



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht** 30. Juni 2012

---

# **Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte Zylindrische Anwendungen**

---

**Auftraggeber:**

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

**Auftragnehmer:**

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

**Autoren:**

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

<b>BFE-Bereichsleiter:</b>	Dr. Michael Moser
<b>BFE-Programmleiter:</b>	Roland Brüniger
<b>BFE-Vertrag Nr:</b>	SI/500552-02

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

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Ausgangslage	5
Ziel der Arbeit	6
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	7
vorbereitende Arbeiten	7
Zylindrischer Kühlschranks	7
Aufbau gemäss dem neusten Stand des Wissens	7
Zylindrischer oder kubischer Kühlschranks	9
Energiesparpotenzial Boiler	10
Entscheidung zwischen zylindrischem Kühlschranks und Boiler	11
Stand der Technik Boiler	12
Patentrecherche Boiler	15
Lastenheft	16
Konzeption Serientyp	18
Varianten suchen und vertiefen	18
Optimale Boiler Dimension	18
Variante Vakuumrohr mit 2 PIR-Stopfen	20
Variante Dewar mit PIR-Stopfen	22
Variante mit Vakuum rundum	24
Aufhängung des Boilers mit Vakuumspalt	26
Varianten thermisch berechnen und bewerten	27
Strukturmechanische Grobauslegung (FEM)	29
Mögliche Fertigungstechnologie	33
Herstellkosten abschätzen	35
Konzeptvarianten bewerten	37
Funktionsmuster	38
Konstruktion	38
Fertigung	40
Messungen	41
Messaufbau	41
Messresultate	42
Diskussion und Schlussfolgerungen	45
Ausblick	45

# Zusammenfassung

Die Arbeit konzentriert sich auf die Anwendung eines Vakuumpaltes zur thermischen Isolation von zylindrischen Körpern. In konzeptionellem Sinne geschieht dies für Kühlschränke, während für Boiler die Untersuchung bis zu produktionsnahen Funktionsmustern vorangetrieben wird. Es zeigt sich, dass die Isolation von Boilern gegenüber den heute Besten eine Reduktion der Wärmeverluste durch die Isolation von bis über 80% bringen kann. Eine entsprechende Vakuumpalt-Isolation kann beispielsweise mit einem doppelwandigen Rohr aufgebaut sein, welches einen zylindrischen Boiler umschliesst. Die Hohlräume oberhalb und unterhalb des Boilers sind beispielsweise mit PIR-Stopfen isoliert. FEM-Berechnungen und Funktionsmuster haben gezeigt, dass ein solches Rohr mit einer Wandstärke von 0.15 mm auf der Innenseite und einer Stärke von 0.4 mm auf der Aussenseite aufgebaut sein kann. Mit dieser Bauweise ist nicht nur ein akzeptables Gewicht der Isolation erreichbar, sondern auch die Preise bleiben voraussichtlich im gewünschten Rahmen.

## Abstract

In this study, we investigate the use of a vacuum gap to thermally insulate cylindrical bodies. This is done on a conceptual level for refrigerators. For domestic water heaters (boilers), the investigations have led to a functional prototype close to production level. It could be shown that for the best-insulated boilers available today, thermal loss across the insulation of the tank's walls can be reduced by up to 80%.

A vacuum isolation gap can be implemented for instance using a double-walled tube enclosing a cylindrical water tank. The empty spaces below and above the water tank are filled and isolated using a PIR plug. Finite element simulations and functional prototypes have shown that such a tube can be built with thicknesses of 0.15 mm for the inner wall and 0.4 mm for the outer wall.

Using this approach, not only the weight for the insulation remains acceptable but also the cost will presumably remain within the desired range.

## Résumé

Ce travail présente une méthode d'isolation thermique de corps cylindriques par le vide. Deux applications ont été étudiées : le réfrigérateur et la chaudière (boiler). Pour le réfrigérateur, l'étude est au niveau conceptuel, tandis que pour le boiler, les recherches ont conduit jusqu'à un modèle fonctionnel et industrialisable.

Il a été montré qu'une isolation par le vide peut réduire les pertes thermiques à travers la paroi d'un boiler de 80% par rapport aux meilleurs appareils actuellement sur le marché.

Une isolation par le vide peut être réalisée sous forme d'un grand tube à paroi double, à l'intérieur duquel se trouve le boiler. Les espaces vides au-dessous et au-dessus du boiler sont isolés par exemple avec un bouchon en PIR.

Les calculs par éléments finis et les modèles fonctionnels ont montré qu'un tel tube à paroi double peut être réalisé avec une paroi intérieure de 0.15 mm d'épaisseur et une paroi extérieure de 0.4 mm.

En utilisant cette approche, non seulement le poids de l'isolation reste acceptable mais aussi les coûts n'excèdent pas la limite envisagée.

# 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 zylindrischen Kühlschränken folgende Zusammenfassung gemacht werden:

- 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 Stahl 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%.
- 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.

In der Zeit, die zwischen der Einreichung und dem Beginn dieses Nachfolgeprojektes verging, sind wir zum Schluss gekommen, dass es lohnend sein könnte bezüglich zylindrischer Haushaltsgeräte den Schwerpunkt vom Kühlschrank auf den Boiler zu verlagern.

Dies aus folgenden Gründen:

- Der gesamthafte Energieaufwand in der Schweiz für Boiler ist ungleich viel höher als für Kühlschränke, womit Boiler ein deutlich höheres Sparpotential bieten.
- Die oben zitierten Resultate lassen sich zu 100% vom zylindrischen Kühlschrank auf den Boiler übertragen, wobei die Vakuumspalt-Isolation für Boiler einfacher realisierbar ist.
- Unsere Arbeit am etwas früher begonnenen Nachfolgeprojekt "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte - Technologieabklärung für Vakuumpanels" hat im erwähnten Zeitraum gezeigt, dass eine Machbarkeit von Vakuumspalt-Isolation mit ebenen Wänden mit grosser Wahrscheinlichkeit kostengünstig machbar sein wird. Damit wird auch ein entsprechender kubischer Kühlschrank mit Vakuumspalt-Isolation machbar, womit die doch eher ungewöhnliche zylindrische Form für einen Kühlschrank nicht mehr sonderlich attraktiv scheint.

# Ziel der Arbeit

In der Arbeit wurden im Detail die folgenden Zielsetzungen erreicht:

- 1 vorbereitende Arbeiten
  - 1.1 Aufbaumöglichkeit zylindrischer Kühlschranks mit Vakuumspace
  - 1.2 Energiespar-Potential Boiler
  - 1.3 Entscheidung zwischen zylindrischem Kühlschrank und Boiler
  - 1.4 Stand der Technik Boiler
  - 1.5 Patentrecherche Boiler
  - 1.6 Lastenheft für Boiler mit Vakuumspace
  
- 2 Konzeption Serientyp
  - 2.1 Varianten suchen und vertiefen
  - 2.2 Strukturmechanische Grobauslegung (FEM) durchführen
  - 2.3 Fertigungstechnologie definieren
  - 2.4 Herstellkosten abschätzen
  - 2.5 Konzeptvarianten bewerten
  
- 3 Funktionsmuster
  - 3.1 Funktionsmusterkonstruktion erstellen
  - 3.6 Funktionsmuster fertigen
  
- 4 Versuche
  - 4.1 Versuchsplanung erstellen
  - 4.2 Messungen durchführen

# Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

## 1 Vorbereitende Arbeiten

### 1.1 Zylindrischer Kühlschrank

#### 1.1.1 Aufbau gemäss dem neusten Stand des Wissens

Die allfällige Brauchbarkeit eines zylindrischen Kühlschranks hängt in hohem Masse davon ab, ob es gelingt denselben so aufzubauen, dass der - gegenüber einem konventionellen kubischen A++ Kühlschrank - formbedingte Verlust an Nutzvolumen vollständig durch eine dünnere Wand kompensiert wird.

Im Schlussbericht vom 31. Mai 2010 der vorgängigen Arbeit "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten" haben wir gezeigt, dass dies gelingt, wenn die gesamte Wanddicke eines mit Vakuumspalt isolierten zylindrischen Kühlschranks ca. 15 bis 16 mm beträgt.

Da sich ein mit Vakuumspalt isolierter zylindrischer Kühlschrank aus zwei sich grossflächig überlappenden, gegeneinander rotierbaren Zylinderkörpern aufbaut, setzt sich diese Wandstärke aus zwei Vakuumspalten mit Begrenzungsflächen und einem Zwischenspalt zusammen.

Bei der Annahme, dass die Dicke der Begrenzungsflächen in Summe ca. 1 mm beträgt, dürfen damit die Vakuumspalte und der Zwischenabstand je 5 mm betragen.

Da im Vakuumspalt grossflächiger Geräte mindestens eine zusätzliche Aluminiumfolie zur Strahlungsminderung angebracht werden muss, ist bei einem derart geringen Wandabstand im Innern des Vakuumspalts kein Platz für allfällige Verstärkungsrippen.

In Abschnitt 2.2 der vorliegenden Arbeit werden wir zeigen, dass die dünne Aussenwand eines doppelwandigen für einen Kühlschrank dimensionierten Rohrs mit Vakuumspalt aus Stabilitätsgründen nur dann ohne zahlreiche Verstärkungsrippen aufgebaut werden kann, wenn sie mit wellenartig umlaufenden Sicken versehen ist. Dies verbietet sich für den zylindrischen Kühlschrank aber aus den oben genannten Platzgründen.

Es bleibt nur eine Lösung bei der die beiden Begrenzungsflächen des Vakuumspalts nicht frei tragend sind, sondern sich mittels Distanzhaltern gegeneinander abstützen.

Im Schlussbericht zum BfE-Projekt "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte, Technologieabklärung für Vakuumpanels, 2011" haben wir gezeigt, dass mittels des Parallel-Filament-Prinzips oder des Ball-Prinzips tragfähige Distanzhalter machbar sind, mit denen ein Wärmedurchgangskoeffizient durch die Summe der Distanzhalter von  $0.005 \text{ W/m}^2\text{K}$  realisierbar ist. Da der in der vorgängigen Arbeit bestimmte Wärmedurchgangskoeffizient für einen zylindrischen Kühlschrank mit Vakuumspalt in der Grössenordnung von  $0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$  liegt, ist der durch derartige Distanzhalter verursachte zusätzliche Energietransport also nahezu vernachlässigbar.

Figur 1a zeigt die Prinzipskizze eines entsprechend aufgebauten zylindrischen Kühlschranks in geschlossenem Zustand und Figur 1b einen vergrösserten Ausschnitt daraus.

Der Kühlschrank besteht aus zwei zylinderartigen  $\frac{3}{4}$ -Rohren mit Vakuumspalt. Er steht auf dem PIR-Stopfen welcher das innere Vakuumrohr gegen unten abschliesst. Nicht sichtbar ist ein entsprechender oberer PIR-Abschluss des inneren Vakuumrohrs. Das äussere Vakuumrohr ist um das innere rotierbar, wobei eine Rotation um  $180^\circ$  eine vollständige Öffnung des Kühlschranks bewirkt. Als formgebende Elemente besitzt jedes Vakuumrohr zumindest am unteren und obe-

ren Ende einen rundum laufenden Stahlring. Bei hohen Aufbauten können auf mittlerer Höhe weitere derartige Stahlringe vorhanden sein.

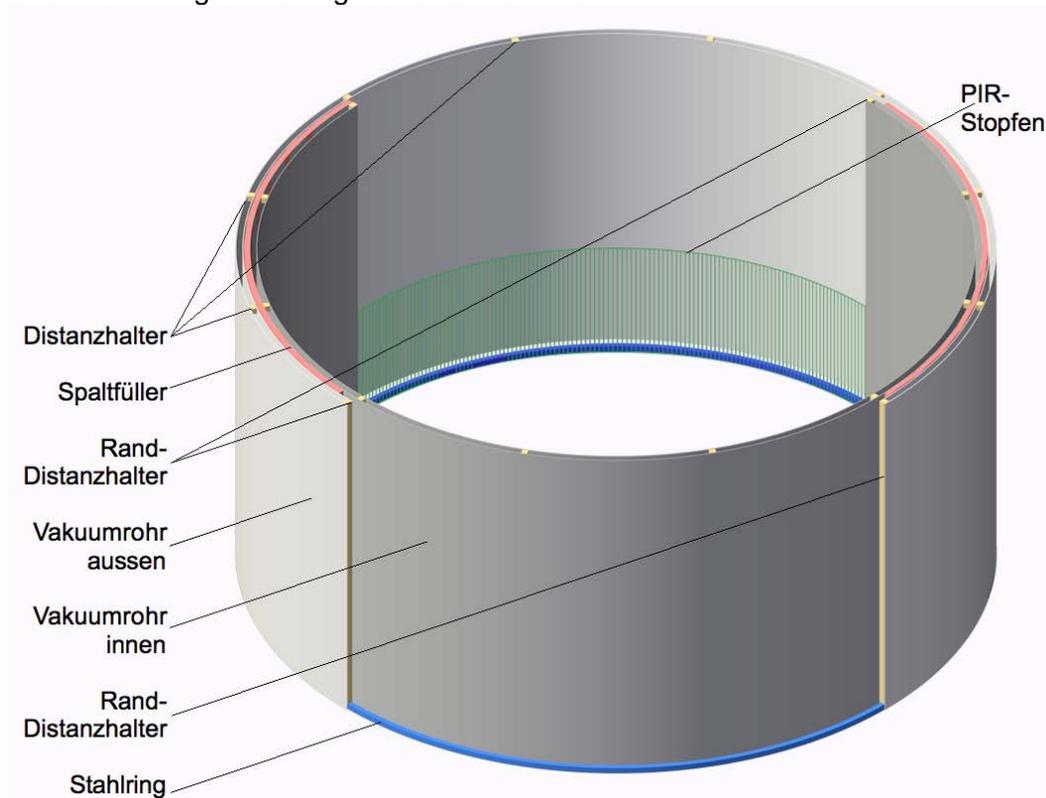


Fig. 1a Prinzipskizze des Horizontal-Schnitts durch die Aussenhülle eines zylindrischen Kühlschranks mit Vakuumpspalt-Isolation

Die Begrenzungswände der Vakuumpspalte werden mit Distanzhaltern gegen den Luftdruck auseinander gehalten. Die Distanzhalter dienen zusätzlich als Halterungen der für die Strahlungsminderung notwendigen Alu-Folien.

Als eine Verbesserung gegenüber den in der Vorgängerarbeit diskutierten Aufbauten sind die in Höhenrichtung verlaufenden Kanten der  $\frac{3}{4}$ -Rohre mit beispielsweise nach dem Parallel-Filament-Prinzip aufgebauten Rand-Distanzhaltern versehen, was den Energieverlust über diese Ränder stark vermindert.

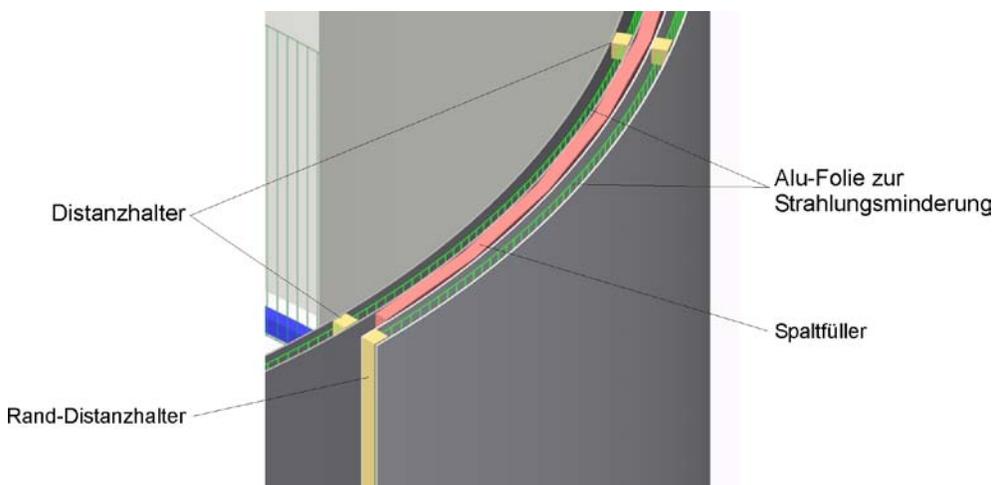


Fig. 1b Ausschnitt aus Fig. 1a

Zusätzlich wird der Energieverlust über diese Ränder von der in geschlossenem Zustand des Kühlschranks sehr grossen Überlappung des inneren und äusseren Vakuumrohrs vermindert. Entscheidend hierfür ist, neben der Stärke der Edelstahlwände, der Wärmetransport durch den Luftspalt zwischen den beiden Vakuumrohren. Mit den im Bericht vom 30. Juni 2011 "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten - Kaffeemaschinen" gezeigten Formeln für den Luftspalt, lässt sich zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit für den Luftspalt des Kühlschranks ca. 0.2 W/mK betragen würde, womit ein erheblicher Energieverlust verbunden wäre. Aus diesem Grunde ist in den Figuren 1 ein Spaltfüller skizziert, der folgende Eigenschaften haben muss: eine geringe Reibung zwischen den Stahlwänden, eine geringe Festkörper-Wärmeleitung von Stahlwand zu Stahlwand und die Fähigkeit, den Luftspalt in zahlreiche kleine Kammern zu unterteilen um so bezüglich der im Spalt vorhandenen Luft die Wärmeleitfähigkeit von stehender Luft (ca. 0.025 W/mK) zu realisieren. Ein entsprechender Spaltfüller ist auch im offenen Bereich des inneren  $\frac{3}{4}$ -Vakuumrohrs zwischen den PU-Stopfen und dem äusseren Vakuumrohr anzubringen.

Realisierbar ist dieser Anforderungskatalog beispielsweise durch den Einsatz eines einseitig kaschierten Glaswollevlieses oder durch Verwendung eines textilen Abstandsgewirkes.

### 1.1.2 Zylindrischer oder kubischer Kühlschrank

Während der oben zitierten Vorgängerarbeit haben wir uns entschlossen, den zylindrischen Kühlschrank ernsthaft zu untersuchen, weil damals berechtigte Zweifel bestanden, dass eine kostengünstige, thermisch gute Lösung für die zwischen ebenen Wänden unbedingt notwendigen Distanzhalter gefunden werden könne.

Nachdem wir einerseits im BfE-Projekt "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte, Technologieabklärung für Vakuumpanels" spätestens seit Juli 2011 absehen konnten, dass dies mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mittels der Ansätze "Ball-Prinzip" oder "Parallel-Filament-Prinzip" möglich sein wird und andererseits - wie oben besprochen - der zylindrische Kühlschrank ebenfalls Distanzhalter benötigt, haben wir den zylindrischen Kühlschrank wieder in Frage gestellt. Tabelle 1 zeigt die entsprechenden Überlegungen.

Eigenschaft	kubischer Kühlschrank	zylindrischer Kühlschrank
Vakuumspalt realisierbar?	ja	ja
Energieeinsparung bez. üblichem A++	sehr hoch	hoch
Wanddicke total	kleiner 10 mm möglich	mindestens 15 mm
Nutzraumgewinn bez. üblichem A++	ca. 40%	max. 10 %
erreichbares Marktvolumen	sehr hoch	klein
Markt-Akzeptanz	sehr hoch	unbekannt
Aufwand zur Realisierung Serientyp	hoch	sehr hoch
Aufwand Realisierung Funktionsmuster	hoch	sehr hoch

Tab. 1 kubischer versus zylindrischer Kühlschrank mit Vakuumspalt

Die Realisierungs-Aufwände wurden für den zylindrischen Kühlschrank jeweils als deutlich höher eingeschätzt, weil hierfür mit neuen Konstruktionen die fast reibungsfreie Rotierbarkeit eines Vakuumrohrs sichergestellt werden muss, während beim kubischen Kühlschrank zusätzlich zum Vakuumspalt keine neuen unbekanntenen Bauelemente entworfen werden müssen.

Tabelle 1 zeigt deutlich, dass der kubische Ansatz - zumindest im jetzigen Zeitpunkt - in jeder Hinsicht vorzuziehen ist, so dass es für den Moment vernünftig scheint, sich bezüglich Kühlschränken auf diese übliche Form zu beschränken.

Wie wir in den folgenden Abschnitten am Beispiel Boiler zeigen werden, bedeutet dies aber keinesfalls, dass eine zylindrische Vakuumpalt-Isolation nicht für andere Geräte sinnvoll ist.

## 1.2 Energiesparpotenzial Boiler

Die Erkenntnisse bezüglich der Vakuumpalt-Isolation für den zylindrischen Kühlschrank, waren von vorneherein dafür vorgesehen auch auf andere Haushaltsgeräte, wie beispielsweise zylindrische Boiler, übertragen zu werden.

Zu Beginn des Projektes haben wir deshalb die Energiesparpotenziale zusammengestellt, die mit diesen Geräten verbunden sind. Hilfreich hierzu ist die in Figur 2 gezeigte grafische Statistik-Darstellung des BfE vom Jahre 2009. (UVEC, BfE: Dezember 2010, Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2009 nach Verwendungszwecken)

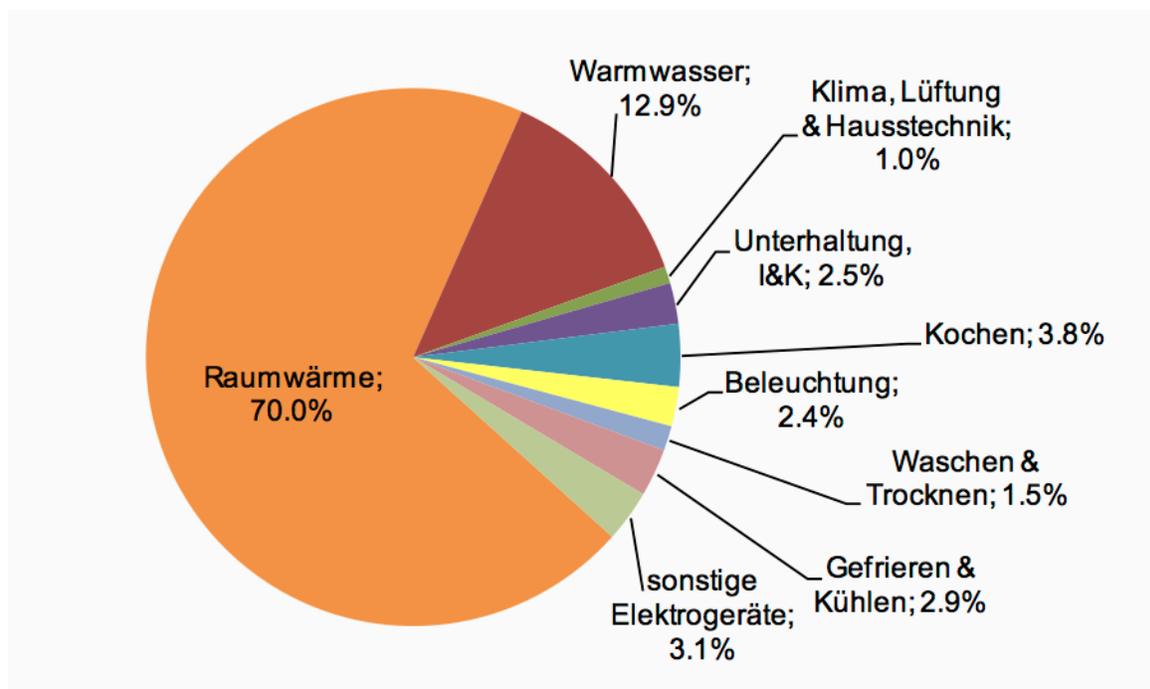


Fig. 2 BfE: Prozentuale Verwendung von Energie in schweizerischen Haushalten 2009

Es ist offensichtlich, dass von den 30% nicht für Raumwärme verbrauchten Energiemengen die Warmwasseraufbereitung mit 43% ( $=100 * 12.9 / 30$ ) dieses Restes bei weitem dominiert, während auf Gefrier- und Kühlgeräte lediglich ca. 9.7% ( $=100 * 2.9 / 30$ ) dieses Restes entfallen. Da nicht zu erwarten ist, dass ein zylindrischer Kühlschrank hohe Marktanteile dieser 9.7% erobern wird, steht es in energetischem Sinne ausser Frage, dass es sinnvoll ist, sich bezüglich der Isolation von zylindrischen Geräten zunächst auf Boiler zu konzentrieren.

### 1.3 Entscheidung zwischen zylindrischem Kühlschrankschrank und Boiler

Wenn wir im Folgenden von zylindrischen Boilern sprechen, soll dieser Begriff nicht nur kreiszylindrische Aufbauten, sondern auch - marktübliche - Aufbauten mit stark verrundeten "Ecken" und mit gekrümmten Seitenwänden beinhalten.

Im Übrigen gehen wir davon aus, dass sich die Erkenntnisse bezüglich Boilern quasi 1:1 auf zylindrische Wärme- oder Kältespeicher jeglicher Art übertragen lassen. Dies bedeutet, dass entsprechende Isolationen für Wärmespeicher im Bereich der Solarenergie oder für zu isolierende Tankfahrzeuge aller Art oder für zu heizende bzw. zu kühlende industrielle Anlagen von hohem Interesse sein können.

Für eine Entscheidung welche der beiden zylindrischen Anwendungen der Vakuumpalt-Isolation, zylindrischer Kühlschrankschrank oder Boiler im laufenden Projekt weiterverfolgt werden soll, wurde die in Tabelle 2 gezeigte Tabelle zusammengestellt.

Eigenschaft	Boiler	zylindrischer Kühlschrankschrank
Vakuumpalt realisierbar?	ja	ja
Energieeinsparung bez. üblichem Top-Gerät	sehr hoch	hoch
Energieeinsparpotential "global"	sehr hoch	sehr klein
Wanddicke total	kleiner 15 mm möglich	mindestens 15 mm
Nutzraumgewinn bez. üblichem Top-Gerät	abhängig von Baugrösse 10% bis 40%	max. 10 %
erreichbares Marktvolumen	sehr hoch	klein
Aufwand zur Realisierung Serientyp	hoch	sehr hoch
Aufwand zur Realisierung Funktionsmuster	mittel	sehr hoch
Erfolgswahrscheinlichkeit im laufenden Projekt	hoch	klein

Tab. 2 zylindrischer Kühlschrankschrank mit Vakuumpalt versus Boiler mit Vakuumpalt

Zusammen mit Tabelle 1 ergibt sich ein eindeutiges Bild. Im Rahmen des laufenden Projektes ist es vernünftig als zylindrische Anwendung der Vakuumpalt-Isolation den Boiler weiter zu verfolgen. Dies auch insbesondere der Tatsache wegen, dass wir - des in Abschnitt 1.2.1 besprochenen aufwendigen Aufbaus wegen - das Risiko am Ende des relativ kleinen Projektes einen nicht aussagekräftigen Funktionsmuster-Aufbau zu haben bezüglich des zylindrischen Kühlschrankschrankes als wesentlich höher einstufen.

In Absprache mit den Herren des Bundesamtes für Energie haben wir uns deshalb entschlossen, in Rahmen dieses Projekts die Vakuumpalt-Isolation eines Boilers weiter zu verfolgen.

## 1.4 Stand der Technik Boiler

Um uns einen Überblick über den Stand der Technik bezüglich Boilern zu verschaffen, haben wir die Studie der Europäischen Union "Eco-design of Water Heaters" ( [http://ec.europa.eu/energy/efficiency/studies/ecodesign\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/studies/ecodesign_en.htm) ) sorgfältig studiert. Im Folgenden stellen wir die für unser Projekt, d.h. für eine verbesserte thermische Isolation besonders wichtigen Resultate zusammen.

Boiler bzw. Warmwasser-Heizer werden in der Studie unterschieden nach:

Art:

- Electrical und non-electrical (gas, oil, ....)
- Durchlauf- und Speicher-Heisswasser-Erzeuger
- unabhängige oder mit der Heizung kombinierte water heaters (WH)
- Gesamt-Wirkungsgrad bzw. Verlustenergie (Bereitschaftsenergie) im Stillstand

und Grösse:

Bezeichnung:	XXS	XS	S	M	L	XL	XXL
Liter:	5-10	10-15	15-30	80	120	150	250
bzw. L/min	2	4	5	6	10	10	16

Interessant für die thermische Isolation sind vor allem die Speicher-Geräte, obwohl natürlich auch bei den Durchlauferhitzern eine Isolation zur Verbesserung des Wirkungsgrades beitragen kann. Die folgende Zusammenfassung beschränkt sich aber auf Speicher.

Bei elektrischen Geräten existieren in der Studie für instant und storage getrennte Zahlen, für nicht elektrische Geräte ist diese Unterscheidung leider nicht ganz klar.

Die Zahlen zeigen deutlich, dass:

- 2010 in der EU total ca. 17.7 Mio. Boiler jeder Art gekauft wurden.
- über 60% aller dieser Geräte Wasserspeicher-Geräte und deshalb unabhängig von der Art der Beheizung für eine verbesserte thermische Isolation besonders interessant sind.
- über 50% aller Speicher-Geräte elektrisch beheizt sind.

Wir schliessen daraus:

=> Das Potenzial zur Einsparung von Energie mittels verbesserter thermischer Isolation von Boilern ist riesig.

=> Wir beschränken uns auf die Betrachtung elektrisch beheizter Geräte.

Die Verteilung der storage-Geräte auf die verschiedenen Baugrößen sieht folgendermassen aus:

Bezeichnung:	XXS	XS	S	M	L	XL	XXL
Liter:	5-10	10-15	15-30	80	120	150	250
Anteil %	11%	6%	6%	33%	16%	11%	17%

An anderer Stelle des reports wird ausgesagt der Marktanteil der Grösse "M" betrage sogar über 50%.

=> In einem ersten Schritt kann man sich zur Abschätzung des Einsparpotenzials durch thermische Isolation auf die Grösse "M" mit 80 Liter Warmwasser-Volumen beschränken.

Ein wichtiger Wert zur Abschätzung dieses Einsparpotenzials ist die „Mischungs-Effizienz“, die im Wesentlichen ca. dem Verhältnis der Speichertemperatur zur Brauchwassertemperatur (=40°C) entspricht. Bei Speichertemperatur 65°C ist sie beispielsweise ca.  $65/40 = 1.6$

Die Werte des durchschnittlichen europäischen Verbrauchs von Heisswasser lassen sich der Tabelle 3 entnehmen.

**Table 2.1. Overview of tapping patterns in EN 13203-2 and prEN 50440 [VHK 2006]**

Size	(Unit)	XXS	XS	S	M	L	XL	XXL
No. pattern EN 13203-2	#			1	2	3	4	5
No. pattern prEN 50440	#	1c	1b	1/1a	2/2a	3/3a		
Application [typical, estimate VHK]		kitchen only (dishwasher-owner)	kitchen + manual dishwashing (very small shower)	single person (incl. small shower)	avg. family (2-4 persons)	large family (4-6 persons, )	very large family (>6 persons) and jacuzzi-owners	multi-family
Draw-off types [typical, estimate VHK]		washing hands, cleaning	kitchen, dishwash (very small shower)	kitchen, dishwash (small shower)	kitchen, showers, occasional bath	kitchen, showers, 2 baths a day	kitchen, showers, very large daily baths	kitchen, shower + bath (simultaneous)
Dwelling area [typical]	m2	n.a.	20-60	n.a.	40-150	100-200	150-300	200-400
Hot water volume/24h	litres/day	36	36	36	100	199	325	400

Tab. 3 Durchschnittliche Heisswasserverbräuche

Der von uns als Referenz gewählte 80 Liter Boiler (Baugrösse M) wird also im europäischen Durchschnitt von der 2 bis 4 Personen Familie eingesetzt und muss ca. 100 Liter Heisswasser pro Tag bereit stellen.

Zu berücksichtigen sind weiter die thermischen Verluste über die Leitungen, für die man gemäss der Studie bezüglich des Gesamtwirkungsgrad mit 15% annehmen kann.

Damit ergibt sich für die Baugrösse "M" ein Verbrauch von durchschnittlich 100 L/d und mit der Mischungs-Effizienz 1.6 ein täglicher Aufheizungsbedarf von 62.5 Litern Wasser von 25°C auf 65°C. Mit der Wärmekapazität 4.183 kJ/kgK erhält man so einen berechneten Wert für die notwendige Heizenergie  $P_H$ . Für die Baugrösse "M" beispielsweise

$$P_H = 4.183 \cdot 62.5 \cdot (65-25) = 104560 \text{ kJ/d oder } 2.9 \text{ kWh/d oder } 1060 \text{ kWh/a.}$$

Für die Berechnung der Nutzenergie muss diese Grösse noch mit den Leitungsverlusten korrigiert werden. Damit erhält man für die Nutzenergie  $P_U$  bei Boiler-Grösse "M"

$$P_U = 1060 / 0.85 = 1247 \text{ kWh/a.}$$

Bezüglich der Wärmeverluste durch die Speicherisolation, die Aufhängung und die Anschlüsse von Speicher-Wassererwärmern für die Baugrösse "M" lassen sich dem Bericht folgende Werte entnehmen:

Heutiger Normalfall = Basecase Losses bei Baugrösse "M" (@65°C)

$$BL = 487 \text{ kWh/a}$$

damit ist der gesamte Basecase Energiebedarf eines Boilers der Baugrösse "M"

$$P_{B-tot} = 1247 + 487 = 1734 \text{ kWh/a}$$

und der Basecase Verlustanteil des Boilers der Baugrösse "M" berechnet sich zu

$$\eta_V = BL / P_{B-tot} = 28\%$$

Für die besten heutigen - als "moderne" Speicher bezeichneten- Boiler wird im Bericht folgender kleinste Verlust durch die Isolation hindurch angegeben

$$ML = 240 \text{ kWh/a}$$

damit ist der gesamte "moderne" Energiebedarf eines Boilers der Baugrösse "M"

$$P_{M-tot} = 1247 + 240 = 1487 \text{ kWh/a}$$

und der "moderne" Verlustanteil des Boilers der Baugrösse "M" berechnet sich zu

$$\eta_V = BL / P_{M-tot} = 16\%$$

Der Wert für die "moderne" Verlustenergie ML wird beispielsweise auf der Webpage topprodukte.at bestätigt, von der wir in Tabelle 4 einen kleinen Auszug der energetisch besten 80 Liter Boiler zeigen. Der "Bereitschaftsstromverbrauch" ist die Strommenge, welche benötigt wird, um die Soll-Wassertemperatur eines Boilers, ohne Bezug von Warmwasser, konstant zu halten und ist deshalb gleich der Verlustenergie ML durch die Isolation. Wir stellen fest, dass nur das allerbeste auf der Webpage aufgeführte Gerät den im Bericht angegebenen Wert von ML = 240 kWh/a erreicht, womit dieser Wert offensichtlich einem best-case Wert gleichkommt und für den Vergleich mit den Verlusten durch eine Vakuumpalt-Isolation einen harte Basis bildet.

	Stiebel		AUSTRIA		
Marke	Eltron	Dimplex	EMAIL	AEG	Siemens
Modell	SH80S	ACH81E	EKH080U	DEM80	DG80015
Preisempfehlung €	-	690	700	744	529
Bereitschaftsstromverbrauch kWh/24h	0.66	0.7	0.71	0.72	0.85
Bereitschaftsstromverbrauch kWh/a	240	255	258	262	309
Inhalt	80	80	80	80	80

Tab. 4 Auszug von energetisch guten 80 L Boilern aus topprodukte.at (Nov.2011)

In Tabelle 5 sind berechnete Werte und die dem Bericht entnommenen Durchschnittswerte - "basecase" und "modern losses" - für die notwendige Nutzenergie und die Verlustenergie zusammengestellt.

Grösse		XXS	XS	S	M		L	XL		XXL
Volumen	Liter	10	15	30	80	100	120	150	200	250
Bedarf / d	Liter	36	36	36	100	150	199	325	350	400
Menge zu Heizen/d	Liter	22.5	22.5	22.5	62.5	93.8	124.4	203.1	218.8	250
Heizenergie P <sub>H</sub>	kWh/a	365	365	365	1060	1606	2117	3431	3723	4234
berechnete Nutzenergie P <sub>U</sub>	kWh/a	429	429	429	1247	1889	2491	4036	4380	4981
Nutzenergie basecase P <sub>U</sub>	kWh/a			400	1246					
basecase losses BL	kWh/a			244	487	500			743	
basecase Gesamtenergie P <sub>B-tot</sub>	kWh/a			637	1734	2389			5123	
basecase Verlustanteil η <sub>V</sub>	%			36%	28%	21%			15%	
modern losses	kWh/a	128	146	179	240	288	336	391	657	
"moderne" Gesamtenergie P <sub>M-tot</sub>	kWh/a			208	1487	2177			5037	
"moderne" Verlustanteil η <sub>V</sub>	%	26%	29%	29%	16%	13%	12%	9%	13%	

Tab. 5 nötige Nutzenergien und Verlustenergie

Für die Baugröße M (80 L) liegt der heutige Durchschnitt (basecase) der Verlustenergieanteile durch die Isolation bei ca. 28% und der heutige beste Fall bei 16%.

Heute übliche "moderne" Isolationsticken werden im Bericht mit 100 bis 130 mm Glaswolle, EPS ( $\lambda$  ca. 0.036 W/mK) angegeben, was ca. 85 mm PUR bzw. PIR ( $\lambda$  ca. 0.028 W/mK) entspricht. Die auf [topprodukte.at](http://topprodukte.at) für die Boiler in Tabelle 4 angegebenen Dimensionen lassen vermuten, dass diese Boiler mit PUR bzw. PIR, oder einem anderen Isolationsmaterial mit ungefähr dieser Isolationsticke und Wärmeleitfähigkeit isoliert sind.

Als weitere für eine Auslegung der Boiler wichtige Aussagen lassen sich aus dem Bericht die maximalen Drücken und Gewichte von elektrischen Speicher-Geräten herauslesen bzw. rechnen:

Bezeichnung:	XXS	XS	S	M	L	XL	XXL
Liter:	5-10	10-15	15-30	80	120	150	250
Druck [bar]	8	8	8	8	8	8	8
Gew.leer [kg]	5	8	16	29	38	42	64
Gew.voll [kg]	15	23	46	109	158	192	314

## 1.5 Patentrecherche Boiler

Auf <http://worldwide.espacenet.com> konnten wir keine Patente finden, die sich auf spezielle thermische Isolation von Boilern beziehen. Insbesondere erscheinen auch keine Patente bezüglich Boilern mit Vakuum-Isolation.

## 1.6 Lastenheft

Das Ziel ist ein Boiler, der - bei kleinerer Isolationsdicke, aber allenfalls grösserer Bauhöhe - wesentlich weniger Energie als die heute besten verbraucht. Dies so, dass der, für die vakuumisolierte Variante eines Boilers, bezahlte Mehrpreis über die Einsparung an Stromkosten in höchstens 10 Jahren zurückbezahlt ist.

Mittels des zitierten Stands der Technik lässt sich damit für einen 80 Liter Boiler das in Tab. 6 dargestellte Lastenheft ableiten. Der dort angenommene Strompreis ist als mittlerer Wert für die Schweiz der Webpage [www.strompreis.elcom.admin.ch](http://www.strompreis.elcom.admin.ch) aus der Verbrauchskategorie H4 für das Jahr 2012 entnommen.

Zielsetzung	Sehr Klein (S)	Klein (K)	Mittel (M)	Gross (G)
Maximum Höhenzunahme durch Vakuumpalt-Isolation [mm]	50	50	250	450
Maximum Gewichtzunahme durch Vakuumpalt-Isolation [kg]	10	10	10	10
<b>bezüglich "modern losses" (240 kWh/a) eingesparte Energie [kWh/a]</b>	<b>96 40%</b>	<b>144 60%</b>	<b>168 70%</b>	<b>192 80%</b>
dank Vakuumpalt-Isolation erreichter neuer Jahresverlust durch die Isolation [kWh/a]	144	96	72	48
<b>Ziel Rückzahlung Mehrkosten [Jahre]</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
Einsparung Stromkosten [CHF / a] (Annahme CHF 0.19 / kWh)	18	27	32	36
zulässige Erhöhung Verkaufspreis Boiler $\Delta VK$ [CHF]	182	246	255	292
Zulässige zusätzliche Herstellkosten für Vakuumpalt-Isolation $=\Delta VK/3$ [CHF]	61	82	85	97
Einsparung nach 20 Betriebs-Jahren [CHF]	180	300	380	440

Tab. 6: Lastenheft für die Vakuumpalt-Isolation eines 80 Liter Boilers

Rot und schwach markiert sind die nach Möglichkeit einzuhaltenden Zielsetzungen "Höhenzunahme" und "Gewichtzunahme".

Rot und fett markiert sind die beiden wichtigsten Zielsetzungen "Energieeinsparung" und "Amortisation der Mehrkosten", die unbedingt erfüllt sein sollten. Die nicht markierten Grössen leiten sich aus diesen beiden Zielsetzungen ab.

Wir sind - wie in Abschnitt 1.4 besprochen - bei der Festlegung dieser Zielsetzungen davon ausgegangen, der Boiler werde elektrisch beheizt.

Weil diese Art der Beheizung von Boilern vermehrt in Frage gestellt ist, wollen wir hier kurz auf eine modernere Art der Beheizung, d.h. auf diejenige mit Wärmepumpe eingehen, wobei wir davon ausgehen, die Zielsetzung "Mittel" lasse sich so wie in Tabelle 6 realisieren:

Geht man davon aus, es gäbe eine geeignete Wärmepumpe um einen 80 Liter Boiler mit direkter elektrischer Widerstandsbeheizung durch einen Wärmepumpenboiler zu ersetzen, so könnte der Aufwand an elektrischer Energie zur Erwärmung des Wassers - laut TopTen.ch - auf ca. 30% abgesenkt werden.

Mit den Werten aus Tabelle 5 würde sich dann für einen 80 Liter Boiler mit moderner (PIR-)Isolation folgender Wert ergeben:

$$P_{\text{tot}} = 0.3 \cdot 1487 = 446 \text{ kWh/a}$$

Der für die Kompensation der Verluste durch die PIR-Isolation aufzubringender Strom wäre dann:

$$\text{modern losses} = 0.3 \cdot 240 = 72 \text{ kWh/a.}$$

Entsprechend würde sich für den mit Vakuumpalt isolierten Wärmepumpenboiler die zur Kompensation der Jahresverluste notwendige elektrische Energie reduzieren. Für die Zielsetzung "Mittel" entnimmt man dem Lastenheft (Tabelle 6) beispielsweise 72 kWh/a welche sich mit dem Wärmepumpenboiler reduziert auf:

$$0.3 \cdot 72 = \text{ca. } 22 \text{ kWh/a}$$

Damit betrüge die durch Vakuumpalt-Isolation erreichbare Einsparung für einen gedachten 80 Liter Wärmepumpenboiler noch:

$$72 - 22 = 50 \text{ kWh/a bzw. ca. CHF 10 pro Jahr}$$

Ob unter diesen Umständen der Mehraufwand für Vakuumpalt-Isolation nicht nur in energetischer sondern auch in wirtschaftlicher Hinsicht zu rechtfertigen wäre, lassen wir im Moment offen. Wir werden aber im Abschnitt 2.4 "Kostenabschätzung" nochmals auf diese Frage zurückkommen.

## 2 Konzeption Serientyp

### 2.1 Varianten suchen und vertiefen

Da wir sicher sind, die Anforderungen des Lastenhefts einhalten zu können, gehen wir bei allen im Folgenden betrachteten Varianten davon aus, dass die gesamte Dicke der Vakuumpalt-Isolation, also die Summe der beiden Wandstärken plus dem Wandabstand, kleiner als 25 mm sei.

Erinnert man sich, dass zur Erreichung der zum Vergleich herangezogenen "modernen" Verlustenergie von 240 kWh/a eine PIR-Isolationsdicke von ca. 85 mm notwendig ist, so resultiert durch Einsatz der Vakuumpalt-Isolation eine Durchmesserabnahme von 120 mm, was erfreulich aber nicht überaus wichtig ist.

#### 2.1.1 Optimale Boiler Dimension

Wir beschränken uns im Rahmen dieser Arbeit auf die thermische Isolation zylindrischer Boiler. Dies hat bezüglich einer Vakuumpalt-Isolation den Vorteil, dass die Wände des Spalts selbsttragend ausgebildet werden können, d.h. dass keine Distanzhalter benötigt werden.

Zunächst muss festgehalten werden, dass die thermischen Verlustenergie eines zylindrischen Boilers vom Verhältnis Durchmesser  $\varnothing$  zu Höhe H abhängig ist: Je kleiner das Verhältnis Oberfläche zu Volumen ist, desto kleiner sind logischerweise die Verluste.

Für einen homogen isolierten Boiler führt dies zu einem Verhältnis  $\varnothing / H$  nahe 1. Wir haben es aber mit einer inhomogenen Isolation zu tun, bei welcher beispielsweise die Zylinderwände mit Vakuumpalt isoliert sind, während die obere und untere Endfläche beispielsweise aus PIR bestehen.

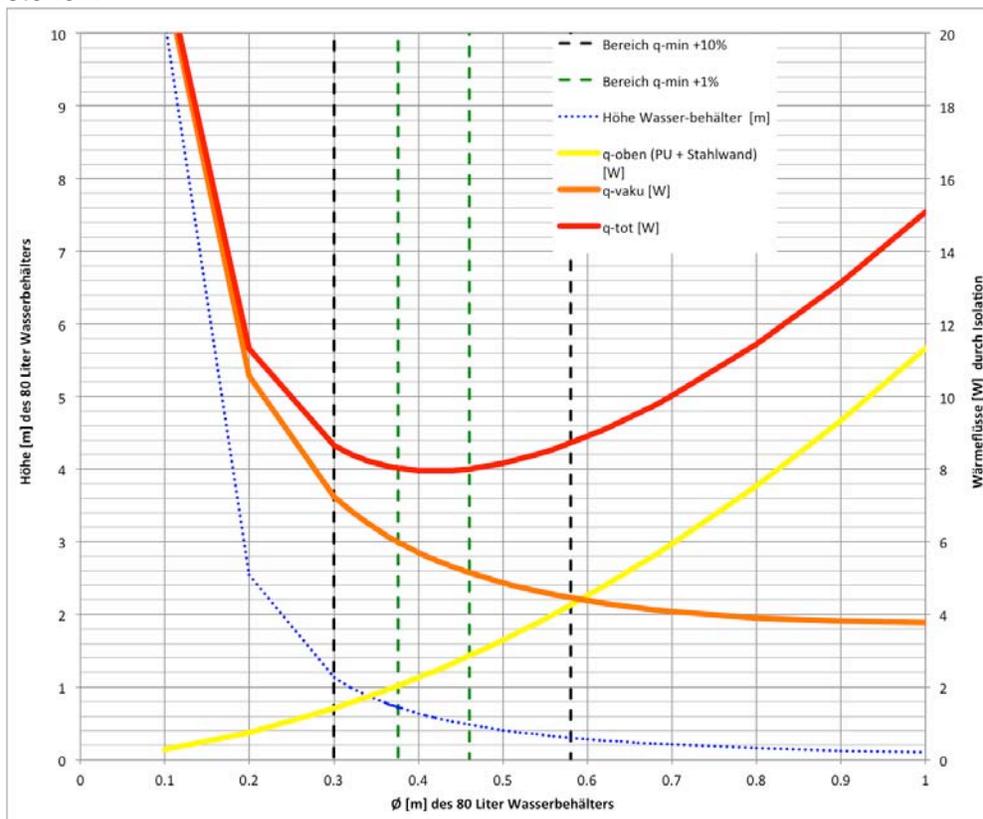


Fig. 3 Wärmeverluste eines 80 L Boilers mit Vakuumpalt-Isolation in Funktion des  $\varnothing$

Figur 3 zeigt die analytisch abgeschätzten Wärmeverluste einer derartigen Isolation in Funktion des Durchmessers des eigentlichen Wasserbehälters eines 80 Liter Boilers.

Für die Berechnung wurde angenommen der Boiler sei oben und unten je mit einem 200 mm hohen PIR-Stopfen isoliert und stecke - inklusive den PIR-Stopfen - in einem evakuierten, doppelwandigen austenitischen Stahlrohr mit einer 0.15 mm starken inneren Wand.

Aus dem Durchmesser  $\varnothing$  des Wasserbehälters rechnet sich zunächst die blau gepunktete Kurve der für das Volumen 80 Liter notwendigen Höhe desselben. (Skala linke Seite).

Danach werden die Wärmeverluste gegen oben bzw. unten als Summe der Wärmedurchgänge durch die PIR-Stopfen und entlang der inneren Wand des Vakuumrohrs bestimmt (gelbe Kurve, Skala rechte Seite). Der totale Wärmeverlust (rote Kurve) ergibt sich dann als Summe dieser Verlust addiert zu den Wärmeverlusten durch den Vakuumpalt (orange Kurve).

Es ist klar zu erkennen, dass der totale Wärmeverlust ein deutliches Minimum in der Gegend des  $\varnothing$  0.42 m und der Höhe 0.58 m aufweist, wobei  $\varnothing$  und H in einem relativ grossen Bereich variieren dürfen, ohne dass die Wärmeverlust um mehr als 10% grösser werden.

Wenn gewünscht kann diese Dimension auch anders gewählt werden:

Geht man davon aus die im folgenden Abschnitt 2.1.2 betrachteten 2 PIR-Stopfen seien je 200 mm hoch, so resultiert mit den obigen Werten eine Gesamtdimension des mit Vakuumpalt isolierten Boilers von  $\varnothing$  470 x 980 mm.

Zum Vergleich hat der mit 85 mm PIR isolierte Boiler eine Gesamtdimension von  $\varnothing$  590 x 750 mm, wobei die für die Heizung notwendige Zusatzhöhe nicht berücksichtigt ist.

Wenn man zum Schluss kommen würde, die relativ grosse Höhenzunahme des mit Vakuumpalt isolierten Boilers sei störend, hätte man nach Figur 16 die Möglichkeit, innerhalb des angesprochenen 10% Bereichs, eine Dimension des Wasserbehälters von beispielsweise  $\varnothing$  540 x 350 mm zu wählen, womit der mit Vakuumpalt isolierte Boiler eine Gesamtdimension von  $\varnothing$  590 x 750 mm hätte, was genau derjenigen des mit PIR isolierten Boilers entspricht.

In den folgenden 3 Abschnitten betrachten wir aber immer mögliche Aufbauvarianten der thermischen Isolation eines Boilers mit den Dimensionen ( $\varnothing$  420 x 580 mm) mittels Vakuumpalt.

### 2.1.2 Variante Vakuumrohr mit 2 PIR-Stopfen

Als erste möglich Variante einer Isolation mit Vakuumpalt betrachten wir die in Figur 4 skizzierte Variante, die als technisch am einfachsten zu realisierende Variante betrachtet werden kann.

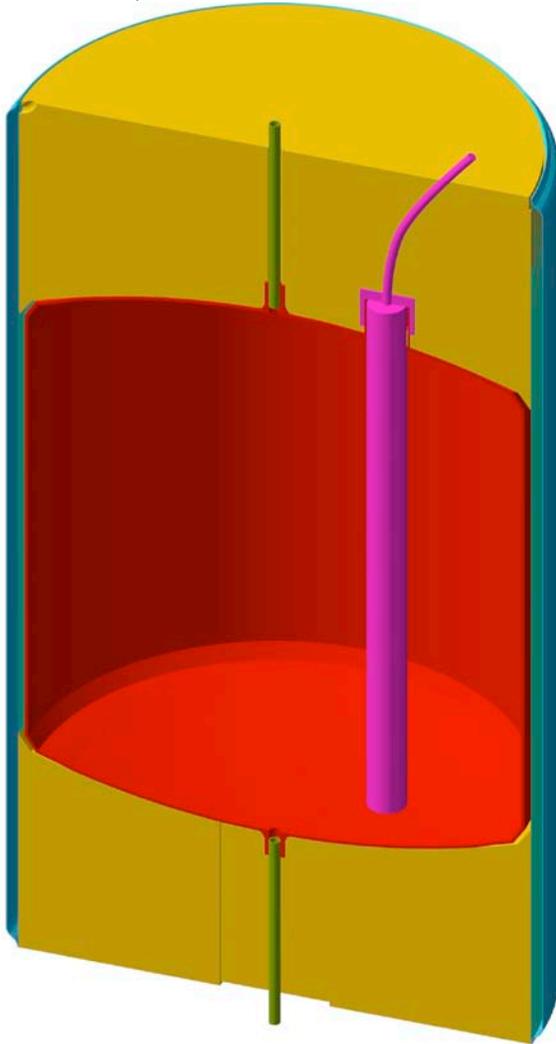


Fig. 4 Boiler mit Vakuumrohr und 2 PIR-Stopfen

Der Aufbau von Figur 4 besteht aus einem, in sich stabilen, druckfesten Warmwasserbehälter (rot), der mittig in einem deutlich längeren, doppelwandigen Rohr sitzt. Das Rohr ist evakuiert und an seiner oberen und unteren Kante gasdicht verschweisst. Die Isolation oberhalb und unterhalb des Wasserbehälters besteht je aus einem PIR-Stopfen, durch welchen die Leitungen zum Wasserbehälter geführt sind.

Untervarianten dieser Aufbauart unterscheiden sich durch die Höhe der PIR-Stopfen und den daraus resultierenden unterschiedlich grossen Wärmeleitungen durch das PIR einerseits und andererseits vor allem entlang der inneren Stahlwand des Vakuumrohrs.

Die Stärke dieser Innenwand ist entscheidend für die thermische Auslegung des Aufbaus. Da sie im thermischen Sinne so dünn wie irgend möglich sein sollte, aber gleichzeitig die notwendige mechanische Stabilität aufweisen muss, liegt hier ein Optimierungsproblem vor. Da eine Verstärkung der inneren Rohrwand im Bereich der Höhe des Wasserbehälters keinen Einfluss auf die thermischen Verluste hat lässt sich dieses Optimierungsproblem auf die Bereiche der PIR-Höhe einschränken.

Bei einer weiteren Untervariante (siehe Fig. 5) sind die beiden Wände des Vakuumrohres an ihren Enden nicht direkt mit einander verschweisst, sondern mit einem Rand nach dem Parallel-Filament Prinzip (PFD) versehen.

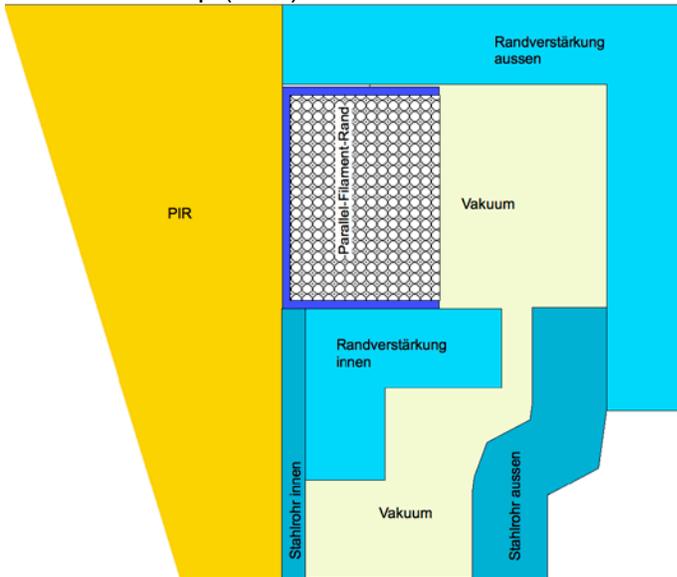


Fig. 5 Schnitt-Skizze durch Vakuumrohr mit Parallel-Filament-Rand (PFD)

Da PFD nicht auf Scherung sondern auf hohe Druckbelastung ausgelegt sind, ist der Rand des Vakuumrohrs mittels Verstärkungen so gestaltet, dass die PFD nur auf Druck belastet sind. Das Gewicht des äusseren Rohrs und die durch den Luftdruck entstehenden axialen Belastungen werden auf die in Figur 5 gezeigte Art über den PFD und die Randverstärkungen auf das eingeschäumte PIR übertragen, das seinerseits wiederum auf dem Wasserbehälter aufliegt. Wenn wir uns erinnern, dass der Wärmedurchgangskoeffizient  $U_g$  [W/m<sup>2</sup>K] durch das Restgas im Vakuum unabhängig ist vom Wandabstand, ist klar, warum durch die Vakuum-Engstellen der in Figur 5 skizzierten Konstruktion keine thermischen Schwachstellen entstehen.

Alle denkbaren Untervarianten müssen so konstruiert werden, dass das Vakuumrohr unabhängig vom Wasserbehälter hergestellt und nachträglich über diesen gestülpt werden kann. Die PIR-Stopfen können dann beispielsweise direkt eingeschäumt werden und unterstützen so die Lastabtragung innerhalb des fertiggestellten isolierten Boilers.

Wie wir im Abschnitt 2.2 sehen werden, dürfen wir davon ausgehen, die Stärke der inneren Stahlwand sei 0.1 mm und diejenige der äusseren 0.4 mm.

Mit den in Abschnitt 2.1.1 festgelegten Dimensionen lassen sich dann die folgenden Gewichte für das Vakuumrohr mit 2 PIR-Stopfen abschätzen:

Stopfen-Höhe mm	Gewicht Stahl kg	Gewicht PIR kg	Gewicht total kg	Zunahme bez. PIR-ganz (=2 kg) kg
100	4.8	0.9	5.6	3.6
200	6.0	1.7	7.7	5.7
300	7.2	2.6	9.8	7.8

Tab. 7 Gewichte unterschiedlicher Vakuumrohre mit 2 PIR-Stopfen

Damit ist die im Lastenheft vorgegebene maximale Gewichtszunahme von 10 kg in jedem Falle eingehalten.

### 2.1.3 Variante Dewar mit PIR-Stopfen

In Figur 6 ist eine mögliche Variante skizziert, bei welcher das Vakuum - wie bei einem Dewar - kontinuierlich von den Seitenflächen über eine der Deckflächen geführt ist.

Durch die grosse evakuierte Deckfläche erzeugt der Luftdruck grosse axiale Kräfte, welche auch auf die Wände des Rohrs wirken. Diese Kräfte können durch Einbringen einiger Distanzhalter (nach dem Ball-Prinzip oder Parallel-Filament-Prinzip) in den horizontalen Vakuumpalt eliminiert werden, so dass die Wände des rohrartigen Teils dünn bleiben können.

Auf der hohlen Seite des Dewars ist eine dicke Isolationsschicht aus PIR vorhanden und sämtliche Leitungen zum Wasserbehälter sind durch diese Schicht hindurch geführt.

In einer Untervariante kann der Rand des Dewars gemäss Figur 5 mit PFD aufgebaut sein.

In andern Untervarianten variiert die Höhe des PIR-Stopfens.

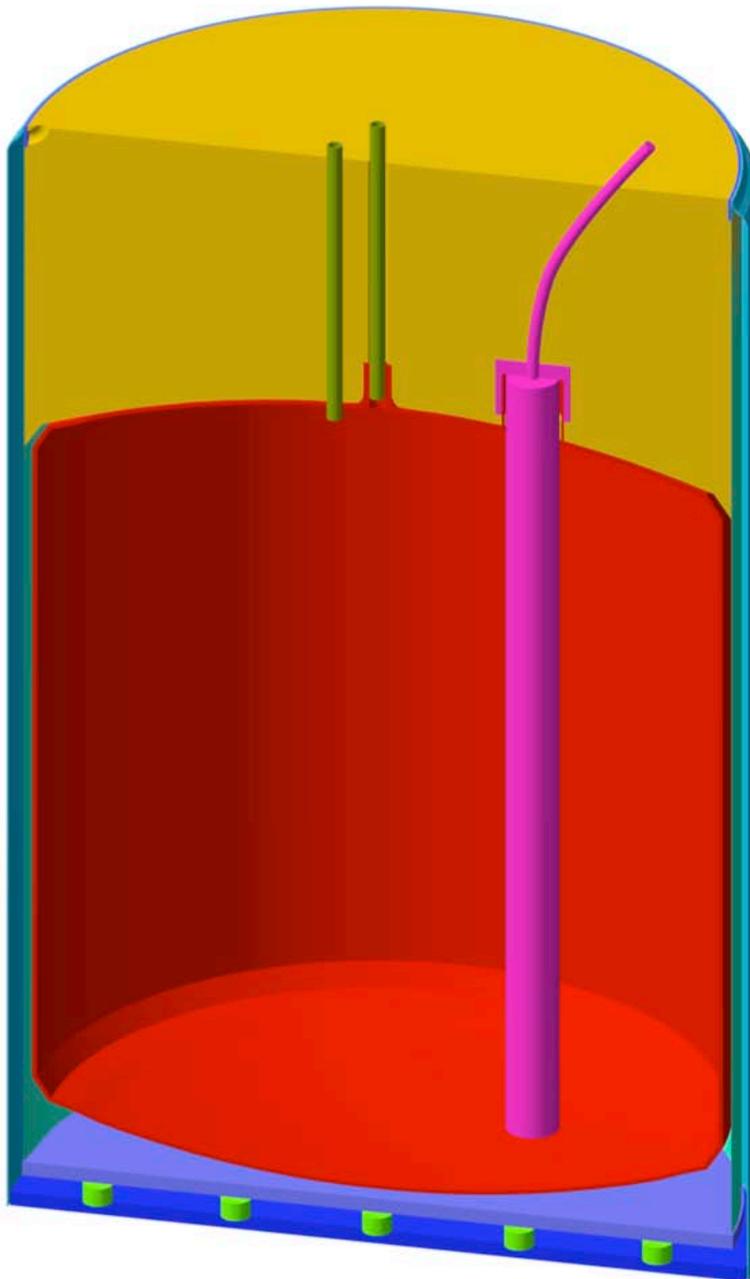


Fig. 6 Boiler mit Vakuum-Dewar und PIR-Stopfen

Auch das Dewar soll so konstruiert sein, dass es unabhängig vom Wasserbehälter hergestellt und nachträglich über diesen gestülpt werden kann. Der PIR-Stopfen wird dann beispielsweise direkt eingeschäumt.

Geht man bei der Konstruktion gemäss Figur 6 davon aus, die innere Dewarwand habe die Stärke 0.1 mm, die äussere 0.4 mm und die beiden Stahlscheiben am Dewarende jeweils 1 mm, so ergeben sich die Gewichte der Tabelle 8.

Stopfen-Höhe mm	Gewicht Stahl kg	Gewicht PIR kg	Gewicht total kg	Zunahme bez. PIR- ganz (=2 kg)
100	5.7	0.4	6.2	4.2
200	6.3	0.9	7.2	5.2
300	6.9	1.3	8.2	6.2

Tab. 8 Gewichte unterschiedlicher Dewars mit PIR-Stopfen

Auch bei dieser Konstruktion wird also die Gewichtsvorgabe des Lastenhefts in jedem Fall eingehalten.

#### 2.1.4 Variante mit Vakuum rundum

In Figur 7 ist eine - eher theoretische - Variante skizziert, bei welcher das Vakuum - kontinuierlich von den Seitenflächen über die obere und untere Deckfläche geführt ist, was natürlich die thermischen Verluste nochmals stark reduziert.

Durch die grossen horizontalen, evakuierten Deckflächen erzeugt der Luftdruck auch hier grosse axiale Kräfte, die auch auf die Wände des Rohrs wirken. Diese Kräfte können, durch Einbringen einiger Distanzhalter (nach dem Ball-Prinzip oder Parallel-Filament-Prinzip) in die horizontalen Vakuumpalte, eliminiert werden, so dass die Wände des rohrartigen Teils dünn bleiben können. Sämtliche Leitungen müssen auf aufwendige Weise gasdicht durch eine der beiden horizontalen Vakuumdecken geführt werden, was in Figur 7 nur angedeutet ist.

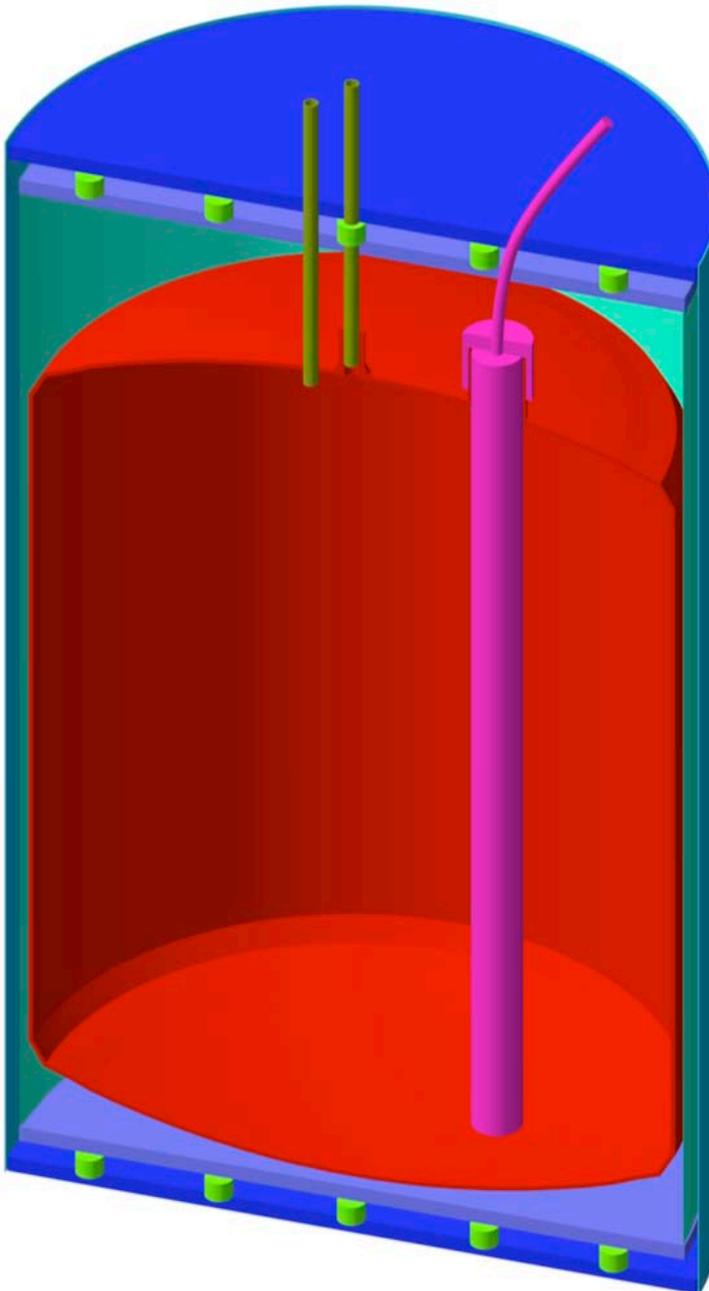


Fig. 7 Boiler mit Vakuumpalt rundum

Der Vakuumbehälter kann in diesem Falle nicht unabhängig vom Wasserbehälter hergestellt werden. Er muss vielmehr nach Einbringen des Wasserbehälters von einer Seite her - z.B. mittels Schweißen - doppelt verschlossen werden und kann erst dann evakuiert werden. Dies steigert den für das Evakuieren notwendigen Aufwand sehr stark.

Geht man bei der Konstruktion gemäss Figur 20 davon aus die innere Rohrwand habe die Stärke 0.1 mm, die äussere 0.4 mm und die beiden Stahlscheiben an den Enden jeweils 1 mm, so ergibt sich das Gewicht der Tabelle 9, das wiederum die Vorgabe des Lastenhefts einhält.

Stopfen-Höhe mm	Gewicht Stahl kg	Gewicht PIR kg	Gewicht total kg	Zunahme bez. PIR- ganz (=2 kg)
-	7.0	-	7.0	5.0

Tab. 9 Gewicht Vakuumpalt-Isolation rundum

### 2.1.5 Aufhängung des Boilers mit Vakuumpspalt

Unsere - hier nicht dargestellten - Berechnungen bezüglich eines konventionell mit 85 mm PIR isolierten Boilers haben ergeben, dass sich die in Abschnitt 1.4 (z.B. Tabelle 7) angegebenen Verlustenergie "modern losses" von 240 kWh/a nicht nur den Wärmeverlust durch die PIR-Isolation beinhalten, sondern dass in diesem Wert ein Wärmeverlust durch die Aufhängung des Boilers von ca. 80 kWh/a mit berücksichtigt ist.

Wir gehen im Folgenden bei allen besprochenen Resultaten davon aus, dass diese thermischen Aufhängungs-Verluste durch eine diesen Aspekt berücksichtigende Konstruktion leicht auf vernachlässigbare Werte zu reduzieren sind. Figur 8 skizziert am Beispiel des Boilers mit Vakuumpspalt und 2 PIR-Stopfen einen kostengünstigen Ansatz hierfür.

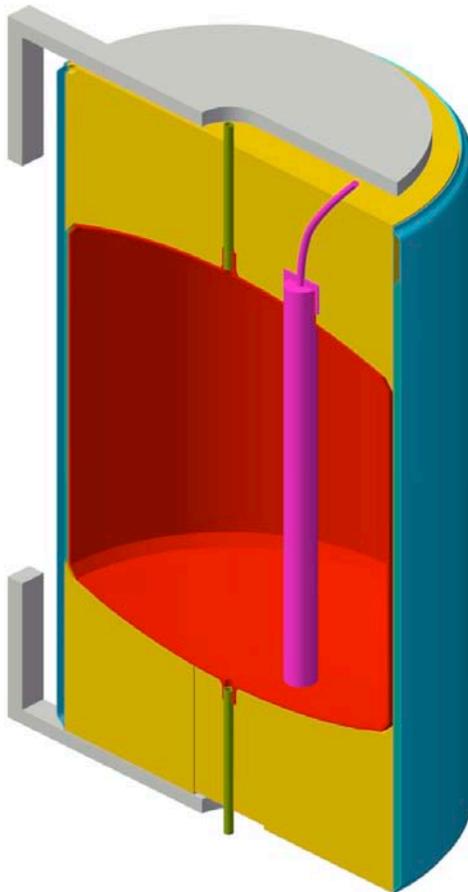


Fig. 8 Träger mit vernachlässigbarem Wärmeverlust

Der isolierte Boiler ist zwischen 2 - jeweils mittels eines Bügels an die Wand befestigten - Platten eingeschoben, die beide direkt auf den beiden PIR-Stopfen aufliegen.

Wenn die Platten aus Kunststoff bestehen, reduzieren sie die direkten Wärmeverluste gegen unten und oben. Zusätzliche, vernachlässigbare Wärmeverluste entstehen nur durch die Wärmeleitung durch die Kunststoffbügel zur Wand hin, womit in Summe die Wärmeverluste durch die Aufhängung vernachlässigbar sind.

Die mechanische Druck-Belastung des unteren PIR-Stopfens liegt weit unter der für PIR zulässigen Grenze von 120 kPa. Sie beträgt beispielsweise für einen 80 Liter Boiler mit extrem schwer angenommener Konstruktion von 70 kg (Gesamtgewicht 150 kg) bei einem Plattendurchmesser von 400 mm lediglich ca. 12 kPa.

## 2.1.6 Varianten thermisch berechnen und bewerten

Wir haben eine Abschätzung der thermischen Verluste berechnet, welche sich ergeben, wenn ein 80 Liter Boiler mit der Dimension  $\varnothing$  420x580 mm mit verschiedenen Untervarianten der oben besprochenen 3 Aufbauvarianten isoliert wird.

Alle Berechnungen wurden einerseits mit einem 2-dimensionalen Finite-Elemente Model (FEM) und teilweise, zur Kontrolle, analytisch berechnet und in Tabelle 10 dargestellt.

	Bauart Vakuumpspalt	Höhe PIR mm	Vaku-spalt mm	Anz. Alu Fol.	$\varnothing$ mm	H mm	Zu-name H mm	Ver-lust analy kWh /a	Ver-lust FEM kWh /a	Ver-lust Redukt. kWh /a	Ver-lust Redukt. %	in Ziel
0	"modern" überall PIR	85	-	-	590	750		240				
1	Vakuump-Rohr + 2 PIR-Stopfen	200	10	0	460	980	230	196	185	55	23%	-
2	Vakuump-Rohr + 2 PIR-Stopfen	300	10	0	460	1180	430	192	182	58	24%	-
3	Vakuump rundum		10	0	460	640	-110		176	64	27%	-
4	<b>Vakuump-Rohr + 2 PIR-Stopfen</b>	<b>75</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	460	730	<b>-20</b>	<b>96</b>	<b>86</b>	<b>154</b>	<b>64%</b>	<b>K</b>
5	Vakuump-Rohr + 2 PIR-Stopfen	100	10	1	460	780	30	86	76	164	68%	<b>K</b>
6	Vakuump-Rohr + Parallelfilament-Ränder + 2 PIR-Stopfen	100	10	1	460	780	30		65	175	73%	<b>M</b>
7	<b>Vakuump-Rohr + 2 PIR-Stopfen</b>	<b>200</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	460	980	<b>230</b>	<b>62</b>	<b>62</b>	<b>178</b>	<b>74%</b>	<b>M</b>
8	Vakuump-Rohr + 2 PIR-Stopfen	100	10	2	460	780	30	72	61	179	75%	<b>M</b>
9	Vakuump-Rohr + 2 PIR-Stopfen	300	10	1	460	1180	430	56	59	181	75%	<b>M</b>
10	Dewar + PIR-Stopfen	200	10	1	460	810	60		57	183	76%	<b>M</b>
11	Dewar + Parallelfilament-Rand + PIR-Stopfen	200	10	1	460	810	60		55	185	77%	<b>M</b>
12	Vakuump rundum		10	1	460	640	-110		51	189	79%	<b>M</b>
13	Vakuump-Rohr + 2 PIR-Stopfen	200	10	2	460	980	230	48	46	194	81%	<b>G</b>
14	Vakuump-Rohr + Parallelfilament-Ränder + 2 PIR-Stopfen	200	10	1	460	980	230		45	195	81%	<b>G</b>
15	<b>Vakuump-Rohr + 2 PIR-Stopfen</b>	<b>300</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	460	1180	<b>430</b>	<b>42</b>	<b>42</b>	<b>198</b>	<b>83%</b>	<b>G</b>
16	Dewar + PIR-Stopfen	200	10	2	460	810	60		38	202	84%	<b>G</b>
17	Vakuump rundum		10	2	460	640	-110		33	207	86%	<b>G</b>

Tab. 10 Resultate der thermischen Berechnung verschiedener Varianten der Vakuumpspalt-Isolation eines 80 Liter Boilers

Die für die Berechnungen verwendeten Werte für die Wärmeleitfähigkeit des Restgases im Vakuumpalt (ca.  $5 \cdot 10^{-5}$  W/mK) und für die Strahlungs-Emissionswerte der verwendeten Materialien (Stahl: 0.15, Alu-Folie: 0.04) basieren auf den in Abschnitt 4 durchgeführten Messungen. Darüber hinaus stimmen die in Zeile 1 bzw. Zeile 7 berechneten Werte sehr gut mit den entsprechenden Messungen in Abschnitt 4 überein, was bedeutet, dass den obigen Berechnungen Vertrauen entgegenbracht werden darf.

Immer wurde für die Wandstärken des rohrartigen Teils der Isolation angenommen, die innere Wand sei 0.15 mm und die äussere Wand 0.4 mm stark. Als Material wurde immer austenitischer Stahl mit Wärmeleitfähigkeit 15 W/mK angenommen.

Als Untervarianten wurde einerseits mit unterschiedlichen Höhen der PIR-Stopfen (75, 100, 200, 300 mm) und andererseits mit unterschiedlicher Anzahl von im Vakuumpalt zur Strahlungsminderung vorhandenen Aluminiumfolien gerechnet.

Als Vergleichsbasis wurde ein mit 85 mm PIR isolierter Boiler herangezogen, der die Aussendimension von  $\varnothing 420 + 2 \cdot 85 = 590$  und Höhe  $580 + 2 \cdot 85 = 750$  aufweist und laut Tabelle 5 eine thermische Verlustenergie von 240 kWh/a hat.

Der von uns hier verwendete Begriff "Verlustenergie" entspricht übrigens dem von den Boiler Herstellern verwendeten "Bereitschaftsstromverbrauch", d.h. der Strommenge, welche benötigt wird, um die Wassertemperatur eines auf Solltemperatur aufgeheizten Boilers, ohne Bezug von Warmwasser, konstant zu halten.

Tabelle 10 wertet in der letzten Spalte "in Ziel", welche der technischen Zielsetzungen (Sehr Klein="S", Klein="K", Mittel="M", Gross="G") des Lastenhefts (Tabelle 6) erreicht werden. Eine Bewertung welche wirtschaftlichen Zielsetzungen des Lastenhefts erreicht sind, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich, weil noch keine begründete Abschätzung der Mehrkosten durch die Isolationsvarianten vorliegt.

Tabelle 10 zeigt deutlich, dass ohne eine Aluminiumfolie zur Strahlungsminderung noch nicht einmal die Zielsetzungen "Sehr Klein" des Lastenhefts (Tabelle 6) erreicht wird.

Selbst mit der aufwendigsten - und thermisch theoretisch besten - Art des Aufbaus der Isolation, der Variante "Vakuum rundum", ergibt sich mit 0 Folien einen thermischen Verlust von ca. 176 kWh/a bzw. eine Verminderung der Verluste gegenüber der Vergleichsbasis von lediglich 27%. Diese Verlustminderung ist nicht befriedigend.

Dies bedeutet für uns, dass bei den weiteren Arbeiten daran gearbeitet werden muss, mindestens eine Folie zur Strahlungsminderung auf kostengünstige Art in den Vakuumpalt zu bringen.

Tabelle 10 zeigt in der grün markierten Zeile weiter, dass die technische Zielsetzung "Klein" mit der Variante "Vakuumrohr mit 2 PIR-Stopfen" erreicht ist, wenn 1 Aluminiumfolie im Vakuumpalt vorhanden ist und die beiden PIR-Stopfen jeweils lediglich 75 mm hoch sind.

Wie die blau markierte Zeile zeigt, wird die Zielsetzung "Mittel" mit der Variante "Vakuumrohr mit 2 PIR-Stopfen" mit einer Aluminiumfolie und einer jeweiligen Höhe der PIR-Stopfen von 200 mm erreicht. Damit ist auch noch die entsprechende maximal zulässige Höhenzunahme des Lastenhefts von 250 mm eingehalten.

Weitere 5, der insgesamt 15 berechneten Untervarianten erfüllen die Zielsetzung "Mittel".

Die gelb hinterlegte Variante "Vakuumrohr + 2 PIR-Stopfen", mit 2 Aluminium Folien und PIR-Höhe 200 mm erreicht die Zielsetzung "Gross". Diese Variante wird weiter unten der Kostenabschätzung von Abschnitt 2.4 zugrunde gelegt. Dort wird gezeigt, dass die Zielsetzung "Gross" mit dieser Variante auch im Hinblick auf die Kosten erreichbar scheint.

Weitere 4 der untersuchten Varianten erreichen die Zielsetzung "Gross". Die beste aller Varianten ist - wie zu erwarten - die Variante "Vakuum rundum" mit 2 Aluminiumfolien, die mit ca. 85% Reduktion der Verlustenergie brilliert.

## 2.2 Strukturmechanische Grobauslegung (FEM)

Wir haben uns auf die Auslegung eines Vakuumrohrs beschränkt, dessen Innenwand und Aussenwand unterschiedlich stark sein dürfen, aber jeweils so dünn wie irgend möglich sein müssen. Einerseits ist nämlich der Preis von Bandstahl aus den zu verwendenden austenitischen Stählen - bis mindestens hinunter zur Stärke 0.1 mm - nahezu proportional zum Gewicht und damit zur Stärke; andererseits muss die Innenwand aus thermischen Gründen möglichst dünn sein. Zusätzlich dürfen die Wände des Gewichts wegen nicht zu stark sein.

Damit eine dünne Aussenwand den Belastungen des Luftdrucks standhält, gibt es zwei Möglichkeiten: entweder die dünne Wand aus teurem austenitischem Stahl wird mit Baustahl verstärkt oder die dünne Wand wird mit Sicken versehen.

Wir haben versucht abzuschätzen welche minimale Stärke eine Aussenwand mit Sicken haben muss und wie die Sicken zu diesem Zwecke gestaltet sein müssen.

Eine einfache Prinzipskizze eines entsprechenden Vakuumrohrs findet sich in Figur 9.

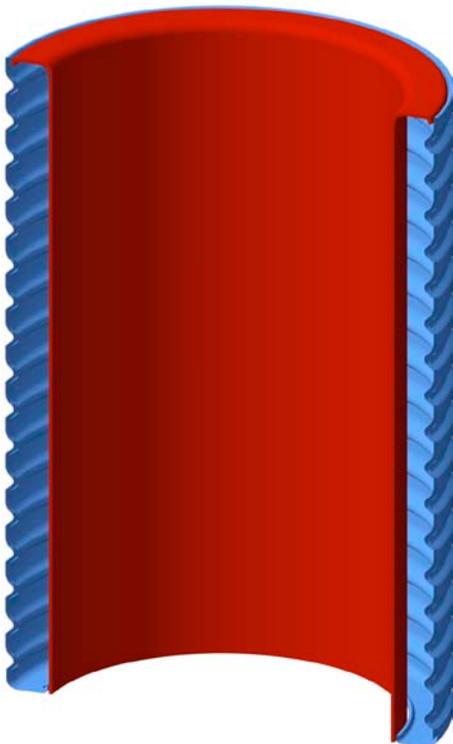


Fig. 9 Prinzipskizze dünnwandiges Vakuumrohr, Aussenwand mit Sicken

Die FEM-Berechnungen der mechanischen Stabilität bezüglich Beulen (buckling) eines derartigen Rohrs wurden mit dem bewährten ANSYS durchgeführt. Folgende Annahmen wurden hierfür gemacht:

- Norm DIN EN 1993-1-6 (Eurocode3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten)
- Das Vakuumrohr ist aus zwei gerollten Zylindern an den Enden zusammengeschweisst
- Abmessung Innenrohr:  $\varnothing$  420 x 1000 mm
- Abmessung Aussenrohr:  $\varnothing$ -max 463 x 1000 mm
- Material: 1.4571 (man könnte auch den in der Vakuumtechnik bewährten 1.4406 nehmen, der mechanisch mindestens gleich gute Werte aufweist):

bei 400 °C: E-Modul = 150 MPa, Dehngrenze (0,2%)= 160 MPa.

Diese Daten wurden für alle Berechnungen angewendet (sowohl Norm als auch FEM)

- Auslegung für 1 bar Unterdruck und 400 °C.

Die Parameter Stärke Aussenwand, Stärke Innenwand und Geometrie der Sicken wurden so lange variiert, bis für möglichst kleine Stärken eine genügende Sicherheit gegen Beulen resultierte.

Es ergaben sich die folgenden Werte:

- Innenzylinder mit Wandstärke = 0,15 mm
- Aussenzylinder mit Wandstärke = 0,4 mm und den Sicken von Figur 10 oder Figur 15.

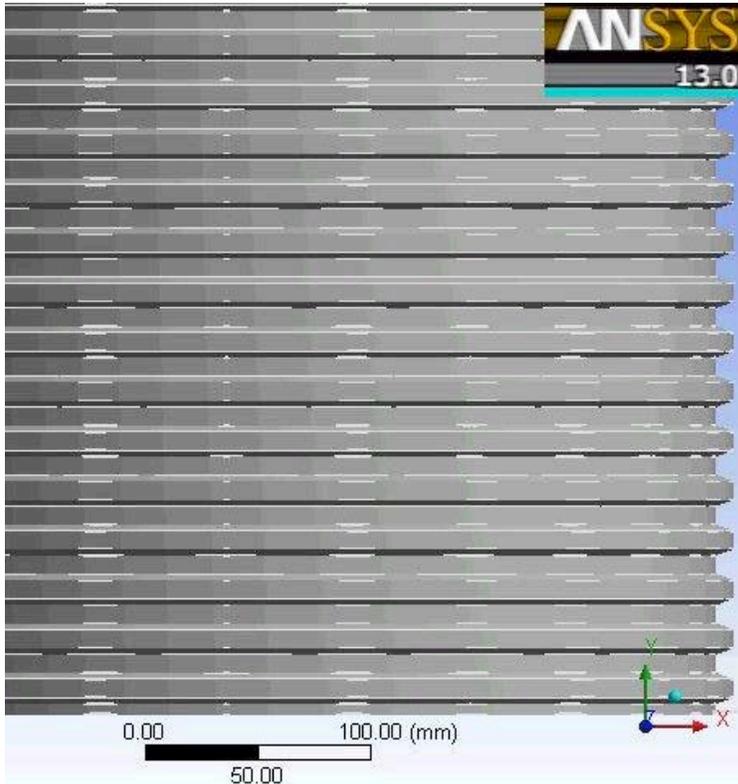


Fig. 10 Sickengeometrie des Aussenzylinders:  
Tiefe radial = 8 mm. Steigung = 22 mm. Winkel Seiten = 110 °

- Es ist keine zusätzliche Verstärkung des Aussenzylinders notwendig
- Gewicht des gesamten Vakuumrohrs ca. 8 kg
- Verifizierung des Innenzylinders nach Norm. Gesamte axiale Last ("worst case") ist Lastfall gemäss Norm: axiale Last + Innendruck. Es ergibt sich der effektive Sicherheitsbeiwert = 2.88.
- Verifizierung des Innenzylinders nach Norm. Die Wand mit Sicken wird in eine J-äquivalente Wandstärke (4,2 mm) umgerechnet. Lastfall in der Norm: Aussendruck. Es ergibt sich der effektive Sicherheitsbeiwert = 1.09.
- Verifizierung der gesamten Struktur nach Norm auf Basis der Ergebnisse der linearen FEM-Berechnung. Fall: Meridianbeulen unter Aussendruck. Resultat: Effektiver Sicherheitsbeiwert =1.67.

Figur 11 zeigt als ein Beispiel der den obigen Ergebnissen zugrunde liegenden linearen FEM-Berechnung das Bild eines Detailausschnittes der Belastung des Innenzylinders.

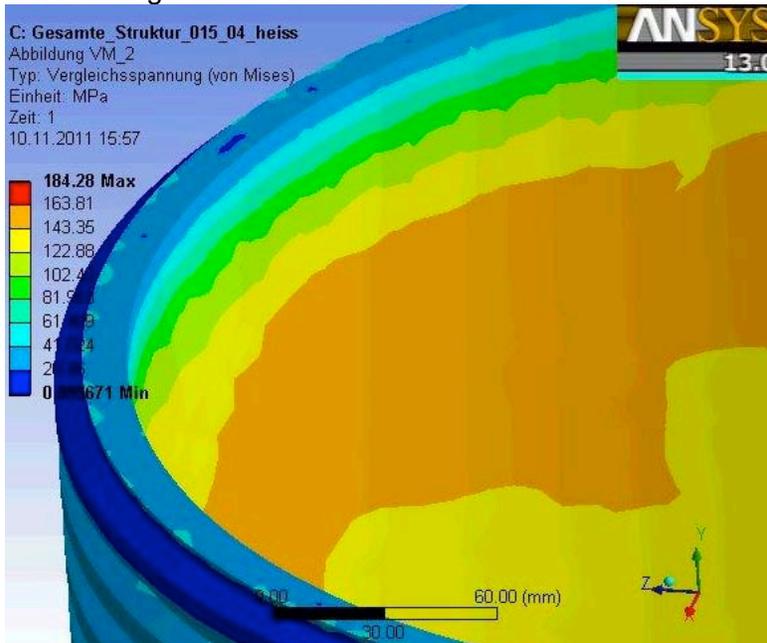


Fig. 11 Belastung des Innenzylinders

Figur 12 zeigt als Beispiel der Resultate der linearen Beulanalyse, die erste Instabilitätsform, mit einem Sicherheitsfaktor gegen Beulen von 5.09.

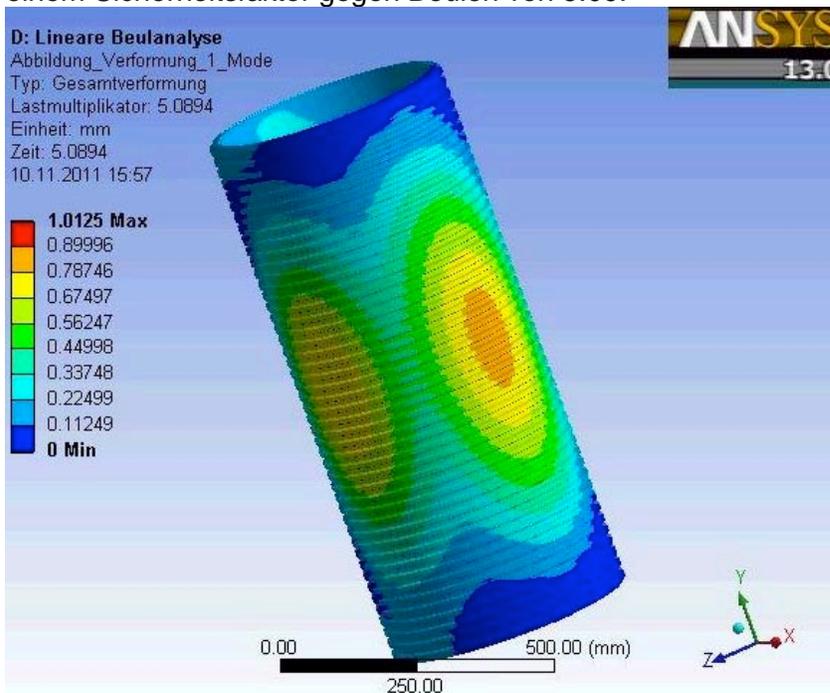


Fig. 12 Erste Instabilitätsform des Aussenzylinders

Wir betonen, dass wir die Berechnungen aus Sicherheitsgründen mit den Festigkeitswerten des Stahls bei Temperatur 400°C durchgeführt haben. Dies, weil wir davon ausgegangen sind, dass das Vakuumrohr während des Evakuierens auf diese Temperatur aufgeheizt sei und deshalb in diesem Zustand - zumindest für einige Zeit - den Belastungen des Luftdrucks widerstehen müsse. Da die Anwendungs-Temperatur beim Boiler maximal bei 65°C liegt und deshalb die Festigkeitswerte des Stahls - und damit auch die Sicherheitsbeiwerte - im Anwendungszustand deutlich höher liegen, haben wir auch den minimalen Sicherheitsbeiwert von 1.09 für den 400°C heißen Aussenzylinder und den kleinen Wert von 1.63 für die Gesamtstruktur bei dieser Temperatur akzeptiert.

Wie wir in Abschnitt 2.3 zeigen werden, kann problemlos eine Fertigungstechnologie definiert werden, bei welcher das Vakuumrohr während des Evakuierens keinen Luftdruck zu spüren bekommt. Es kann deshalb zum Evakuieren fast beliebig hoch aufgeheizt werden, ohne zu kollabieren. Erst nach dem Abkühlen wird es dann dem Luftdruck ausgesetzt.

Dies bedeutet, dass wir für die obigen Berechnungen in Zukunft mit den Festigkeitswerten des Stahls bei 65°C arbeiten dürfen, welche für 1.4406 mindestens einen Faktor 1.5 höher liegen als die oben angenommenen Werte.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Tatsache, dass die Innenwand des Vakuumrohrs im Anwendungszustand auf den Wasserbehälter aufgeklebt und in den überstehenden Teilen mit PIR-Schaum ausgefüllt wird. Dadurch ergibt sich natürlich eine ganz wesentliche mechanische Stabilisierung des Innenzylinders und der gesamten Struktur.

Dies bedeutet, dass wir den Sicherheitsfaktor für das Innenrohr (jetzt 2.88 bei 400°C) während des Fertigungszustands auf knapp über 1 senken dürfen, was wiederum bedeutet, dass wir mit der - in allen thermischen Berechnungen zugrunde gelegten - Wandstärke 0.1 mm für das Innenrohr auskommen.

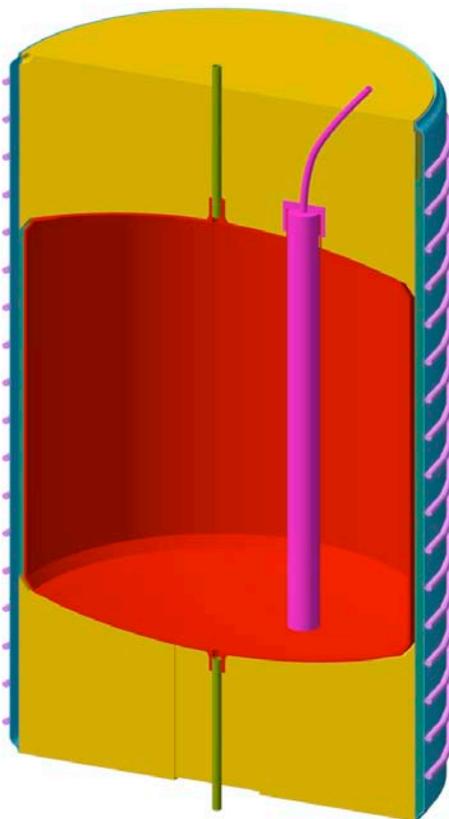


Fig. 13 mit ringförmigen Baustahl-Elementen verstärktes austenitisches Aussenrohr

Da die Preise von austenitischem Bandstahl annähernd linear von seinem Gewicht und damit von seiner Stärke abhängen, muss untersucht werden, ob es nicht gelingt, die Stärke des gesickten Aussenrohrs von den laut der obigen Berechnung notwendigen 0.4 mm auf beispielsweise 0.15 mm zu senken.

Figur 13 zeigt einen hierfür denkbaren Ansatz, bei welchem das aus teurem austenitischem Stahl bestehende glatte Aussenrohr mittels ringförmigen Elementen aus kostengünstigstem Baustahl verstärkt ist. Ob ein derartiger oder ähnlicher Aufbau im Endeffekt kostengünstiger ist, muss unsere zukünftige Arbeit zeigen.

### 2.3 Mögliche Fertigungstechnologie

Figur 14 zeigt einen denkbaren Fertigungsablauf eines Vakuum-Stahlrohrs zusammen mit der groben Skizze einer entsprechenden Evakuierungsvorrichtung.

Herstellmöglichkeit Vakuum-Stahlrohr:

- Wände aus Innoxstahl, gewalzt und geschweisst
- Strahlungsminderungsfolie einlegen
- Wände unten miteinander verschweissen
- allenfalls an Luft glühen
- oben (Hart-)Lot-Ring einlegen
- noch offenes (heissnes) Rohr in Absaugkammer einlegen
- Absaugstutzen aufpressen und Kammer evakuieren
- Rohr im Vakuum ausheizen
- Rohr oben auf Lot-Schmelzpunkt aufheizen
- Im Vakuum abkühlen

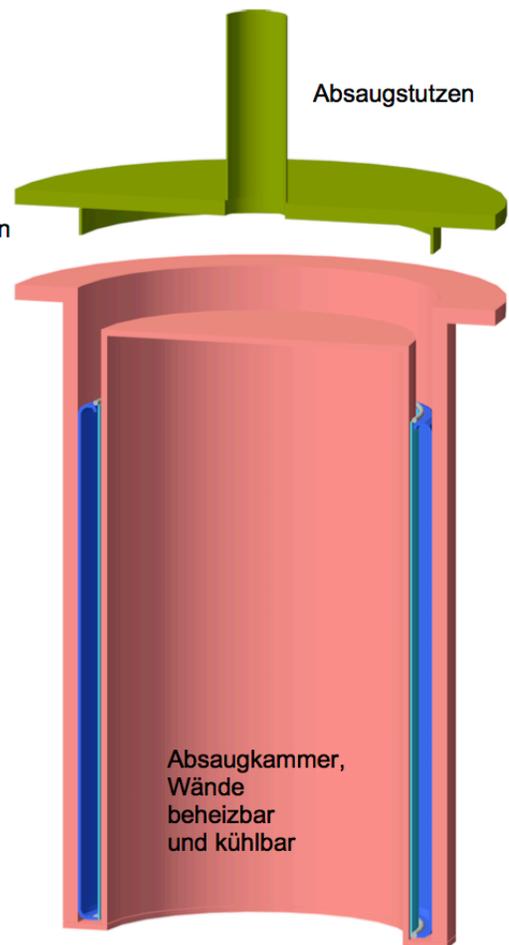
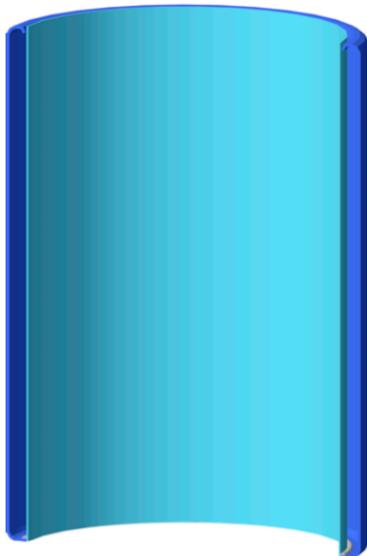


Fig. 14 denkbarer Fertigungsablauf und Vorrichtung für ein Vakuum-Stahlrohr

Schritt 1 Der austenitische Bandstahl für die Rohrwände wird abgelängt. Ob es aus Gründen des späteren Ausgasens sinnvoll ist, die abgelängten Bleche in Luft zu glühen und dafür zu sorgen, dass sie - der Adsorption von Wasser wegen - nie unter bei-

- spielsweise 100°C abkühlen bis sie im Vakuum sind, muss in Versuchen festgestellt werden.
- Schritt 2 Die Bleche werden rund gerollt und mit einer Längsnaht gasdicht zu Innen- bzw. Aussenrohr verschweisst.
- Schritt 3 Das Aussenrohr wird so umgeformt dass sein Durchmesser an den Rändern demjenigen des Innenrohrs entspricht, wobei der Durchmesser am oberen Rand von seiner engsten Stelle an gegen oben trichterförmig wieder etwas grösser wird.
- Schritt 4 Das Aussenrohr wird entweder mit Sicken versehen oder es wird eine Verstärkung aufgebracht.
- Schritt 5 Aluminiumfolien zur Strahlungsminderung und Gettermaterial werden in der Höhlung des Aussenrohrs befestigt.
- Schritt 6 Das Innenrohr wird eingeschoben, Innen- und Aussenrohr werden an ihrem unteren Rand gasdicht verschweisst und anschliessend spannungsfrei geglüht.
- Schritt 7 Das oben noch offene und noch heisse Vakuumrohr wird in eine spezielle Absaugkammer eingeschoben:  
 Das innere Volumen der Absaugkammer ist nur unwesentlich grösser als das Volumen des Vakuumrohrs. Die Wände der Absaugkammer kontaktieren (federnd) die Wände des Vakuumrohrs. Die Wände der Absaugkammer sind beheizbar und kühlbar. Vorteilhaft bleiben die Wände der Absaugkammer in geöffnetem Zustand so heiss (z.B. 100°C), dass kein Wasser auf ihrer Oberfläche adsorbiert. Zur Stilllegung ohne Beheizung werden die Kammern evakuiert und mit einem geeigneten Ventil verschlossen. Vor der Wiederinbetriebnahme werden sie wieder aufgeheizt.
- Schritt 8 In den kurzen oberen trichterförmigen Raum zwischen Innen- und Aussenrohr wird ein Ring aus geeignetem Lot eingelegt.
- Schritt 9 Der Absaugstutzen wird auf die Absaugkammer aufgedrückt und die Kammer wird evakuiert.
- Schritt 10 Unter ständigem Pumpen wird das Vakuumrohr bei ca. 400°C ausgeheizt. Es wird so lange gepumpt, bis ein stabiler Unterdruck von beispielsweise  $10^{-6}$  mbar erreicht ist.
- Schritt 11 Der obere Rand des Vakuumrohrs wird so weit aufgeheizt, bis das Lot fliesst und den Spalt zwischen Innen- und Aussenrohr gasdicht verschliesst.
- Schritt 12 Absaugkammer und Vakuumrohr werden auf ca. 100°C abgekühlt, das Vakuum der Absaugkammer wird gebrochen und das fertige Vakuumrohr wird der Kammer entnommen.

Der hier skizzierte Fertigungsablauf stellt sicher, dass eine genügend tiefe, leicht zu getternde Ausgasrate im Innern des Vakuumrohrs vorhanden ist und dass das, während des Abpumpens auf beispielsweise 400°C aufgeheizte Rohr nicht vom Luftdruck belastet wird, sondern dem Luftdruck erst nach dem Abkühlen ausgesetzt ist.

Das Halten der Absaugkammer auf Temperatur und das Glühen des Vakuumrohrs mit anschliessendem heiss Einbringen desselben in die Absaugkammer sorgt dafür, dass beim Abpumpen nur sehr wenig an den Oberflächen adsorbiertes Wasser entfernt werden muss, womit die Abpumpzeiten relativ kurz gehalten werden können.

Für eine Serienfertigung mit genügend grossem Durchsatz müssen entsprechend viele Absaugkammern mit je eigenem Pumpstand (z.B. Vor- und Turbopumpe) zur Verfügung gestellt werden. Denkbar ist auch, dass jeweils einige Absaugkammern gleichzeitig mit einem entsprechend grösseren Pumpstand verbunden sind.

Wie weiter oben gesagt, ist das innere Volumen der Absaugkammer nur unwesentlich grösser als das Volumen des Vakuumrohrs, d.h. im Falle eines Vakuumrohrs für einen 80 Liter Boiler kleiner als 20 Liter. Dies damit der gewünschte Unterdruck rasch und kostengünstig mit kleinen Pumpstände erreicht werden kann.

## 2.4 Herstellkosten abschätzen

Die folgende Kostenschätzung geht von der Realisierung der in Tabelle 10 gelb hinterlegten Variante "Vakuumrohr + 2 PIR-Stopfen der Höhe 200 mm mit 2 Aluminiumfolien im Vakuumspalt" aus. Die Stärken der Stahlwände werden mit 0.15 mm innen und 0.4 mm aussen angenommen und der angenommene Produktionsablauf entspricht dem im vorigen Abschnitt geschilderten.

Für die Werte in Tabelle 11 wird von einer Jahresproduktion von 24'000 Stück im 2 Schicht Betrieb (total 4000 h/a) ausgegangen. Dies entspricht einer Produktion von 6 Vakuumrohren pro Stunde für welche wir einen Bedarf von 2 dauernd anwesenden Personen annehmen.

Zur Berechnung des Bedarfs an Vakuumpumpständen, Absaugkammern mit Löteinrichtung sowie der Stromkosten für Vakuum und Heizen gehen wir davon aus, dass jedes Vakuumrohr 8 Stunden lang auf 400°C beheizt im Vakuum verbleibt. Dies ergibt einen Bedarf von je 20 Pumpständen und Absaugkammern.

Die in Tabelle 11 angegebenen Kosten für Stahl und Aluminium basieren auf uns vorliegenden Angeboten. Sie berücksichtigen die für die Erzeugung der Sicken notwendige Mehrlänge des unverformten Aussenrohrs. Die Kosten für Getter sind aus Angaben im Internet geschätzt und diejenigen für PIR aus den Marktpreisen ( z.B. [www.sager.ch](http://www.sager.ch) ) für dieses Material abgeleitet.

Mit diesen Kosten für PIR werden auch die Herstellkosten einer konventionellen, 85 mm dicken PIR-Isolation für einen 80 Liter Boiler abgeschätzt.

Bearbeitungskosten inklusive Personal, Wartung und Strom	Kosten / Vakuumrohr
Kosten Stahl	CHF 70.00
Stahlbearbeitung: rollen, schweissen, Sicken formen, heizen	CHF 9.00
Kosten 2 Alufolien, 50 µm	CHF 4.00
Folien formen, einbringen	CHF 2.00
Kosten Getter	CHF 5.00
Getter einbringen	CHF 2.00
Vakuum erstellen: Pumpen, Ausheizen und Lötten des Vakuumrohrs	CHF 27.00
Kosten PIR	CHF 10.00
PIR einschäumen	CHF 2.00
Total Vakuumspalt-Isolation	CHF 131.00
Kosten konventionelle 85 mm PIR Isolation	CHF 34.00
Mehrkosten Vakuumspalt-Isolation	CHF 97.00
resultierende Erhöhung Verkaufspreis	CHF 291.00
realisierte Vakuumspalt-Isolation: Rohr, 2* PIR 200mm, 2 Folien (siehe Tab.7, gelbe Zeile)	
Verlustenergie berechnet [kWh/a]	46
Einsparung bez. 240 [kWh/a]	194
Stromkosten [CHF/kWh]	0.19
Einsparung / a [CHF]	37
Amortisation Mehrkosten [Jahre]	8

Tab. 11 Kostenschätzung Vakuumpalt-Isolation mit Vergleich zum Lastenheft

Als Resultat unserer Abschätzung erhalten wir Herstellkosten von CHF 131.00 für eine Vakuumpalt-Isolation, welche die Zielsetzung "Gross" mit einer Energie-Einsparung von 193 kWh/a und Einsparung an Stromkosten von CHF 37.00 / a erreicht.

Nach Abzug der geschätzten Kosten für eine 85 mm PIR-Isolation (CHF 34.00) bleiben Mehrkosten von CHF 97.00 und eine daraus resultierende, geschätzte Erhöhung des Verkaufspreises von CHF 291.00.

Da die zur Amortisation der Mehrkosten für die Vakuumpalt-Isolation benötigte Zeitspanne damit 8 Jahre beträgt, ist die kostenmässige Zielsetzung "Gross" (8 Jahre) erreicht.

Wir kommen nochmals kurz auf die Variante Wärmepumpenboiler zurück.

Wir benötigen zunächst eine Preisschätzung für einen - am Markt nicht erhältlichen - 80 Liter Wärmepumpenboiler. Eine Schätzung der Preiserhöhung des 80 Liter Boilers mit Wärmepumpe erhalten wir aus den Werten die auf topten.ch für entsprechende 300 Liter Boiler angegeben sind. Im Ratgeber Boiler wird dort mit den Preisen CHF 4500 bzw. CHF 2000 gerechnet, was CHF 2500 für die Wärmepumpen-Einrichtung entspricht. Wir nehmen an, eine entsprechend kleinere Einrichtung für einen 80 Liter Boiler koste 60 % davon, also CHF 1500.

Die Preise für 80 Liter Boiler mit 85 mm PIR-Isolation liegen bei knapp € 700 (s. Tabelle 4) bzw. ca. CHF 800. Addieren wir den oben geschätzten Preis für die Wärmepumpen-Einrichtung, so erhalten wir einen geschätzten Preis von CHF 2300 für einen 80 Liter Wärmepumpenboiler.

Mit den Werten aus Tabelle 11 erhält man einen Gesamtpreis für einen mit Vakuumpalt isolierten 80 Liter Boiler von CHF 800+300 = CHF 1100 und für einen Wärmepumpenboiler mit Vakuumpalt-Isolation von CHF 2300+300 = CHF 2600.

Tabelle 12 zeigt eine Darstellung, die der oben erwähnten Webseite nachempfunden ist. Als Strompreis haben wir wieder CHF 0.19 / kWh angenommen. Der Gesamt-Energiebedarf  $P_{tot}$  berechnet sich jeweils als Summe der Nutzenergie von 1247 kWh/a - welcher Tabelle 5 zu entnehmen ist - und dem Strombedarf zur Kompensierung der Verluste durch die Isolation.

	Boiler mit PIR-Isolation	Boiler mit Vakuumpalt-Isolation	Wärmepumpen-Boiler mit PIR-Isolation	Wärmepumpen-Boiler mit Vakuumpalt-Isolation
Verlustkompensation [kWh/a]	240	46	72	14
$P_{tot}$ [kWh/a]	1'487	1'293	446	388
kWh/20 a	29'740	25'860	8'922	7'758
Stromeinsparung kWh/20 a	-	3'880	20'818	21'982
Stromkosten 20 a	CHF 5'651	CHF 4'913	CHF 1'695	CHF 1'474
Einsparung Strom 20 a	-	CHF 737	CHF 3'955	CHF 4'177
Kaufpreis	CHF 800	CHF 1'100	CHF 2'300	CHF 2'600
Kauf + Strom 20 a	CHF 6'451	CHF 6'013	CHF 3'995	CHF 4'074

Tab 12 Vergleich mit Wärmepumpenboiler

Es ist klar, die relativ kleine zusätzliche Investition in einen Boiler mit Vakuumpalt-Isolation lohnt sich in energetischer Hinsicht (Einsparung 3.8 MWh/20a) und die monetären Einsparungen über 20 Jahre zahlen nicht nur die Mehrinvestition von CHF 250, sondern auch einen Teil des Boilers zurück.

Ebenso klar ist, dass die prozentual sehr hohe Zusatzinvestition in einen Wärmepumpen-boiler eine ungleich höhere Stromeinsparung (20.8 MWh/20a) bringt und über die Einsparungen mehr als die gesamten Kosten des Wärmepumpenboilers zurückzahlt.

Klar ist auch, dass die Vakuumpalt-Isolation eines Wärmepumpenboilers hinsichtlich der Stromeinsparung (22 MWh/20a) Sinn macht. Auch hier kommen über die Einsparungen bei den Stromkosten mehr als die gesamten Kosten des Wärmepumpenboilers zurück, so dass sich die Mehrinvestition in eine Vakuumpalt-Isolation auch hier rechnet.

## 2.5 Konzeptvarianten bewerten

Auf der Basis der in Abschnitt 3 beschriebenen Funktionsmuster und der an diesen durchgeführten, in Abschnitt 4 dargestellten Messresultate kommen wir zum jetzigen Zeitpunkt zu folgendem Schluss:

Es zeichnet sich aus unserer Sicht ab, dass die Varianten "Vakuumrohr mit 2 PIR-Stopfen" zu bevorzugen sind.

Wir tendieren zur Favorisierung dieser Varianten im Allgemeinen, wegen der Einfachheit ihres Aufbaus und den daraus resultierenden relativ einfachen Anlagen zur Formung des Stahls und zur Evakuierung, was wiederum die in Abschnitt 2.4 geschätzten, akzeptablen Herstellkosten stark beeinflusst.

Im Speziellen tendieren wir entweder zu der in Tabelle 10 stark gelb hinterlegten 200 mm Variante mit 2 Folien, weil die rot markierte 300 mm Variante in thermischer Hinsicht keine wesentliche Verbesserung bringt und wegen des höheren Materialbedarfs mit Sicherheit teurer ist.

Alternativ könnte aber auch die in Tabelle 10 schwach gelb hinterlegte 100 mm Variante mit 2 Folien zu favorisieren sein, die zwar in energetischer Hinsicht nicht ganz so gut ist, aber eine - allenfalls wichtige - kleinere Bauhöhe aufweist und weniger teuer ist.

### 3 Funktionsmuster

#### 3.1 Konstruktion

Für die Funktionsmuster galt es eine Variante zu wählen, welche möglichst einfach zu fertigen ist und welche deshalb eine möglichst hohe Erfolgswahrscheinlichkeit bietet.

Damit stand für uns von vornherein fest, dass Funktionsmuster vom Typ "Vakuumrohr mit 2 PIR-Stopfen" (siehe Figur 4) hergestellt werden sollten.

Nachdem wir Hersteller gefunden hatten, für welche die Herstellung eines Wellrohrs, d.h. eines Rohrs mit rundum laufenden Sicken (siehe Figuren 9, 10) kein Problem ist, stand der prinzipielle Aufbau der Funktionsmuster fest:

Ein inneres glattes Leitrohr der Windstärke 0.15 mm eingeschweisst in ein Wellrohr mit Wandstärke 0.4 mm, wobei beide Rohre aus austenitischem Stahl bestehen.

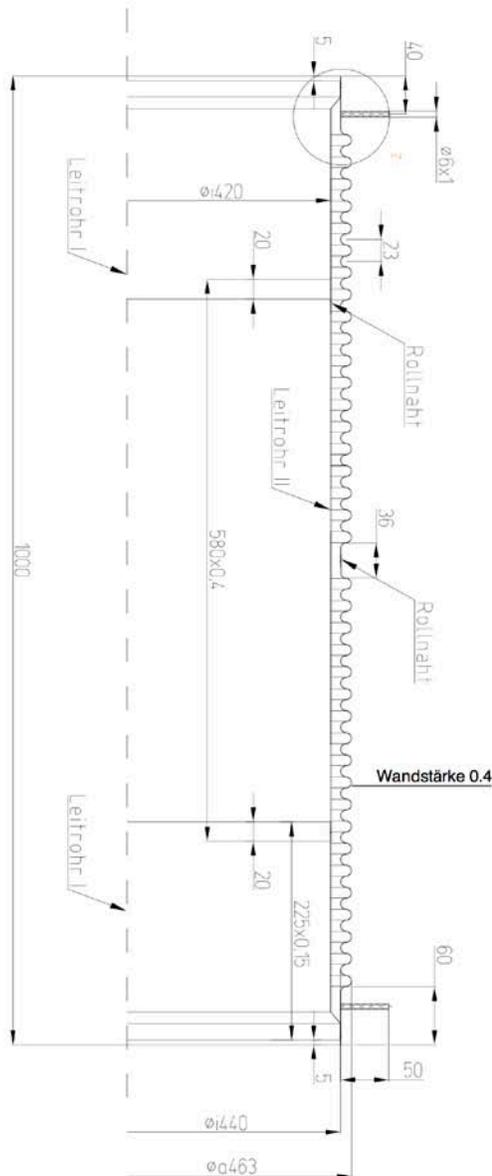


Fig.15 Konstruktionszeichnung des Vakuumrohrs für die Funktionsmuster

Nach eingehenden Diskussionen mit dem von uns gewählten Hersteller der Funktionsmuster, welche die Fertigung und das Ausmessen eines kleineren Testrohrs beinhalteten, ergab sich die in Figur 15 dargestellte Konstruktion des Vakuumrohrs.

Unsere Überlegungen bezüglich Wärmestrahlung im Vakuumpalt haben ergeben, dass strahlungsmindernde Folien im Vakuumpalt unerlässlich sind und dass schon eine Folie mit Emissionsgrad ca. 0.04 den strahlungsbedingten Wärmefluss auf ca. 1/10 des Wertes ohne Folie reduziert.

Zur Verifizierung dieser bislang nur theoretischen Erkenntnisse wurden 3 Funktionsmuster entworfen und gebaut. Eines dieser Funktionsmuster hat keine strahlungsmindernde Folie im Vakuumpalt. Die beiden andern sind mit einem bzw. zwei zylindrischen Körpern aus Aluminiumfolie im Vakuumpalt ausgerüstet. Die Halterung dieser strahlungsmindernder Körper erfolgt gemäss Figur 16 mittels wenigen Spiralfedern aus Innoxstahl, welche sich am Innenzylinder des Vakuumrohrs abstützen.

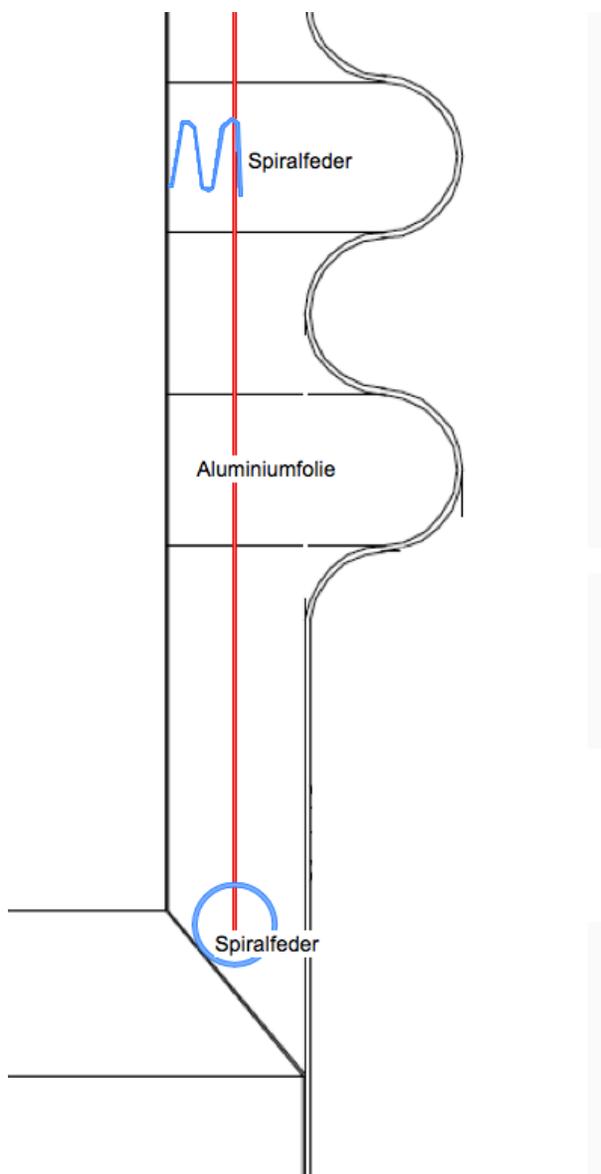


Fig. 16 Aluminiumfolie zur Strahlungsminderung

### 3.2 Fertigung

Die gesamte Fertigung der Vakuumrohre erfolgte im Haus des von uns gewählten Herstellers. Figur 17 zeigt einige Phasen des Fertigungsablaufs.

Die Wellrohre und Innenrohre wurden zunächst aus Bandstahl entsprechender Stärke Längsnaht geschweisst und anschliessend umgeformt.



Fig. 17 Fertigung eines Vakuumrohrs

Anschliessend wurde die Aluminiumfolie mittels Spiralfedern am Innenrohr abgestützt und beide zusammen in das Wellrohr eingeschoben. Nach dem Rollnaht-Schweissen der Rohrenden wurde ein Lecktest durchgeführt.

In der Folge wurden bei Helbling Technik die 20 cm dicken PIR-Stopfen in die beiden Enden der Vakuumrohre eingebracht. Dies geschah mittels jeweils 2 handelsüblichen, 10 cm dicken, auf den passenden Durchmesser geschnittenen PU-Platten mit einer nominellen Wärmeleitfähigkeit von 0.023 W/mK.

## 4 Messungen

### 4.1 Messaufbau

Die Messungen beschränken sich auf die Bestimmung der thermischen Verlustenergie durch die gesamte, aus Vakuumrohr und PU-Stopfen bestehende Isolationshülle. Hierfür wurde der den Wasserbehälter repräsentierende freie Innenraum für die unterschiedlichen Vakuumrohrtypen mit zwei unterschiedlichen konstanten Heizleistungen beheizt. Nach Erreichen eines thermisch stabilen Zustandes wurden die Temperaturmessungen vorgenommen.

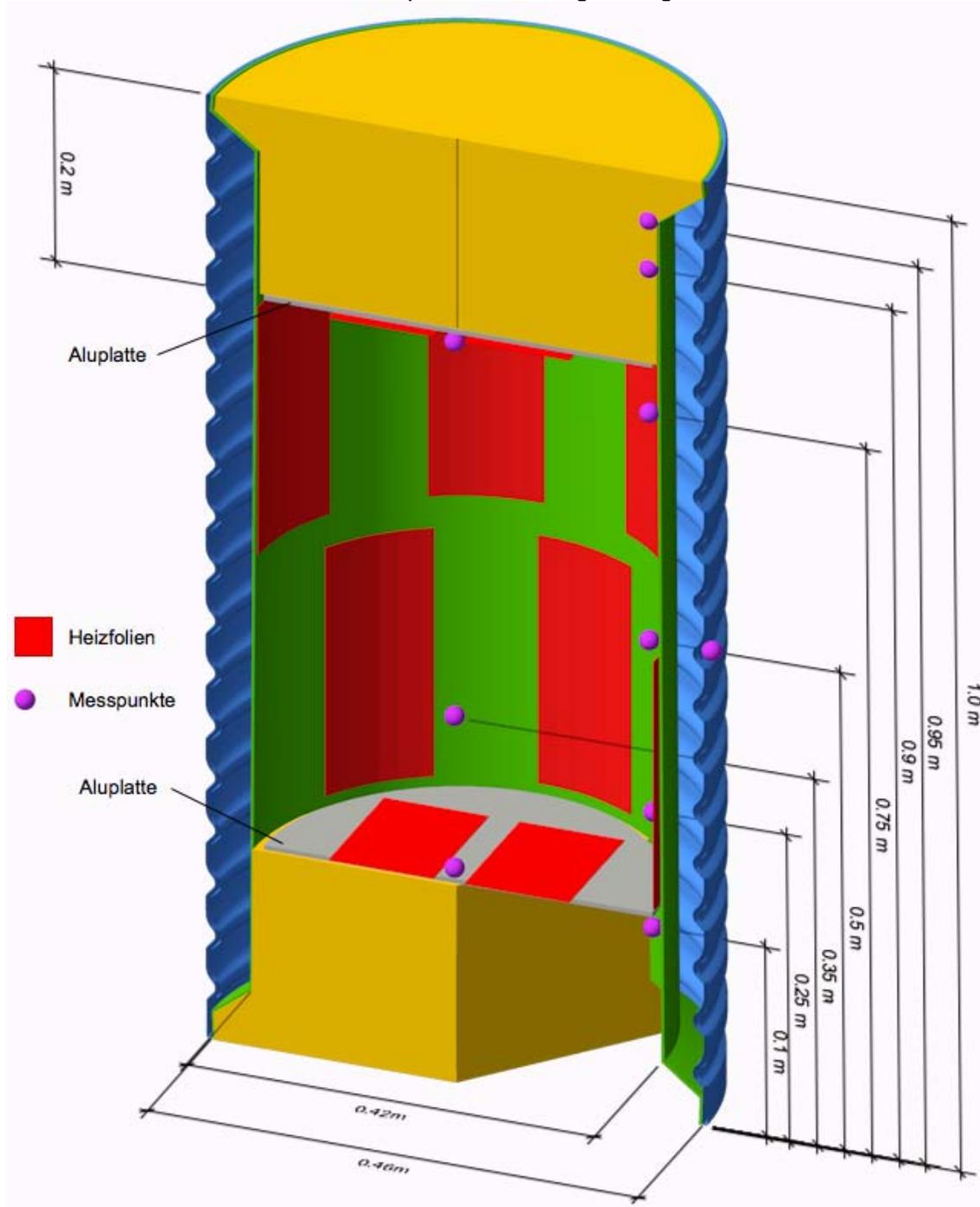


Fig. 18 Messanordnung

Figur 18 zeigt die hierfür gewählte Anordnung von Heizfolien und Punkten an welchen die Temperatur gemessen wurde.

Die Verteilung der Heizfolien wurde so gewählt, dass an der Innenwand des Vakuumrohrs bzw. an der Innenfläche der PU-Stopfen jeweils dasselbe Verhältnis von Heizfläche zu Gesamtfläche resultierte und die Folien möglichst gleichmässig verteilt waren. Zur Verbesserung der Wärmeverteilung wurden die Folien zur Beheizung der PU-Innenfläche zunächst auf eine entsprechende Aluminiumscheibe aufgeklebt, welche ihrerseits mit dem PU verklebt wurde.

Temperaturmessungen erfolgten jeweils an total 11 Punkten, nämlich auf unterschiedlicher Höhe an 6 Punkten der Vakuumrohr-Innenwand, an Mittelpunkt der beiden Aluminiumscheiben, ca. im geometrischen Mittelpunkt des Vakuumrohrs sowie an einem mittleren Punkt der Rohraussenfläche. Die Umgebungstemperatur wurde in ca. 1 m Distanz vom Vakuumrohr bestimmt.

#### 4.2 Messresultate

Figur 19 zeigt die gemessenen Temperaturen im Beharrungszustand bei zwei unterschiedlichen Heiz-, bzw. Verlustleistungen am Beispiel des Vakuumrohrs mit einer strahlungsmindernden Aluminiumfolie.

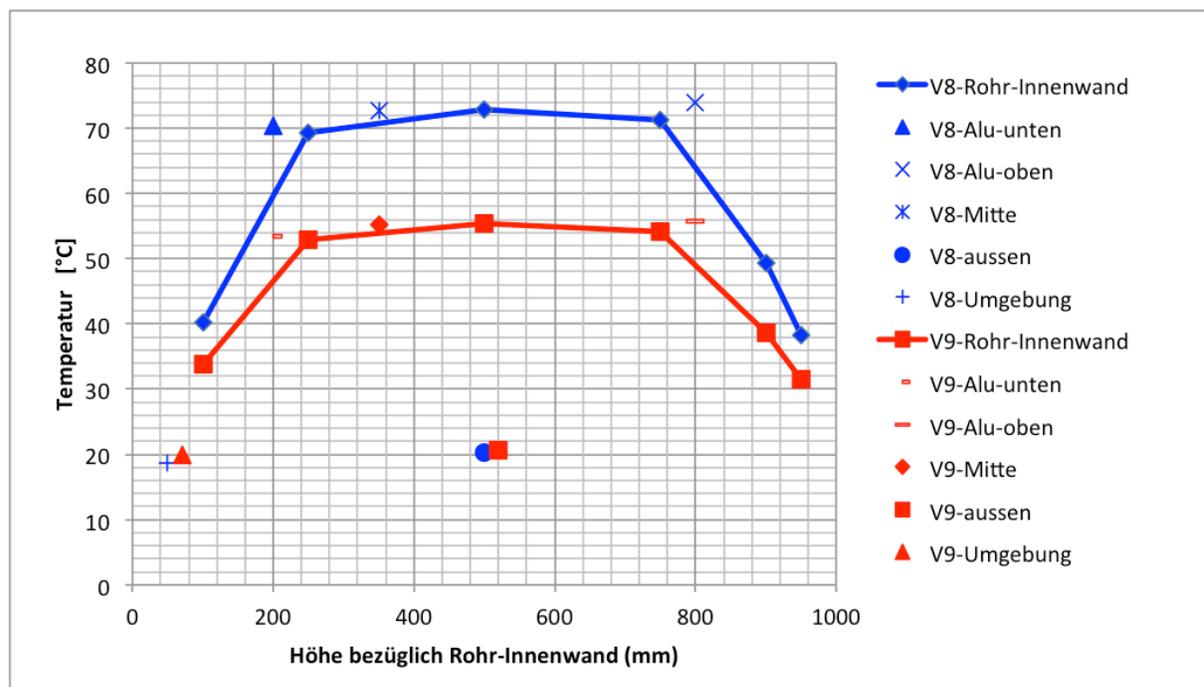


Fig. 19 Temperaturverteilung (Beharrungszustand) am Vakuumrohr mit einer strahlungsmindernden Folie bei konstanter Leistung 11.2 W (V8) bzw. 6.2 W (V9)

Für die anderen gemessenen Rohr-Typen (keine bzw. 2 Folien) ergaben sich entsprechende Resultate.

Damit ein Vergleich mit den - mittels analytischen und FEM Methoden berechneten - theoretischen Werten stattfinden kann, wurde jeweils eine mittlere Innentemperatur als Mittelwert sämtlicher innen gemessenen Temperaturen berechnet. Dieser Mittelwert stimmt für alle Messungen sehr gut mit der am geometrischen Mittelpunkt des Vakuumrohrs gemessenen Temperatur überein.

Zur der in Figur 20 - am Beispiel mit einer strahlungsmindernden Aluminium-Folie - dargestellten thermischen Verlustleistungen in Funktion der Temperaturdifferenz innen-aussen wurde jeweils die entsprechende Differenz dieses Mittelwerts von der Umgebungstemperatur genommen.

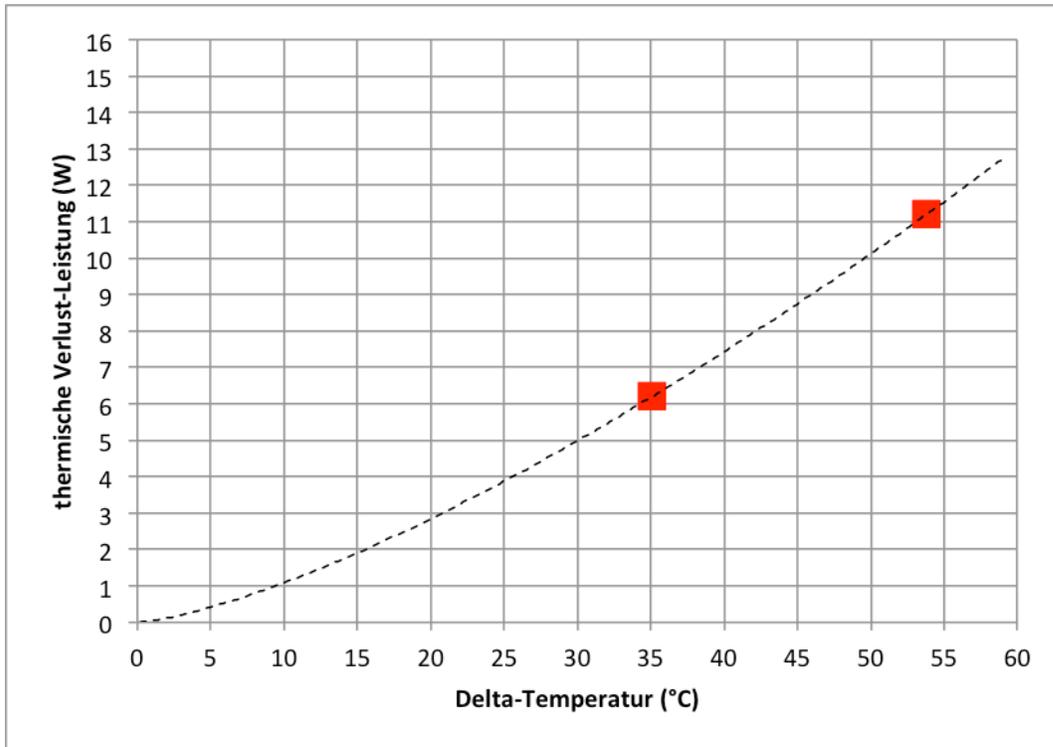


Fig. 20 thermische Verlustleistung in Funktion der Temperaturdifferenz innen- aussen (Beharrungszustand) am Vakuumrohr mit einer strahlungsmindernden Folie

Tabelle 13 zeigt eine Zusammenstellung der an den drei Funktionsmustern gemessenen und auf den Jahresbedarf umgerechneten Verlustenergie, wobei jeweils mit dem interpolierten Wert bei  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$  gearbeitet wurde.

Zusätzlich wurden die entsprechenden Werte mit analytischen bzw. FEM-Methoden berechnet. Für die beiden Fälle mit keiner bzw. mit einer strahlungsmindernden Folie stimmen Messung und Berechnungen gut überein und ergeben die erwarteten Werte.

Bauart Vakuumspalt	Dicke bzw. Höhe PIR mm	Vakuumspalt mm	Anz. Alu Fol.	Verlust analytisch kWh /a	Verlust FEM kWh /a	Verlust Mess. kWh/a	Verlust Redukt. kWh /a	Verlust Redukt. %
"modern" überall PIR	85	-	-	240				
<b>FuMu, 0F</b>	<b>200</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>188</b>	<b>182</b>	<b>184</b>	<b>56</b>	<b>23%</b>
<b>FuMu, 1F</b>	<b>200</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>64</b>	<b>67</b>	<b>65</b>	<b>175</b>	<b>73%</b>
<b>FuMu, 2F</b>	<b>200</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>46</b>		<b>78</b>	<b>162</b>	<b>68%</b>

Tab. 13 Gemessene und berechnete Verlustenergie an den Funktionsmustern

Der gemessene Wert für das Funktionsmuster mit 2 strahlungsmindernden Folien liegt erheblich höher als der erwartete Wert von ca. 46 kWh/a (Tabelle 10, Zeile 13) und ist sogar schlechter als der Wert des Funktionsmusters mit einer Folie. Dies bedeutet aber nicht, dass zwei richtig angebrachte Folien nicht besser wären als eine Folie, sondern es zeigt, dass beim Bau des Funktionsmusters eine - nicht gewollte und zukünftig zu vermeidende - starke thermische Kopplung zwischen den beiden Folien und der warmen Wand aufgetreten ist.

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Untersuchung des Standes der Technik und des Marktes bezüglich Boilern haben bestätigt, dass eine Verlagerung des Schwerpunktes dieser Arbeit weg vom zylindrischen Kühlschrank und hin zum zylindrischen Boiler gerechtfertigt ist.

Die durchgeführten konzeptionellen Arbeiten, die thermischen und strukturmechanischen Berechnungen sowie der Bau und thermische Vermessung von Funktionsmustern haben gezeigt, dass die thermische Isolation von Boilern mit Vakuumpalt gegenüber den heute besten, d.h. mit PIR oder PUR isolierten Boilern, eine Reduktion der Wärmeverluste durch die Isolation von bis über 80% bringen kann.

Eine entsprechende Vakuumpalt-Isolation kann beispielsweise mit einem doppelwandigen - im Spalt zwischen den Wänden evakuierten - Rohr aufgebaut sein, welches einen zylindrischen Boiler umschliesst. Die Hohlräume oberhalb und unterhalb des Boilers sind beispielsweise mit PIR-Stopfen isoliert.

FEM-Berechnungen und die gebauten Funktionsmuster haben gezeigt, dass ein solches Rohr mit einer Wandstärke von 0.15 mm auf der Innenseite und einer Stärke von 0.4 mm auf der Aussenseite aufgebaut sein kann. Mit dieser Bauweise ist, mit einem Mehrgewicht von ca. 5 kg gegenüber einer konventionellen PIR-Isolation, ein akzeptables Gewicht der Isolation erreichbar. Eine erste Idee für einen möglichen Fertigungsablauf und eine auf dieser basierende erste Kostenabschätzung machen plausibel, dass auch der Preis eines mit Vakuumpalt isolierten Boilers im gewünschten Rahmen bleiben kann.

## Ausblick

Mit dem Abschluss dieser Arbeit ist aus der Sicht der Helbling Technik AG ein Stand erreicht, bei welchem die erarbeiteten Resultate in eine industrielle Entwicklung übergeführt werden können.

In einer ersten sich anbahnenden Zusammenarbeit mit dem Institut für Solartechnik der Hochschule für Technik Rapperswil sollen eine Anzahl Prototypen von 500 Liter Pufferspeichern mit Vakuumpalt-Isolation realisiert werden. Mittels FEM wurde bestätigt, dass die oben vorgestellte Bauweise sich auch für Warmwasserbehälter dieser Grösse - bis hinauf zu ca. 1000 Liter - eignet.

In diesem Sinne wird Helbling Technik nun die entsprechenden schweizerischen und europäischen Hersteller der Haustechnik-Branche kontaktieren, mit welchen grossteils schon langjährige Zusammenarbeit besteht.