46%	
		Energie Saving per year kWh/a					50	26	Energie Saving after "TopTen" is 14.6 kWh/a compared to KP2106

Tab. 13b Bewertung der mit Vakuum-Rohr isolierten Referenzmaschine nach Energie-Etikette

Im Vergleich zu der von der Energie-Etikette vorgegebenen Benchmark-Maschine verbraucht die mit Vakuum-Rohr isolierte KP2106 nur noch 31% der Energie für einen Messzyklus, was einer Einsparung von ca. 50 kWh pro Jahr entspricht.
Im Vergleich zur nicht isolierten KP2106 werden für einen Messzyklus nur noch 46% der Energie benötigt, was einer jährlichen Energieeinsparung von 26 kWh entspricht.
Bei der Bewertung gemäss TopTen hat sich für die mit optimalen Vakuum-Rohr isolierte Maschine eine jährliche Energieeinsparung von 14.6 kWh (Tabellen 11 und 12) ergeben, was

bedeutet, dass die isolierte Maschine bei einer Bewertung gemäss Energie-Etikette noch besser abschneidet als nach einer Bewertung gemäss TopTen.
Dies erklärt sich aus dem Energieverbrauch gemäss des Punktes 4.4 (1 Stunde lang Bereitschaftstemperatur halten) der Energie-Etikette, der bei TopTen fehlt.

Bei der in Tabelle 13c bewerteten, mit Dewar isolierten Referenzmaschine fällt der Vergleich erwartungsgemäss nochmals besser aus. Hier ergibt sich im Vergleich zur nicht isolierten Referenzmaschine eine jährliche Einsparung von 29 kWh.

Type number:		Krups KP210640 with Dewar						
		Weight based on use frequency	insulation energie saving [Wh]	estimated result with insulation	estimated real consumtion with insulation [Wh]	esti. rel. perform. comp. to benchm.	esti. rel. perform. comp. to KP2106 uninsulated	comment
4.1	Heating up from "off"	One time heating up	1	2.76	6.1	6.1	30%	69%	thermoblock temp. Ttb(14h) is still 42°C after cooling down overnight
4.2	Brewing coffee	Sum of 1xsingle and 1x doubles of 40g and same for 120g.	1	5.9	40	39.7	77%	87%	heatup-saving after 1 h cooling down. Ttb(1h)=84°C, ta(1h)= 3 sec
4.3	Steaming	Avrg of 3 measure-ments	1	0	0	0.0	0%	0%	
4.4	Ready to use time	60 min measurement	5	10.4	1.7	8.5	11%	14%	2 times heating up within 2 h (Tmin=85°C, ta-max=3 sec)
4.5	Standby time	According to IEC 62301	11	0.4	0	0.0	0%	0%	compl. shut down directly after brewing
4.6	Heatup after standby	One time heating up	2	6.4	1	2.6	8%	17%	heatup-saving after 2 h cooling down. Ttb(2h)=77°C, ta(2h)=5 sec
4.7	"off" mode time	According to IEC 62301	8	0.4	0	0.0	0%	0%	compl. shut down directly after brewing
		Total consumption				57	27%	41%	
		Energie Saving per year kWh/a					53	29	Energie Saving after "TopTen" is 16.3 kWh/a compared to KP2106

Tab. 13c Bewertung der mit Dewar isolierten Referenzmaschine nach Energie-Etikette

2.3 Überlegungen zur Fertigung und den Kosten der Vakuum-Isolation

2.3.1 Fertigungsabklärungen Gesamt- Kaffeemaschine (Möglichkeiten zur Serien-Fertigung)

Bei beiden betrachteten Vakuumisolations-Varianten muss darauf geachtet werden, dass ein Standard Thermoblock so abgeändert werden kann, dass er in die jeweilige Isolationshülle hinein passt und dass die Leitungen zum und vom Thermoblock problemlos aus der in ihren Dimension möglichst klein gehaltenen Isolationshülle herausgeführt werden können. Wie die in Abschnitt 3 beschriebenen Funktionsmuster zeigen, ist dies ohne grössere Schwierigkeiten möglich.
Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass der mit der Isolationshülle versehene Thermoblock so in eine Standard Kaffeemaschine eingepasst werden kann, dass die äussere Form der Kaffeemaschine beibehalten werden kann und dass deren innerer Aufbau nur durch Umplatzieren einzelner Komponenten modifiziert werden muss. Auch dies ist realisierbar.

Das geschilderte Vorgehen stellt sicher, dass für die allfällige spätere Serienfertigung einer entsprechenden Kaffeemaschine zwar die äussere Form des Thermoblocks und bestimmte Spritzgussformen des Maschinengehäuses angepasst werden müssen, dass aber alle wesentlichen mechanischen und elektrischen Komponenten, die Schnittstellen zwischen denselben sowie die Montage der Komponenten ohne wesentliche Änderung von bisherigen Maschinen übernommen werden können.

Dies bedeutet, dass lediglich für die eigentliche Isolationshülle neue Fertigungsverfahren entwickelt werden müssen und die gesamte restliche Fertigung und Montage der heute praktizierten entspricht.
Diese Feststellung gilt auch für die zu erwartenden Herstellkosten der Kaffeemaschine.

2.3.2 Fertigungstechnologien Vakuum-Isolation (Möglichkeiten zur Serien-Fertigung)

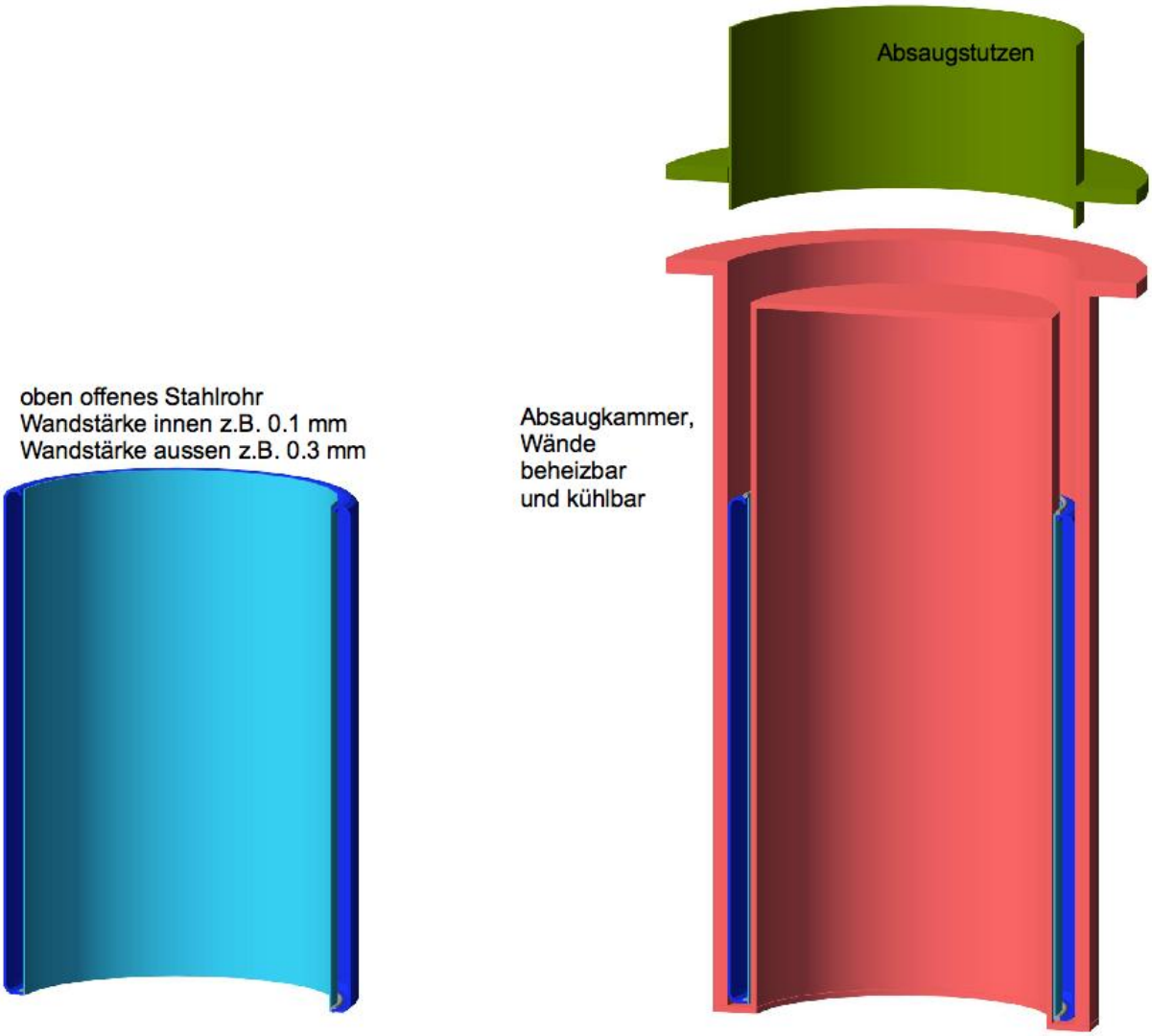

Fig. 10 Prinzipskizze Fertigung Vakuum-Rohr

In Fig. 10 ist das Prinzip einer Fertigungsmöglichkeit des Vakuum-Rohrs skizziert.
Das doppelwandige Rohr besteht aus einem geraden inneren Edelstahlrohr mit Wandstärke 0.05 bis 0.1 mm sowie einem äusseren Edelstahlrohr mit beispielsweise Wandstärke 0.3 mm, dessen oberer und unterer Rand beispielsweise mittels Einrollen nach innen gebogen sind.
An der unteren Seite werden die beiden Rohre miteinander verschweisst. Anschliessend wird das oben offene Rohr geglüht. Dieses Glühen soll innere Spannungen in den Rohrwandungen und in der Schweissnaht reduzieren, weil sich solche beim Prozess des beheizten Evakuierens so stark auswirken können, dass das dünnwandige Rohr unter Luftdruck kollabiert. Zweitens bringt das Glühen den Vorteil, dass das an der Oberfläche adsorbierte Wasser fast vollständig desorbiert und dass Gase wie Wasserstoff, Sauerstoff usw. die in den Korngrenzen des Stahls gebunden sind, so weit ausgetrieben werden, dass sie das später erstellte Vakuum nicht durch Ausgasen gefährden.
In vorzugsweise noch heissem Zustand wird das Rohr in eine spezifische Vakuumkammer eingeschoben. Zusätzlich wird ein Hartlotring auf den oberen Spalt des Stahlrohrs aufgelegt. Danach wird ein Absaugstutzen auf den oberen Abschluss der Vakuumkammer aufgepresst. Die Vakuumkammer ist so gestaltet, dass ihre Wände das Rohr beispielsweise streifenartig berühren. Die Wände der Vakuumkammer sind beheizbar, so dass das gesamte eingescho-

bene Stahlrohr zum Zwecke des weiteren Entgasens auf eine Temperatur von beispielsweise 500°C aufgeheizt werden kann. In heissem Zustand wird die Kammer auf beispielsweise 10^{-6} mbar evakuiert. Nach einiger Zeit wird beispielsweise mit einer in der Wandung der Vakuumkammer vorhandenen zusätzlichen Heizspirale das Stahlrohr an seinem oberen Abschluss so weit erhitzt, dass das Hartlot fliesst und das Rohr verschliesst. Nach genügendem Abkühlen kann das fertige Vakuum-Rohr der Vakuumkammer entnommen werden.
Um auf diese Weise eine genügende Menge Vakuum-Rohre pro Zeiteinheit herstellen zu können müssen selbstverständlich eine Vielzahl derartiger Vakuumkammern im Einsatz sein.

2.3.3 Abschätzung der Herstellkosten (für Serien-Fertigung)

Da - wie in Abschnitt 2.3.1 festgestellt - nur die Vakuum-Isolations Komponenten zusätzliche Kosten beim Bau der entsprechenden Kaffeemaschine verursachen, beschränken sich die folgenden Überlegungen auf diese Komponente. Die hier beschriebenen Kosten addieren sich im Wesentlichen zu den bekannten Kosten der nicht isolierten Maschine.

Dewar-ähnliche Gefässe können am Markt bezogen werden und es lassen sich entsprechende - fast ausschliesslich chinesische - Hersteller von Massenprodukten finden, die bereit sind, die Massenproduktion eines für unsere Zwecke optimierten Dewars zu übernehmen. Uns vorliegende Angebote für Dewar-ähnliche Gefässe mit einer Geometrie, welche ungefähr der von uns benötigten entspricht, liegen bei knapp unter 2.00 CHF pro Stück. Da aber bei diesen Angeboten die Wandstärke der inneren Dewarwand mit ca. 0.4 bis 0.5 mm deutlich über den aus thermischen Gründen höchstens gewünschten 0.1 mm liegt, ist davon auszugehen, dass ein geeignetes endgültiges Dewar ca. 0.3 CHF mehr kosten wird. Dazu kommen noch die Kosten für einen PU-Stopfen und die Montageaufwendungen, so dass davon auszugehen ist, dass ein fertig um den Thermoblock montiertes Dewar in der Grössenordnung von 2.5 CHF pro Stück kosten wird.

Bezüglich des in dieser Arbeit konzipierten Vakuum-Rohrs sind uns keine entsprechenden Komponenten am Markt bekannt. Aus diesem Grunde wurden hier Abklärungen gemacht, welche Kosten durch eine neu aufzubauende, ansatzweise der in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen, Massenproduktion (einige Mio. Stück pro Jahr) entstehen würden.
Aufgrund von vorliegenden Angeboten für grössere Mengen Edelstahl-Band (1.4310), kann davon ausgegangen werden, dass die Materialkosten für ein dem Thermoblock angemessenes Vakuum-Rohr bei ca. 0.4 CHF zu liegen kommen. Von uns durchgeführte Abklärungen zur Massenproduktion von Vakuum-Rohren zeigen, dass die zur Produktion notwendigen Anlagen, deren Betriebs- und Wartungskosten sowie die Personalkosten sich zu ca. 0.8 CHF pro Rohr summieren werden. Dazu kommen ca. 0.3 CHF/Rohr für die PU-Stopfen und die Montage des Rohres um den Thermoblock, so dass davon ausgegangen werden darf, dass die fertig montierte Isolation des Thermoblocks mit Vakuum-Rohr sich total auf ca. 1.5 CHF belaufen wird.

2.3.4 Abschätzung der Energieeinsparung und der grauen Energie

Die folgende Abschätzung bezieht sich auf die durch eine Isolation des Thermoblocks erzielbare Energieeinsparung und auf die graue Energie die für die entsprechende Isolation anfällt.
Für den Vergleich beschränken wir uns auf eine Isolation mit PU-Schaum einerseits und auf die Isolation mit Vakuum-Rohr anderseits. Die für ein Dewar anfallende graue Energie entspricht ungefähr derjenigen zur Herstellung eines Vakuum-Rohres.

Die Werte für die spezifische graue Energie Egs [MJ/kg] sind für PU-Schaum der Website

"www.wecobis.de" und für Stahl der Schrift "eCO_2lodge, Energiebilanz von Werkstoffen, Lina Micus, Florian Loweg" entnommen.

Die mit diesem Wert, dem spezifischen Gewicht des Werkstoffes und dem Volumen der Komponente berechnete graue Energie Eg [kWh], wurde zur Abschätzung der effektiven grauen Energie pro Isolation Eg_eff mit einem geschätzten "Herstellungsfaktor" multipliziert, welcher die zusätzlichen Aufwendungen zur Herstellung der fertig montierten Isolationskomponente beinhaltet. Mit den Faktoren 2 für PU und 5 für das Vakuum-Rohr wurden bewusst pessimistische Werte angenommen.
Es ist nicht erstaunlich, dass die so geschätzte effektive graue Energie für das Vakuum-Rohr mit 7.3 kWh um knapp einen Faktor 20 höher liegt, als diejenige für eine PU-Isolation. Ob die Isolation mit Vakuum-Rohr dennoch Sinn macht, muss sich aus einem Vergleich mit der geschätzten Energieeinsparung ES ergeben.

	Dimension				graue Energie					zu Einsparung durch Isolation ES			
	D	Ø	H	V	Egs	Eg	Eg	Herst. Fakt.	Eg_ eff	ES	Nutz-dauer	ES_tot - Eg_eff	Eg_eff / ES_tot
	mm	mm	mm	m^3	MJ/kg	MJ	kWh		kWh	kWh/a	a	kWh	
Thermo-block		64	64	2.1E -04									
PU-Schaum kg/m3													
30	10	84	84	2.6E -04	102.0	0.8	0.2	2.0	0.44	11.7	5	58.1	0.75%
Vaku-Rohr													
Stahl-Wand	0.05	66	104	2.2E -06	100.1	1.7	0.5						
Stahl-Verstärk.	0.2	68	104	4.4E -06	100.1	3.6	1.0						
∑							1.5	5.0	7.34	14.6	5	65.7	10.0%

Tab. 14 Energieeinsparung und graue Energie durch Isolation

Die Werte zur Energieeinsparung ES in Tab.14 stammen aus den in Abschnitt 2.2.5 besprochenen und in Tab. 11 und Tab. 12 bereits dargestellten Berechnungen.
Bei der Annahme einer Nutzungsdauer der Kaffeemaschine von 5 Jahren liegt die um die graue Energie verminderte totale Energieeinsparung der PU-Isolation bei 58 kWh und diejenige der Isolation mit Vakuum-Rohr bei 66 kWh.
Trotz der Tatsache, dass die graue Energie beim Vakuum-Rohr ca. 10% der totale Energieeinsparung "frisst" - statt nur ca. 1% bei der PU-Isolation - zeigt sich, dass die Isolation mit Vakuum derjenigen mit PU-Schaum in energetischer Hinsicht überlegen ist.

3 Funktionsmuster

3.1 Varianten

Aufgrund der Erkenntnis, dass eine Isolation mit Luftspalt nicht kostengünstig machbar ist (siehe Abschnitt 2.2.3.2 und 2.2.4.2) und der Tatsache, dass das Isolationsverhalten mit zwei PU-Halbschalen demjenigen der in der vorgängigen Arbeit untersuchten PU-Varianten entspricht, wurden zwei Arten von Funktionsmuster mit Vakuumspalt-Isolation entwickelt, eine mit Vakuum-Rohr Isolation und eine weitere mit Dewar-ähnlicher Vakuum-Isolation.

Für das Funktionsmuster des Dewars wurde auf einen am Markt erhältlichen Vakuum-Becher zurückgegriffen, dessen Innenabmessungen sehr nahe bei denjenigen liegen, welche für den verwendeten Thermoblock erforderlich sind. Die Aussenabmessungen hingegen sind deutlich zu gross und auch die Wandstärke liegt mit ca. 0.4 mm deutlich oberhalb der im Endeffekt angestrebten.
Zwar spielt die Wandstärke der Dewar-Aussenseite nur eine untergeordnete Rolle für den gesamten Wärmeverlust, aber - analog zu den in Abschnitt 2.2.3.3, Tab. 8 und Tab. 9 besprochenen Berechnungen - ist diejenige der Innenseite sehr wichtig und sollte beim Dewar lediglich ca. 0.1 mm betragen.

Für das Funktionsmuster des Vakuum-Rohrs musste eine eigene Rohrkonstruktion erfolgen, die aus fertigungstechnischen Gründen noch nicht der in Abschnitt 2.3.2 skizzierten optimaleren entsprach. Das Prinzip des zunächst vorgesehenen Funktionsmuster-Rohres ist aus Figur 11a ersichtlich. Fig. 11b zeigt das Resultat einer FEM-Berechnung des Rohr bezüglich Beulen (buckling), welche eine Sicherheit gegen Beulen mit einem Faktor ca. 1.7 ergab. Wir haben uns entschlossen, Rohre mit dieser knappen Sicherheit bauen zu lassen. Die Folgen davon werden weiter unten in Abschnitt 3.3 besprochen.

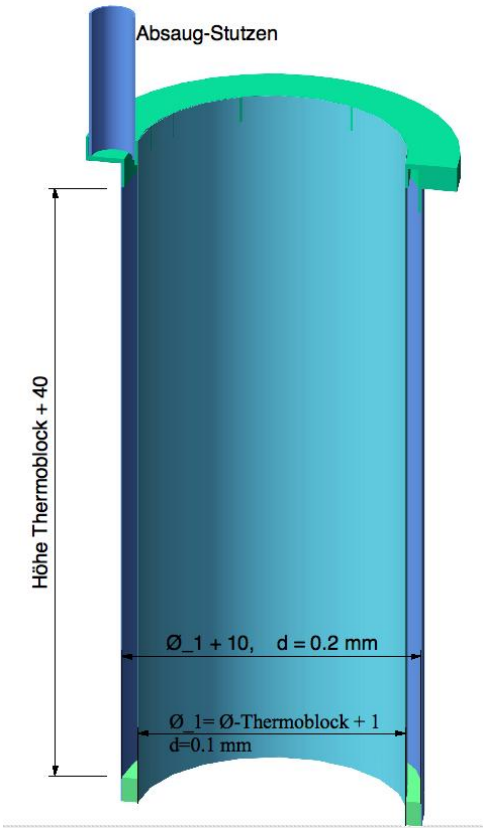

Fig. 11a Prinzip-Skizze des vorgesehenen Funktionsmusters "Vakuum-Rohr"

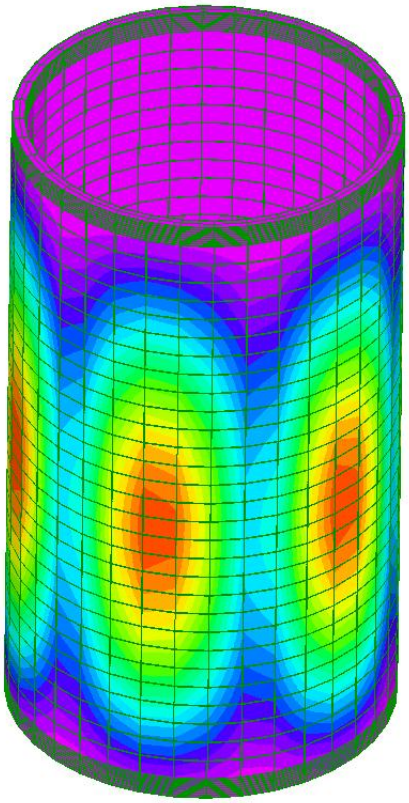

Fig. 11b FEM Resultat bezüglich Beulen

Offensichtlich ist diese Konstruktion mit zwei dicken Stahlringen an den beiden Rohrenden in fertigungstechnischer - und damit auch in kostenmässiger - Hinsicht keinesfalls optimal.
Der Aufbau hätte aber dank der dünnen Stärke (0.1 mm) der inneren Rohrwand und dank des grossen freien Überstandes (2 * 20 mm) über die Höhe des Thermoblocks ein gutes thermisches Verhalten erwarten lassen.

3.2 Funktionsmuster bauen

3.2.1 Funktionsmuster mit Vakuum-Rohr

Die Fertigungsmöglichkeiten des von uns gefundenen Produktionspartners für die Funktionsmuster, verlangen eine Mindeststärke der Rohrwände von 0.2 mm.
Neben dieser ersten Abweichung vom geplanten Rohr, welches eine Stärke der inneren Rohrwand von 0.1 mm vorsah, war ein weiterer Kompromiss in Form der Verkleinerung des freien Überstandes über die Höhe des Thermoblockes von geplanten 2*20 mm auf lediglich 2*10 mm notwendig. Diese Kompromisse hatten schlussendlich einen erheblichen negativen Einfluss auf das thermische Verhalten des Funktionsmusters (siehe Abschnitte 3.3 und 2.2.3.3). Trotzdem konnten mit diesem Funktionsmuster - neben der messtechnischen Bestätigung unserer Berechnungsmethoden - einige sehr wichtige Erkenntnisse bezüglich Festigkeit und Vakuumerstellung gewonnen werden.
Das mit diesen Kompromissen gebaute Vakuum-Rohr ist in Fig. 12a skizziert. Fig. 12b zeigt eines der 6 gebauten und mittels Helium-Lecktest auf Dichtigkeit geprüften Vakuum-Rohre neben einem modifizierten Thermoblock, bei welchem sämtliche Leitungen nach unten bzw. nach oben verlaufen. Aufgesetzt auf diesen Thermoblock sind zwei ca. je 20 mm hohe PU-Stopfen, welche den Durchmesser des Thermoblocks aufweisen.

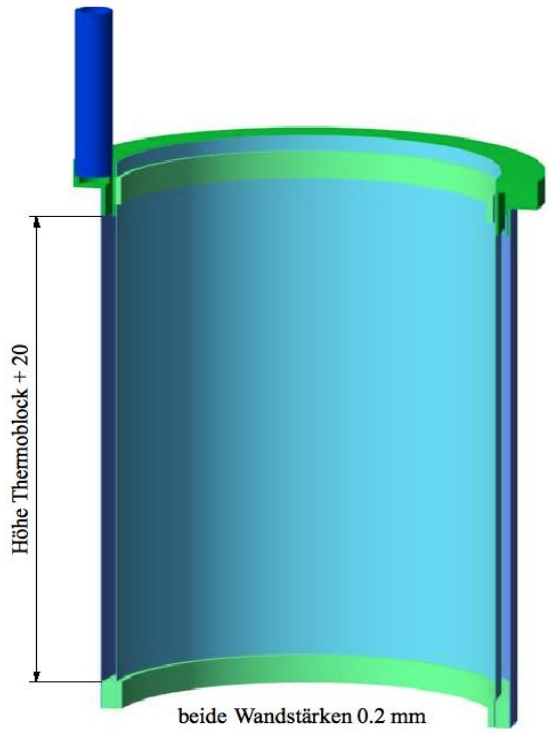

Fig. 12a Gebautes Funktionsmuster des Vakuum-Rohrs

Fig. 12b Modifizierter Thermoblock mit PU-Stopfen und Vakuum-Rohr

Fig. 12c Mit Vakuum-Rohr isolierter Thermoblock

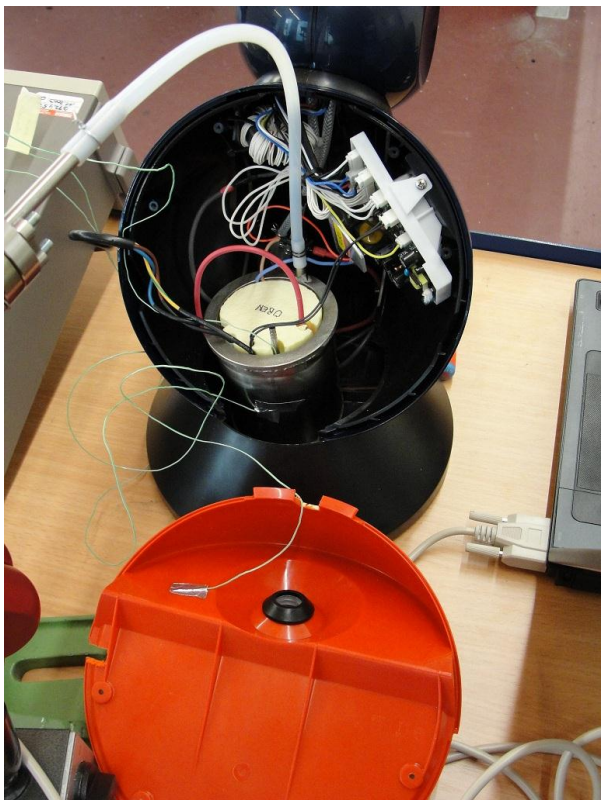

Fig. 12d Isolierter Thermoblock in Dolce Gusto Kaffeemaschine

Fig. 12c zeigt den mit Vakuum-Rohr und PU-Stopfen isolierten Thermoblock mit den Leitungen für Wasser und Elektrizität. Zusätzlich ist die auf den Absaugstutzen aufgepresste Absaugleitung mit Anschlussflansch für die Vakuumpumpe sichtbar.
Aus Fig. 12d ist ersichtlich, dass der mit Vakuum-Rohr isolierte Thermoblock - wie in Abschnitt 2.3.1 besprochen - ohne grösserer Umbauten der Kaffeemaschine im Innern einer marktüblichen Dolce Gusto Kaffeemaschine Platz findet, was natürlich auch noch nach der Montage des die Kaffeemaschine gegen oben verschliessenden, roten Gehäuseteils gilt.

3.2.1 Funktionsmuster mit Dewar

Fig. 13a zeigt einen Standard-Thermoblock der so modifiziert ist, dass sämtliche Zu- und Ableitungen nach unten führen. Aufgelegt ist ein ca. 20 mm dicker PU-Stopfen mit den für die Leitungen notwendigen Öffnungen. Sichtbar sind die beiden Wasserleitungen, die elektrischen Anschlüsse sind noch nicht verlegt.

Fig. 13b zeigt den - nicht mehr sichtbaren - Thermoblock der zusammen mit dem PU-Stopfen in ein am Markt erhältliches Dewar-Gefäss eingeschoben und auf die Grundplatte einer Dolce Gusto Kaffeemaschine aufgebaut wurde. Neben dem Dewar ist die Wasserpumpe der Kaffeemaschine zu erkennen.

Fig. 13c zeigt das fertige Funktionsmuster der Kaffeemaschine zusammen mit dem zur Messung der Abkühlkurven verwendeten Aufbau.

Fig. 13a modifizierter Thermoblock mit PU-Abschluss-Stopfen

Fig. 13b Grundplatte der Kaffeemaschine mit Thermoblock in Dewar

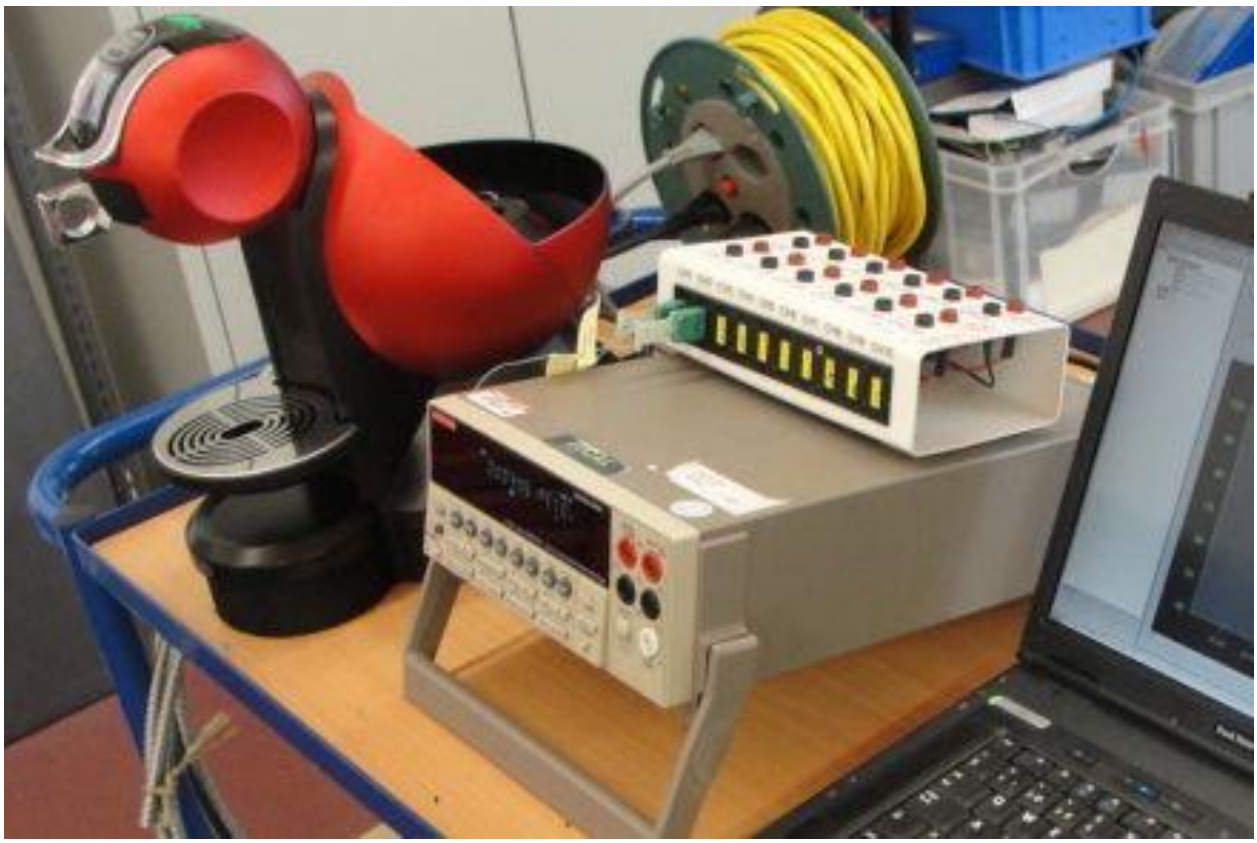

Fig. 13c Funktionsmuster der Kaffeemaschine mit eingebautem Thermoblock in Dewar, Aufbau zur Messung der Abkühlkurve

3.3 Funktionsmuster testen

3.3.1 Funktionsmuster mit Vakuum-Rohr

Für erste thermische Versuche wurde ein Funktionsmuster gebaut, bei welchem - wie in Fig. 12d ersichtlich - das Vakuum-Rohr, auch nach dem Schliessen der Kaffeemaschine mit dem roten Teil, mittels der Absaugleitung mit der Vakuumpumpe verbunden blieb und permanent auf 10^{-6} mbar abgesaugt werden konnte. Damit wurde sichergestellt, dass die Resultate der ersten thermischen Messungen nicht durch ein allfälliges schlechter werden des Unterdruckes im Vakuum-Rohr verfälscht werden konnten. Mit einem derartigen Funktionsmuster wurde die bereits in Fig. 6 und Fig. 9 (Messung FuMu Rohr) gezeigte und hier nochmals in Fig. 14 dargestellte Abkühlkurve mehrfach gemessen. Weiter wurden die steady-state Verluste der Maschine bei konstant auf 91°C gehaltenem Thermoblock bestimmt.

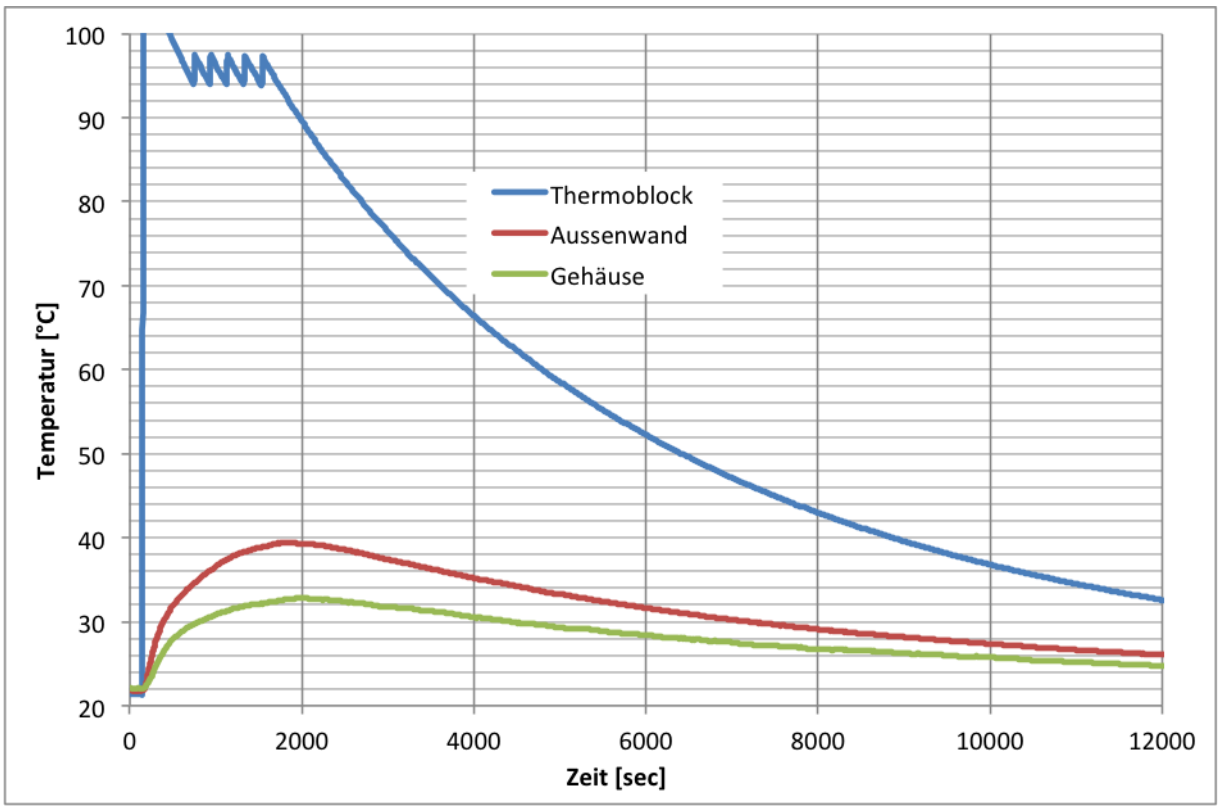

Fig. 14 Abkühlkurve des mit Vakuum-Rohr isolierten Thermoblockes

Der Vergleich der mit dem Funktionsmuster mit Vakuum-Rohr gemessenen Abkühlkurve mit anderen Isolationsarten in Fig. 6 und Fig. 9 macht deutlich, dass mit dem geschilderten Aufbau zwar eine Verbesserung des thermischen Verhaltens gegenüber dem nicht isolierten Thermoblock erreicht ist, dass diese aber bei weitem nicht genügt.
Wie bereits in Abschnitt 3.2 besprochen ist dieses ungenügende thermische Verhalten des Funktionsmusters darauf zurückzuführen, dass von unserem Produktionspartner statt der ursprünglich geplanten Stärke der Rohrinnenwand von 0.1 mm eine minimale Stärke von 0.2 mm verwendet werden musste. Durch weitere notwendige Kompromisse resultierte zusätzlich eine Verkleinerung des freien Überstandes über die Höhe des Thermoblockes von geplanten 2*20 mm auf lediglich 2*10 mm.

Geplant waren weitere thermische Messungen mit Funktionsmustern, bei welchen das Vakuum-Rohr evakuiert und dauerhaft verschlossen werden sollte. Damit das Vakuum in einem verschlossenen Behältnis über lange Zeit bei genügend tiefen Unterdrücken (< 10^{-3} mbar) erhalten bleibt, müssen die in bzw. an den Stahlwände des Behältnisses absorbierten bzw.

adsorbierten Gase entfernt werden. Dies gelingt beispielsweise durch Evakuieren mit auf mindestens 400°C besser aber 500°C aufgeheizten Wänden.
Die Versuche dies zu realisieren sind misslungen. Wie in Fig. 15 ersichtlich ist das auf 500°C aufgeheizte Vakuum-Rohr durch Beulen kollabiert.
Bei nachträglicher Betrachtung ist dieses Verhalten erklärbar. Wie in Abschnitt 3.1 (Fig.11b) besprochen, liegt die berechnete Sicherheit des gebauten Vakuum-Rohrs gegen Beulen bei dem Faktor 1.7, was bedeutet, dass bei 1.7-fachem Luftdruck ein Beulen der Aussenwand des Rohrs zu erwarten ist.
Die Tatsache, dass das nicht aufgeheizte Rohr bei dauerndem Abpumpen auf 10^{-6} mbar nicht kollabiert bestätigt diese Berechnung. Das Kollabieren des aufgeheizten Rohrs ist durch zusätzliche thermische Spannungen zu erklären.
Durch ein Vorgehen wie in Abschnitt 2.3.2 skizziert lässt sich dies vermeiden. Bei einem derartigen Vorgehen befindet sich das aufgeheizte Rohr gesamthaft in einer Vakuumkammer. Das verschlossene Rohr kann dann im Vakuum so weit abgekühlt werden, bis die thermischen Spannungen verschwunden sind und erst zu diesem Zeitpunkt dem atmosphärischen Druck ausgesetzt werden.

Da das thermische Verhalten des gebauten Vakuum-Rohrs aber den Anforderungen nicht genügt, haben wir im Rahmen dieser Arbeit auf den Bau einer derartigen, aufwendigen Vorrichtung zum Evakuieren des Rohres verzichtet.

Fig. 15 Beim Evakuieren mit auf 500°C aufgeheizten Wänden kollabiertes Vakuum-Rohr

3.3.2 Funktionsmuster mit Dewar

Mit dem in Fig. 13 gezeigten Funktionsmuster wurde die bereits in Fig. 6 und Fig. 9 (Messung FuMu Dewar) gezeigte und hier nochmals in Fig. 16 dargestellte Abkühlkurve mehrfach gemessen. Weiter wurden die steady-state Verluste der Maschine bei konstant auf 91°C gehaltenem Thermoblock bestimmt.

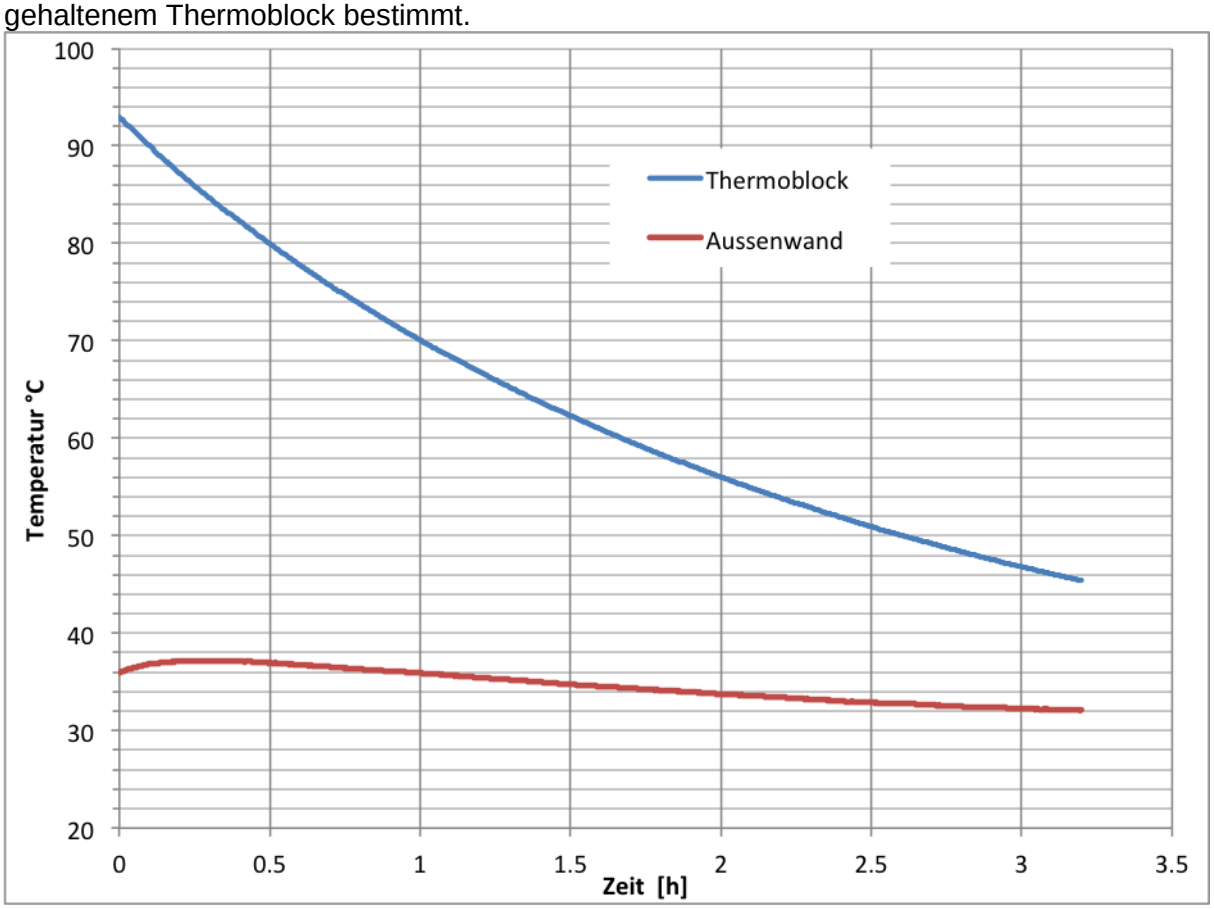

Fig. 16 Abkühlkurve des mit einem Dewar isolierten Thermoblocks

Der Vergleich der mit dem Funktionsmuster mit Dewar gemessenen Abkühlkurve mit anderen Isolationsarten in Fig. 6 und Fig. 9 macht deutlich, dass mit dem geschilderten Aufbau zwar eine Verbesserung des thermischen Verhaltens gegenüber dem mit Vakuum-Rohr isolierten Thermoblock erreicht ist, dass diese aber noch nicht genügt.
Wie bereits in Abschnitt 3.1 gesagt, sind die Aussenabmessungen des verwendeten Dewars deutlich zu gross und auch die Wandstärke liegt mit ca. 0.4 mm deutlich oberhalb den im Endeffekt angestrebten 0.1 mm. Das ungenügende thermische Verhalten des Funktionsmusters ist damit einerseits auf die deutlich zu hohe Wärmeleitung entlang der inneren Dewarwand und anderseits auf die deutlich zu grosse, zu viel Wärme an die Umgebung abgebende, Aussenfläche des Dewars zurückzuführen.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Im Bezug auf die vorgängige, vom September 2009 bis Mai 2010 durchgeführten Machbarkeitsstudie "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte" (BFE Projekt Nr. 103290) konnten im Rahmen dieser Arbeit folgende Fortschritte erarbeitet werden:

- Das Funktionsmuster einer äusserlich und im Gesamtaufbau nur unwesentlich veränderten Dolce Gusto Kaffeemaschine konnte realisiert werden, wobei der modifizierte Thermoblock dieses Funktionsmusters mit einer Dewar-ähnlichen Vakuum-Isolation versehen ist. Das thermische Verhalten des Funktionsmusters entspricht der Zielsetzung "mittel" des in Abschnitt 1.4 erarbeiteten Lastenheftes, was bedeutet, dass gemäss "TopTen" konformen Berechnungen der Jahresverbrauch auf ca. 28 kWh/a gesenkt ist. Dies bedeutet eine Energieeinsparung von ca. 12.6 kWh/a bezüglich der Referenz Dolce Gusto Maschine und eine solche von 4.4 kWh/a bezüglich der gemässe "TopTen Stand Nov. 2010" besten espressofähigen Kaffeemaschine am Markt. Diese Energieeinsparung wird ohne wesentliche Komfort-Einbusse erreicht, weil trotz des sofortigen Abschaltens des Stroms nach dem Bezug von Kaffee die Wartezeiten zum wieder Aufheizen des Thermoblockes sehr klein bleiben.
- Die durch Testmuster und weitere Funktionsmuster verifizierten und auf optimale Auslegung der Vakuum-Isolation extrapolierten Berechnungen zeigen, dass der Energieverbrauch - ohne Einbusse an Komfort - mit einer optimierten Isolation vom Typ "Vakuum-Rohr" auf ca. 27 kWh/a und mit einer vom Typ "Dewar" auf ca. 26 kWh/a gesenkt werden kann. Dies entspricht den Zielsetzungen "gross" bzw. "sehr gross" des Lastenheftes. Bezogen auf den theoretisch minimalen Energieverbrauch von ca. 19.2 kWh/a, der zum Aufheizen der 6 * 120 g Wasser der 6 "TopTen"-Kaffeetassen um 65°C notwendig ist, entsprechen diese Energieverbräuche den Wirkungsgraden von 70% bzw. 75%.
- Die Überlegungen zur Konstruktion und Fertigung einer Kaffeemaschine mit konventionell oder mittels Vakuum isoliertem Thermoblock zeigen, dass der Einbau einer solchen Isolation ohne wesentliche Änderung des bisherigen Aufbaus der Kaffeemaschinen realisierbar ist. Dies bedeutet, dass sämtliche Komponenten sowie die mechanischen und elektrischen Schnittstellen zwischen denselben im Wesentlichen unverändert übernommen werden können. Es bedeutet aber auch, dass die Gestehungskosten der thermisch isolierten Kaffeemaschine lediglich durch das Zusatzelement "Isolation" leicht gesteigert werden.
- Überlegungen zur allfälligen Massen-Fertigung einer Dewar-ähnlichen Vakuum-Isolation machen es wahrscheinlich, dass ein solches Element bei einem etablierten Hersteller von Vakuumflaschen bzw. Vakuumbechern zu produzieren wäre. Praktisch alle Hersteller derartiger Bauteile produzieren heute in China. Als einziger zu lösender Problempunkt könnte sich hierbei unsere Forderung nach einer Innenwand des Stahl-Dewars mit maximal 0.1 mm Dicke erweisen.
- Entsprechende, relativ weit vorangetriebene, im Bericht aber nur grob skizzierte Überlegungen zur allfälligen Massen-Fertigung eines Vakuum-Rohrs zeigen, dass sehr kostengünstige Verfahren zur Fertigung dünnwandiger Doppelwandrohre existieren. Auf Basis dieser Verfahren scheint es wahrscheinlich, dass die Kosten zur Herstellung eines hochwertigen Vakuum-Rohrs unter schweizerischen Fertigungsbedingungen in der Grössenordnung von CHF 1.00 zu liegen kommen und damit der Einsatz einer derartigen Isolation nicht nur energetisch sinnvoll, sondern auch wirtschaftlich tragbar wäre.

Ausblick

Die Resultate der durchgeführten Studie zeigen, dass eine Vakuumspalt-Isolation des Thermoblockes - oder des Durchlauferhitzers - einer Kaffeemaschine erhebliche energetische Vorteile bringt. Diese Vorteile können ohne jegliche Einbusse an Benutzer-Komfort realisiert werden, beispielsweise müssen auch bei sofortigem automatischem Abschalten der Stromzufuhr nach Bezug eines Kaffees keine und nach einer anschliessenden Wartezeit von einer Stunde keine längeren Aufheizzeiten bis zur Bereitschaft der Maschine in Kauf genommen werden.
Da dies aller Voraussicht nach mit einer sehr geringen Erhöhung der Herstellkosten machbar ist, sieht sich Helbling Technik AG nun in der Lage auf seine Kunden in der Branche zuzugehen und mit diesen ein entsprechendes konkretes Entwicklungsprojekt anzugehen.