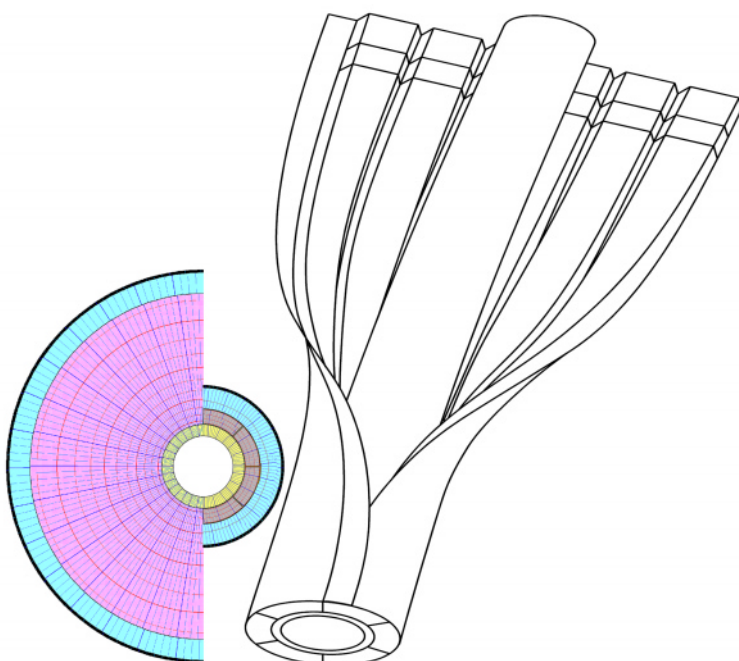


# Hochisulationsleitungen

Schlussbericht Vorstudie



Ausgearbeitet durch

**R. Weber**

**Energiesysteme/Haustechnik, EMPA**

Im Auftrag des

**Bundesamtes für Energie**

Dezember 2001

**Auftraggeber:**

Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"  
Bundesamt für Energie

**Auftragnehmer:**

EMPA, Abt. Energiesysteme/Haustechnik

**Autor:**

R. Weber

**Dank**

Der Autor dankt allen Beteiligten, die die vorliegende Studie in irgendeiner Form unterstützt haben:

- dem BFE und der EMPA für die Finanzierung
- Dr. Randel, Wacker Chemie, für seine kritische Beurteilung des Herstellungsprozesses
- M. Erb und H.P. Eicher für die Einführung in das Thema Hochisolation
- V. Dorer für die Projektbegleitung und die Mithilfe bei der Berichterstellung

2001

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist der Studiennehmer verantwortlich.

**Programmleitung**

M. Zimmermann, EMPA ZEN, 8600 Dübendorf [www.empa.ch/ren](http://www.empa.ch/ren)

Vertrieb: EMPA ZEN, [zen@empa.ch](mailto:zen@empa.ch)  
ENET, [reg.enet@temas.ch](mailto:reg.enet@temas.ch)

## Kurzfassung

Die Vakuumisolationstechnik bringt für die Gebäudeisolation bessere Wärmedämmungen resp. erhebliche Platz- und Volumeneinsparungen mit sich. Diese Studie befasst sich mit der Frage, inwieweit die Vakuumisolationstechnik auf flexible Leitungen für Haustechniksysteme übertragen werden kann. Ausgehend vom momentanen Stand der Technik wurden Möglichkeiten bezüglich konstruktivem Aufbau und Herstellung untersucht und das Potential der Vakuumisolation bezüglich Dämmvermögen und Durchmesserreduktion im Vergleich zu herkömmlich isolierten Rohren mit Hilfe von 2-D Finite Elemente Berechnung dargestellt. Abschliessend wird der Inhalt eines möglichen Forschungsprojektes skizziert, in dem die anstehenden Probleme aufgegriffen und Prototypen hergestellt und geprüft werden sollen. Schwerpunkt der Untersuchungen betreffen die umhüllende Folie. Im Vordergrund stehen dabei Fragen der Fügetechnik, der Gasdichtheit, der Dehnbarkeit sowie der Temperaturfestigkeit und damit verbunden der Alterungsbeständigkeit.

## Abstract

With vacuum insulation technology, better thermal protection and considerable place or volume savings respectively are achieved for building insulation. This study investigates, how far vacuum insulation technology can be transformed to be applicable on flexible pipes for building system matters. Some possibilities concerning construction and fabrication have been proposed. With the aid of 2-dimensional finite element calculations, the potential of vacuum insulation concerning insulating values and reduction of the outer diameter compared to conventional pipes has been examined. Finally, a research project is outlined where actual problems shall be picked up and where prototypes shall be tested.

The main focus will be on the foil, which is used to envelop the insulation body. Major topics are welding, gas-tightness and elasticity as well as temperature stability and aging stability.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	4
2.	Zusammenfassung .....	4
3.	Stand der Isolationstechnik.....	5
3.1.	Industrielle konventionelle Produkte .....	5
3.2.	Ansatzpunkte für erhöhte Isolationswirkung .....	5
3.3.	Hochisolationstechnologien .....	8
4.	Hochisolationstechnik für Leitungen: Stand und aktuelle Probleme .....	10
4.1.	Geometrie .....	10
4.2.	Folie .....	10
4.3.	Wärmebrücken.....	10
4.4.	Beweglichkeit .....	11
4.5.	Herstellung .....	11
4.6.	Installierbarkeit .....	12
5.	Möglichkeiten für Aufbau und Herstellung .....	13
5.1.	Dünne Umwicklung mit Vakuumbandagen .....	13
5.2.	Umwicklung mit Bandage und Kryptonfüllung .....	13
5.3.	Längssegmentierte Umwicklung .....	14
5.4.	Isolation in der Rohrwand .....	14
5.5.	Halbschalen .....	15
5.6.	Schuppenförmige Umwicklung .....	15
5.7.	Bewertung der Varianten .....	16
6.	Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit .....	17
7.	Generelles Anwendungspotential für Leitungen mit Hochisolationstechnologie .....	19
8.	Vorschlag Forschungsprojekt .....	20
8.1.	Ziele .....	20
8.2.	Vorgesehene Arbeiten.....	20
8.2.1.	Materialfragen Folie .....	20
8.2.2.	Fügen der Folie.....	20
8.2.3.	Optimierung der Formgebung .....	20
8.2.4.	Aspekte der Fabrikation .....	22
8.2.5.	Prototypenherstellung .....	22
8.2.6.	Alterungsbeständigkeit.....	22
8.2.7.	Ökologische und gesundheitliche Aspekte .....	22
8.3.	Partner .....	22
9.	Referenzen.....	23

## Zeichenerklärungen

### **Variablen**

d	Dicke
h	Wärmeübergangskoeffizient
Kn	Knudsen Zahl
r	Radius
U	U-Wert (ehem. k-Wert), Wärmedurchgangskoeffizient
$\beta$	Gewichtungsfaktor
$\gamma$	Materialkonstante
$\delta$	Porengrösse
$\lambda$	spez. Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	spez. Dichte

### **Indizes**

a	Aussen
i	Innen
Rad	Strahlung
0	Luft bei Standardbedingungen (0° C, 1013 mbar)

### **Abkürzungen**

LD	Low density
HD	High density
VPE	Vernetztes Polyethylen
PE	Polyethylen
PET	Polyethylen Terephthalate
PS	Polystyrol
PU	Polyurethan
XPS	Polystyrol

# 1. Einleitung

Die Hochisolationstechnik (auch Superisolation genannt) ist noch relativ jung und daher teilweise noch im Experimentalstadium. In dieser Studie wurde hauptsächlich geprüft, ob es möglich wäre, mit Vakuumisolation hochwärmegedämmte Leitungen herzustellen. Allgemeine Materialfragen wurden nur soweit betrachtet, wie sie für dieses Projekt notwendig waren. Absolut neue und noch nicht eingeführte Techniken und Materialien wurden weniger beachtet, das Interesse galt mehr bereits vorhandenen Möglichkeiten und deren Anwendung auf hochisolierende Leitungen.

Speziell angeschaut wurden bewegliche Flex- und Metalleitungen, wie sie für Brauchwarmwasser oder Heizungen üblicherweise verwendet werden. Die Beschränkung auf diese Gruppen erfolgte, weil sie heute stark verbreitet sind und weil diese Leitungen in der Regel nicht isoliert verlegt werden, d.h. es ist ein Potential zum Energie sparen vorhanden. Leitungen, die 105°C und höher ertragen müssen, wurden bewusst aus dieser Studie ausgeklammert, da die dort gestellten Anforderungen an das Folienmaterial ungleich höher sind und daher mit einem anderen Projekt angegangen werden müssten.

# 2. Zusammenfassung

## Fragestellung, Auftrag

In dieser Studie sollte geklärt werden:

- welche Technologien zur Herstellung endloser Leitungen in Vakuumtechnologie in Frage kommen
- welche Materialien und Abmessungen für die Herstellung solcher Leitungen zweckmässig sind und welche thermischen Eigenschaften erreicht werden können
- welche Industriepartner an einer gemeinsamen Entwicklung interessiert wären
- wie ein Entwicklungsprojekt zu definieren wäre.

## Resultate

Für die Beweglichkeit der Leitungen konnten vielversprechende Lösungsansätze gefunden werden, auch wenn die Vakuumisolation selber nicht besonders flexibel ist.

Der Füllkörper für Vakuumisolationen ist zum heutigen Zeitpunkt auf einem gut entwickelten Stand. Mehr Probleme machen die umhüllenden Folien. Diese sind für den vorgesehenen Einsatz weder genügend gasdicht noch genügend verformungsstabil. Aber auch zu hohe Temperaturen können zu einem frühzeitigen Versagen der Folie und damit der Isolation führen. Mit Hilfe von 2-dimensionalen Finite Elemente Berechnungen mit vereinfachten Randbedingungen konnte gezeigt werden, dass bereits mit 2-4mm dicken Isolationsschichten die Wärmeverluste gegenüber dem nicht isolierten Rohr auf 15-25% abgesenkt werden könnten. Dies bedeutet, dass sich isolierte Flexrohre direkt in die Baukonstruktion einlegen liessen.

An einer Entwicklung interessiert zeigten sich insbesondere Folien- und Isolationshersteller.

## Folgerungen

In einem möglichen Forschungsprojekt "Hochisolationsleitungen" müssten die Probleme mit der Folie angegangen werden. Die Gasdichtheit der Folien hat einen zentralen Einfluss auf die gesamte Vakuumisoliertechnik (auch auf die Paneele) und ist noch nicht befriedigend gelöst.

Gegenüber Paneelen für die Bausolation unterscheiden sich die Leitungsisolationen nicht nur durch die Form, sondern auch durch die hohen Anforderungen an die Beweglichkeit und Temperaturbeständigkeit. Für die Lösung dieser Probleme muss noch nach alternativen Materialien gesucht werden.

Die Berechnungen zeigen eine gute Wirkung der Vakuumisolation.

### 3. Stand der Isolationstechnik

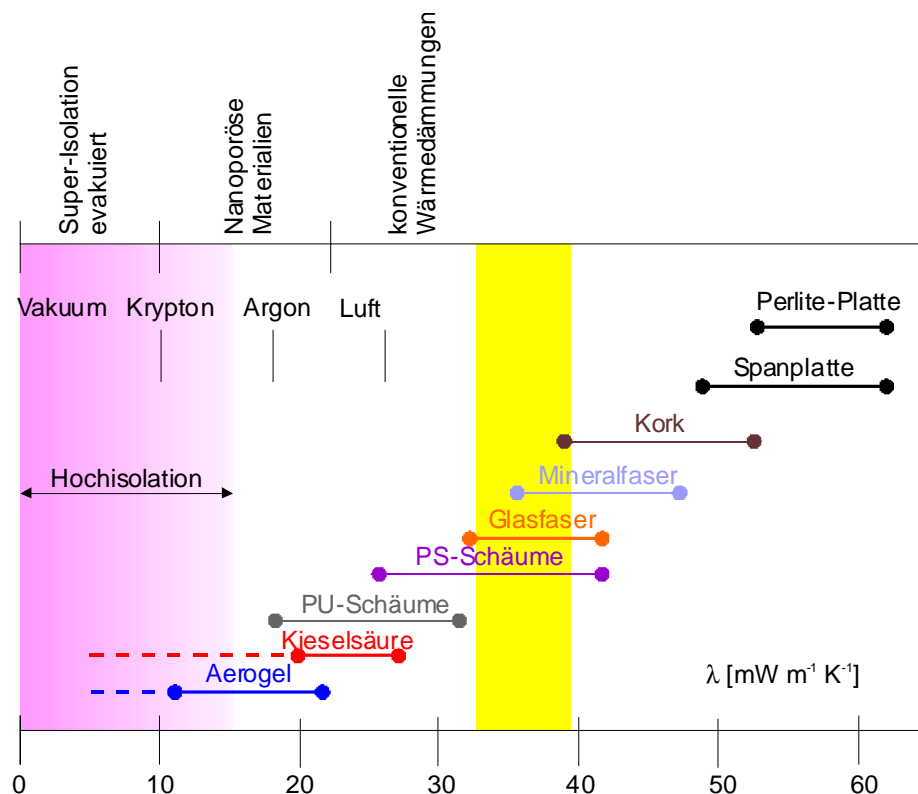
Isolationen werden eingesetzt um Wärmeflüsse zu vermindern. Durch grössere Schichtdicken bei den Isolationen können kleinere Flüsse erreicht werden. Für ebene Flächen (1-dimensionaler Fall) gilt ein linearer Zusammenhang zwischen Dicke und Wärmeleitfähigkeit [1]:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_a}} \quad (1)$$

(1) bedeutet: um einen gleich grossen Wärmefluss zu erhalten, wird bei einer halb so grossen Wärmeleitfähigkeit ' $\lambda$ ' der Isolation die Schichtdicke ' $d$ ' ebenfalls halbiert.

#### 3.1. Industrielle konventionelle Produkte

Heute verbreitete industrielle Produkte haben eine Wärmeleitfähigkeit im Bereich von ca. 36 mW/(mK) (gelber Balken in Darstellung 1) [2]. Die Hochisolationstechnik behandelt dagegen einen Bereich kleiner 15 mW/(mK).



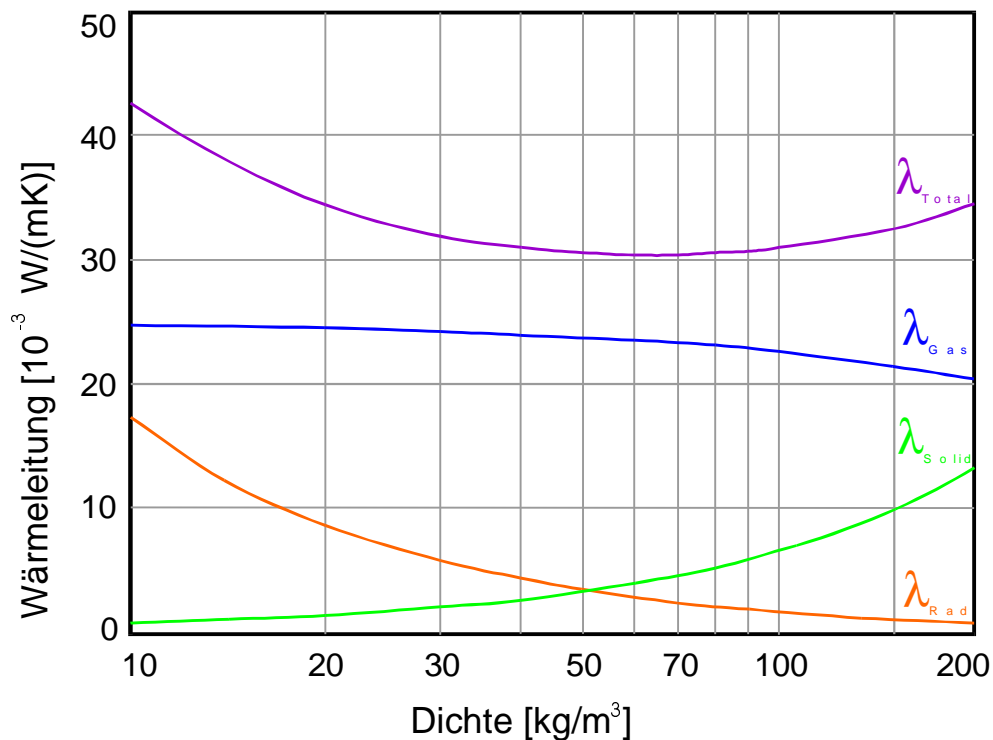
Darstellung 1: Typische Werte für verschiedene Isolationsprodukte

#### 3.2. Ansatzpunkte für erhöhte Isolationswirkung

Darstellung 2 zeigt eine exemplarische Darstellung der Verhältnisse bei der Wärmeleitung. Die gesamte Wärmeleitung wird von drei Faktoren bestimmt:

- Wärmeleitung durch Gas
- Körperleitung
- Wärmeleitung durch Strahlung

Je nach Material und Gasfüllung liegt das Minimum der Wärmeleitung im Vergleich zur Dichte an einem anderen Ort. Auffallend ist der hohe Anteil der Gasleitung an der gesamten Wärmeleitung. Wenn man die Gasleitung eliminiert oder zumindest einschränkt, wird eine (viel) kleinere Gesamtleitung erreicht.

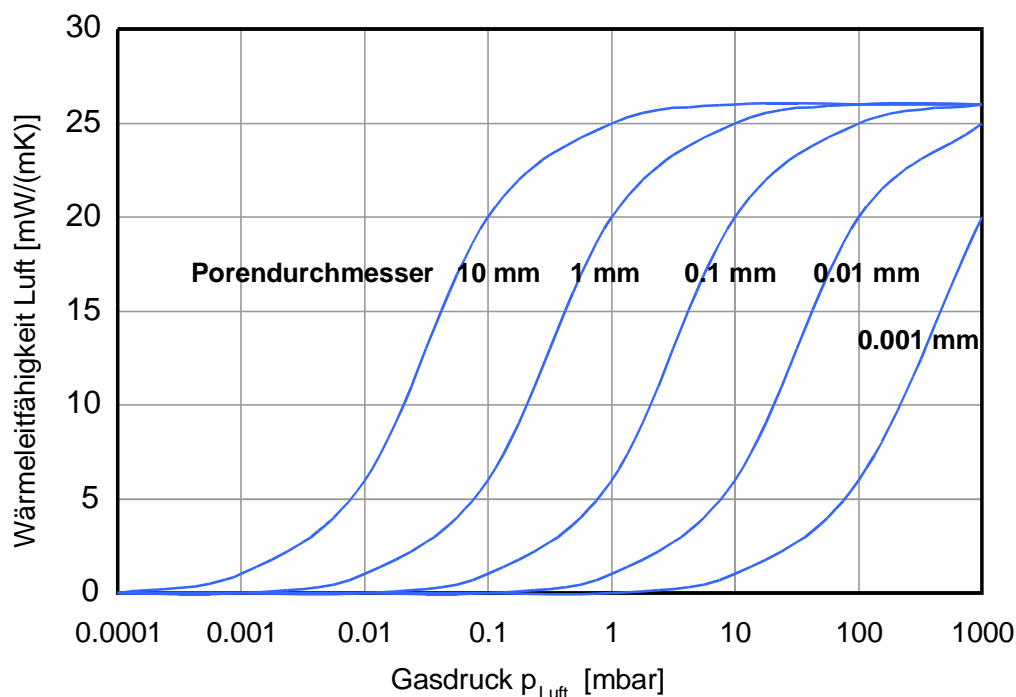


Darstellung 2: Exemplarische Darstellung der Zusammensetzung von Wärmeleitungsmechanismen

Die Wärmeleitung durch Gas wird mit Hilfe von drei Effekten eingeschränkt:

- Absenkung vom Absolutdruck (Erzeugen von Vakuum)
- Verminderung der Porengröße
- Verwendung eines einatomigen schweren Gases

Alle diese Massnahmen zielen darauf, die Anzahl der elastischen Stösse im Gas einzuschränken, bzw. die Knudsen-Zahl (siehe unten) zu erhöhen. In der Darstellung 3 ist der Zusammenhang zwischen Absolutdruck von Luft und Porengröße dargestellt [3].



Darstellung 3: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Luft in Funktion von Porengröße und Druck.



Diese Darstellung lässt die Vermutung zu, dass mit sehr kleiner Porengrösse auch bei Luft und normalem Umgebungsdruck ein verschwindend kleiner Anteil der Wärmeleitfähigkeit durch Gas erreicht werden kann. Gemäss [4] ist der Zusammenhang wie folgt zu beschreiben:

$$\lambda_{\text{Luft}} = \frac{\lambda_0}{1 + 2 \cdot \beta \cdot \text{Kn}} \quad [\text{W/m} \cdot \text{K}] \quad (2)$$

wobei  $\beta$  einen Gewichtungsfaktor und  $\lambda_0$  die Wärmeleitfähigkeit der Luft bei Standardbedingungen darstellen:

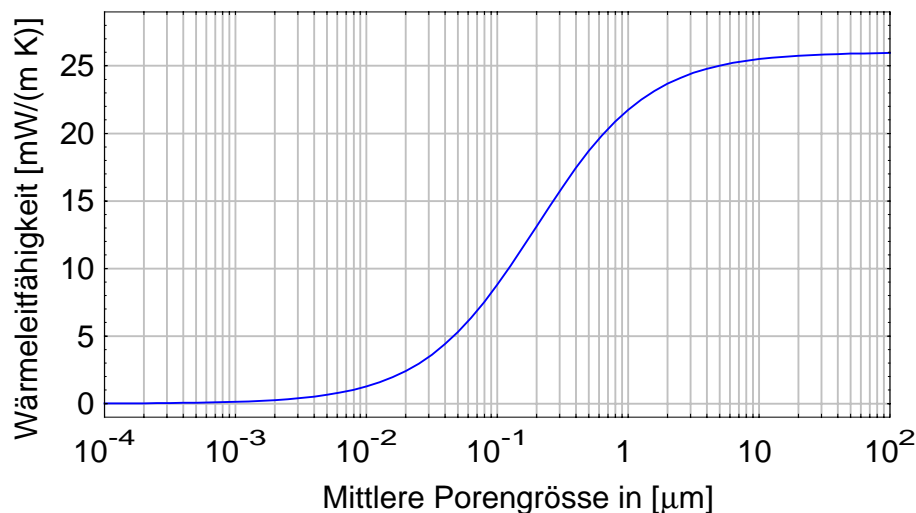
$$\lambda_0 = 0.026 \quad [\text{W/m} \cdot \text{K}]; \quad \beta \cong 1,63 \quad (3)$$

Kn in (2) bedeutet die Knudsen-Zahl und ist definiert als die mittlere freie Weglänge  $l_{\text{Luft}}$  der Gasmoleküle über der Porengrösse  $\delta$  des Materials.

$$\text{Kn} = \frac{l_{\text{Luft}}}{\delta} \square \frac{0.06 \mu\text{m}}{\delta} \text{ bei Standardbedingungen.} \quad (4)$$

(3) und (4) in (2) eingesetzt ergibt Wärmeleitfähigkeit der Luft in Abhängigkeit der Porengrösse:

$$\lambda_{\text{Luft}} = \frac{0.026 \cdot \delta}{\delta + 0.1956 \mu\text{m}} \quad [\text{W/m} \cdot \text{K}]; \quad \delta \text{ in } [\mu\text{m}] \quad (5)$$



Darstellung 4: Wärmeleitfähigkeit von Luft in Poren bei Standardbedingungen

Wie aus Darstellung 4 hervorgeht, wäre bei einer Porengrösse von ca. 1 nm die Wärmeleitung von Luft unter Standardbedingungen unterbunden. Bei kleiner Porengrösse nimmt allerdings auch die Dichte des Materials zu, da die Schüttung kompakter wird. Damit nimmt die Gerüstwärmeleitung zu. Dabei gilt nach Fricke [2]:

$$\lambda_{\text{Solid}} \square \rho^\gamma \quad (6)$$

Der Exponent  $\gamma$  ist materialabhängig. Für  $\text{SiO}_2$  liegt dieser Wert bei ca. 1.5, für Kunststoffe bei ca. 1.1. [7]

### 3.3. Hochisolationstechnologien

Verschiedene Typen von Hochisolationen wurden bereits für spezielle Zwecke entwickelt. In den meisten Fällen wurde Vakuum verwendet um die Wärmeleitung durch Gas zu unterdrücken. In der Praxis werden unterschiedliche Techniken eingesetzt um gasdichte Barrieren zu erhalten.

Gasdichte Materialien	Typische Anwendung als Isolation
Glas	Thermoskrüge, Vakuumfenster
Metalle	Thermoskrüge, Röhren, Kryotechnik
Beschichtete oder laminierte Folien	Paneele, Raumfahrt, Kryotechnik

Tabelle 1: Gasdichte Materialien für Vakuumisolationen

Barrieren aus Glas weisen meistens eine low emissivity Schicht auf, um den Wärmetransport durch Strahlung in Grenzen zu halten. Oft haben Glas- und Metallkonstruktionen eine genügend hohe Eigenstabilität, damit sich die gegenüberliegenden Oberflächen nicht berühren. Folien dagegen benötigen einen Füllkörper um eine isolierende Wirkung zu haben.

Füllkörper	Eigenschaften	Wärmeleitung mit Vakuum		Wärmeleitung ohne Vakuum mW/(mK)	Bemerkungen
		mW/(mK)	Pa		
Mehrlagige metallbeschichtete Folien mit Stützkörpern aus Keramik oder Kunststoffgewebe [4]	Schützt auch vor Weltraumstrahlung und elektrischen Streufeldern	3	< 0.01	~100 (unsicher)	Werden in der Raumfahrt und für kryotechnische Aufgaben eingesetzt
Faserfolien mit diversen mineralischen Fasertypen [4], [3]		2	< 10	27	Einfacher evakuierbar als Folienstapel
Offenzelliges XPS [3]		4	< 20	36	Benötigt Getter um tiefen Druck über lange Zeit zu halten
Fumed Silicagel (Kieselsäurepulver) [3]	nanoporöses Pulver mit Poren im Bereich von 50-100 nm	4*	< 1000*	19	
Aerogel aus SiO <sub>2</sub> [6], [11]	nanoporöser Festkörper in Kugeln mit bis zu 20 mm Durchmesser	4*	< 1000*	15-25	Strukturen so klein, dass Luft nicht mehr 100% durch Krypton ersetzt werden kann! [5]

\* Abhängig von der spezifischen Dichte des Füllkörpers

Tabelle 2: Füllkörper für Vakuumisolationen

In der Tabelle 2 sind die Angaben bezüglich des benötigten Vakuums als Größenordnungen zu verstehen. Zwei Gründe führen zu dieser Aussage:

1. Der angegebene Wert geht von einem sichtbaren Anstieg der Wärmeleitfähigkeit aus. Dabei wird wie in Darst. 3 die Wärmeleitfähigkeit über  $\log(p)$  aufgetragen. Denkbar wäre auch ein

Grenzwert in Beziehung zur Wärmeleitfähigkeit bei einem absoluten Vakuum (z.B. Faktor 2 der Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem Zustand bei 0 Pa).

2. Die Angaben sind abhängig von der spezifischen Dichte des Materials, bzw. von der Struktur der Folie und können starken Schwankungen unterworfen sein.

Da die Folien jederzeit undicht werden können, bspw. durch einen Nagel, stellt sich die Frage, wie gut die Isolationen nach dem Verlust des Vakuums noch sind.

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich, erreichen vor allem die nanoporösen Füllkörper auch bei Umgebungsdruck noch gute Werte.

## 4. Hochisolationstechnik für Leitungen: Stand und aktuelle Probleme

### 4.1. Geometrie

Bei Röhren ist der Zusammenhang zwischen U-Wert und Dicke des Dämmmaterials nicht linear:

$$U = \frac{1}{r_a \left( \frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln \frac{r_a}{r_i}}{2\pi\lambda} + \frac{1}{r_a h_a} \right)} \quad (7)$$

d.h., wenn beispielsweise bei einem 1" Rohr mit einer Isolierung von 30mm Dicke die Wärmeleitfähigkeit halbiert wird, so kann man bei gleichem Wärmefluss die Isolationsdicke nur auf ca. 17 mm verringern statt auf 15 mm wie es bei normaler 1-dimensionaler Betrachtung der Fall sein müsste (siehe auch Formel (1)). Je kleiner der Durchmesser des Innenrohres, desto grösser wird die Abweichung vom linearen Zusammenhang.

### 4.2. Folie

Um die Stützkörper einzupacken, wird eine Folie benötigt. Von der Folie wird in erster Linie Gasdichtheit verlangt. Diese Forderung führt zu Folien die entweder aluminiumkaschiert oder -bedampft sind. Der niedrige Preis einerseits und die geringe Neigung zur Wärmebrückenwirkung andererseits lässt PET/PE Folien mit SiO<sub>x</sub> Beschichtung [3] als Lösung erscheinen. Diese Folien hätten zudem den Vorteil, dass sie etwas mehr Dehnung ertragen und etwas weniger empfindlich auf Knittern reagieren [8]. Leider scheinen sie weniger gasdicht zu sein. Andere Hersteller (z.B. DuPont) haben Folien in ihrem Programm, die statt einer mehrere Gasbarrieren enthalten oder die wärmeunempfindlicher sind. Allerdings ist von diesen Folien die Wärmeleitung unbekannt. Einiges ist noch nicht gelöst:

- Für die dünnen Leitungsisolationen dieses Projektes sind alle Folien bis heute immer noch zu wenig gasdicht. Da das Volumen des Stützkörpers im Vergleich zur Oberfläche klein ist, ist die Zeit, bis das Vakuum abgebaut ist, entsprechend kurz.
- Beim Schweissvorgang treten immer noch sporadische Fehler auf, d.h., bei einem Teil der Isolationen ist die Naht bereits kurz nach der Herstellung undicht.
- Insgesamt ist die Schweissung / Klebung eine Schwachstelle der Isolation. Bei der Naht ist die Gasdurchlässigkeit überproportional gross.
- Bewegliche Leitungen verlangen beweglichere und dehnbarere Folien.
- Die Gasdurchlässigkeit der Folie ist temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur zu.
- Umgebungsfeuchtigkeit kann zu höherer Gasdurchlässigkeit führen.
- Temperaturen über 100°C können die mechanische Stabilität der Folie beeinträchtigen.
- Die Alterungsbeständigkeit der Folien ist unbekannt.

### 4.3. Wärmebrücken

Die Wärmeleitfähigkeit von SiO<sub>x</sub> beschichteten Folien liegt je nach Folienaufbau zwischen 0.2 bis 0.5 W/(mK). Eine Schichtdicke von ca. 600Å SiO<sub>x</sub> verändert die Leitfähigkeit der Folie kaum. Die Wärmeleitung wird daher im wesentlichen durch das verwendete Trägermaterial bestimmt. Auch wenn kein Aluminium als Sperrschicht verwendet wird, ist die Leitfähigkeit der Folie immer noch ca. 70 mal grösser als diejenige des Stützkörpers mit ~4 mW/(mK). Um den Einfluss der Sperrschicht auf die Wärmeleitfähigkeit sichtbar zu machen, wurden die Leitfähigkeiten berechnet (siehe Tabelle 4). Für die Berechnung dieses Beispiels wurde der Aufbau aus Tabelle 3 gewählt, variiert wurde nur die gasdichte Sperrschicht.

Material	Dicke in $\mu\text{m}$	Leitfähigkeit in $\text{W}/(\text{mK})$
PET	12	0.24 [9]
Beschichtung	0.06-7	Glas=0.81 / Aluminium=160 [10]
PET	12	0.24
PE (LD)	100	0.33 [10]

Tabelle 3: Aufbau der Folie

Beschichtung	Wärmeleitung in $\text{W}/(\text{mK})$		Einfluss auf Wärmeleitung in %	
	Transversal	Lateral	Transversal	Lateral
keine	0.308	0.313	0	0
600Å Glas	0.308	0.313	0.03	0.08
0.2 $\mu\text{m}$ Alu bedampft	0.308	0.570	0.16	182
7 $\mu\text{m}$ Alu kaschiert	0.325	8.845	5.63	2830

Tabelle 4: Wärmeleitung der Folie in Abhängigkeit der Sperrschicht

Der grosse Unterschied zwischen der Leitfähigkeit der Folie und derjenigen des Füllkörpers muss beachtet werden. Bei kleiner Segmentierung der Isolation entstehen viele Wärmebrücken. Damit kann sich die gesamte Wirkung der Vakuumisolation drastisch verschlechtern. Mit Hilfe von überlappenden Segmenten kann dieser Effekt etwas gemildert werden.

#### 4.4. Beweglichkeit

Vakuumisolation ist nicht besonders beweglich. Durch den äusseren Luftdruck muss die Isolation einem Druck von ca. 10'000  $\text{kg}/\text{m}^2$  standhalten. Selbst wenn der Füllkörper aus Fumed Silicagel besteht (ein höchst feines und bewegliches Pulver) und die Folien auch noch einigermaßen beweglich sind, in der Kombination und mit Vakuum werden die Isolationen steif. Zwischenräume zwischen dem Rohr und der Isolation führen zu einer Verschlechterung der theoretisch möglichen Wärmedämmwerte. Ein sattes Anliegen an das Rohr kann erreicht werden, wenn die Isolation sich gut Formen lässt, oder wenn sie bereits in der gewünschten Form produziert wird. Als zusätzliche Massnahme kann zudem mit einer äusseren Schutzhülle, in der Art eines Schrumpfschlauches, die Isolation an das Rohr angepresst werden.

An bewegliche Leitungen mit bereits aufgezogener Isolation, die auf dem Bau beim Einlegen noch gekrümmt werden, werden besonders hohe Anforderungen an die Folie gestellt. Erstens darf die Dehnung beim Krümmen nicht zu hoch sein (nicht grösser als ~4%) und zweitens muss die Umhüllung äussere mechanische Einflüsse gut verkräften.

#### 4.5. Herstellung

Eine hochoptimierte Isolation ist zu nichts nütze, wenn sie nicht oder nur sehr teuer produziert werden kann. Es ist absehbar, dass sich teure Isolationen am Markt nur schwer verkaufen lassen. Es ist daher ein einfaches Produkt gefragt, dass sich billig herstellen lässt.

Es ist sinnvoll, für bestehende nicht isolierte Produkte Dämmungen zu entwerfen, die mit einfachen und wenigen Arbeitsgängen auf Rohre appliziert werden können. Damit könnte die Isolationsherstellung von der Rohrherstellung getrennt werden. Eine getrennte Produktion des Vakuummaterials hätte zudem den Vorteil, dass solche Isolationen auch auf dem Bau noch nachträglich eingesetzt werden können.

Isolationen die für eine Pilotanlage entwickelt werden, sehen anders aus, als solche, die für eine industrielle Anlage optimiert werden. Pilotanlagen produzieren im Batchbetrieb, Industrieanlagen im Endlosbetrieb. Ein gutes Design sollte aber von beiden Anlagentypen produziert werden können.

Die heute erhältlichen Vakuumpaneele sind alle mit flachen Schweissverbindungen hergestellt. Für die Produktion von Leitungsisolierungen müssten aber gekrümmte Elemente hergestellt werden (siehe Kap. 4.4). Dies bedingt gekrümmte Schweissnähte, eine Technik, die bis jetzt noch nicht angewendet wurde.

#### **4.6.    *Installierbarkeit***

Das Verlegen isolierter Leitungen mit Isolation sollte nicht schwieriger sein als das Verlegen von nicht Isolierten. Systeme mit VPE- Rohren in Schutzrohren gestatten es jederzeit, einen Ersatz einzuziehen, falls das wasserführende Rohr beispielsweise durch Bohren verletzt wurde. Um dies auch für isolierte Rohre zu garantieren, müsste beim Verlegen der Mindestradius bei Biegungen etwas grösser gewählt werden, damit beim nachträglichen Einziehen einer Ersatzleitung nicht gleich die Vakuumhülle zerstört würde.

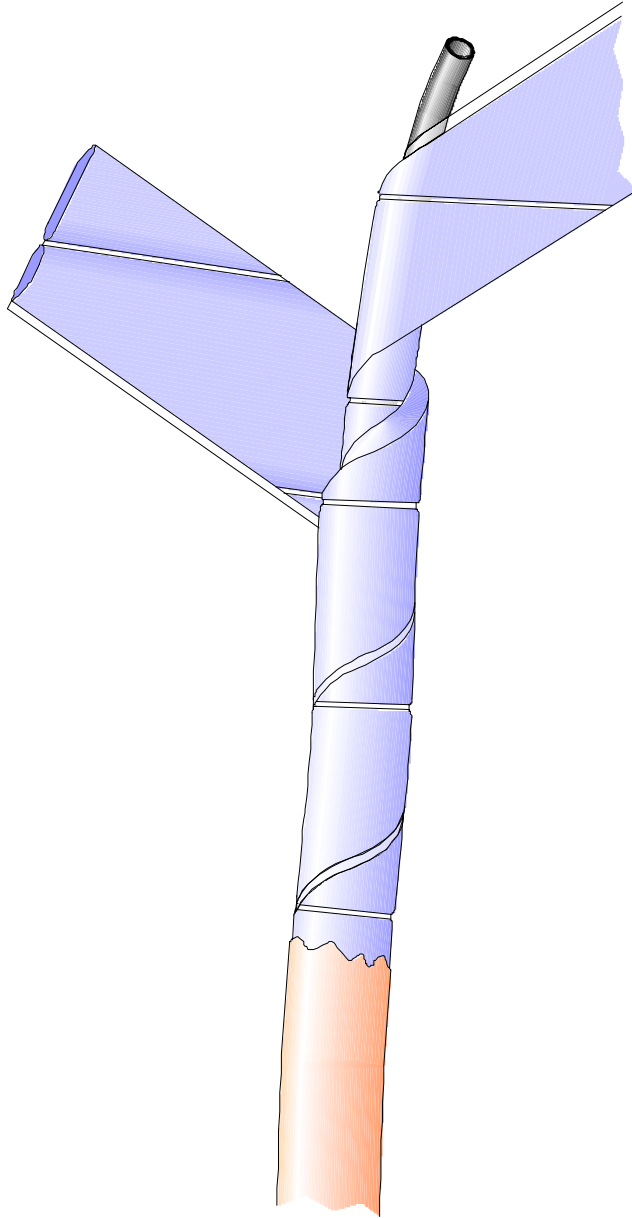
Durch die Segmentierung sollte es problemlos möglich sein, die Leitungen vor Ort auf die gewünschte Länge zu kürzen. Auch wird durch die Beschädigung einzelner Segmente nicht gleich die Isolation auf der gesamten Rohrlänge wirkungslos. Durch die relativ guten Isolationseigenschaften auch ohne Vakuum, wird auch bei einem Leck die Dämmung nicht gleich ganz unwirksam (siehe auch Kap. 3.3).

Für Anwendungen, die eine Mindestwärmedämmung verlangen, muss die Isolation so ausgelegt werden, dass bei Ausfall des Vakuums noch genügend Wirkung vorhanden ist. Anders ausgedrückt: die Isolation muss für kritische Applikationen auf den Schadensfall der Folie ausgelegt sein.

## 5. Möglichkeiten für Aufbau und Herstellung

In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Ideen für den Aufbau beschrieben – mit Ihren speziellen Vor- und Nachteilen.

### 5.1. Dünne Umwicklung mit Vakuumbandagen



Darstellung 5: Schematische Anordnung der Umwicklung mit Bandagen

#### Beschreibung

Leitungen können mit Bandagen umwickelt werden, die auf der einen Seite geschweisst sind und auf der anderen gefaltet. Die Segmentierung der Bandage ist schräg vorgesehen, so dass nach dem Wickeln die Segmentgrenzen senkrecht zur Leitung angeordnet sind. Bei einem allfälligen Kürzen der Leitung wird dann nur ein Segment pro Bandage verletzt. Die Bandagen sind versetzt angeordnet, um Wärmebrücken zu vermeiden. Über der äusseren Bandage schützt eine Hüllfolie die Isolation.

#### Vorteile

- Die Bandagen sind nach der Produktion problemlos an den Ort der Weiterverarbeitung transportierbar.
- Beim Biegen der Leitung können sich die Bandagen bewegen

#### Nachteile

- Beim Aufwickeln verzieht sich die Folie. Die Längenänderung der äusseren Folie zur inneren beträgt bei einer 2mm Bandage um ein 16mm Rohr ca. 25%. Die maximal erlaubte Dehnung der heute verwendeten Folien ist aber nur 4%!
- Durch das Vakuum wird der Füllkörper relativ starr. Beim Wickeln um die Röhre entstehen viele Knicke, die unkontrollierbare Wärmebrücken bilden.
- Die Bandagen werden sinnvollerweise endlos produziert. Die Herstellung von Prototypen im Batchbetrieb kann daher ziemlich aufwendig sein. Einzelne Stücke müssten zu einer langen Bandage zusammengefügt werden.

### 5.2. Umwicklung mit Bandage und Kryptonfüllung

#### Beschreibung

Als Variante zu der in Kapitel 5.1 vorgestellten Umhüllung, könnte die Bandage statt des Vakuums auch eine Gasfüllung mit Krypton enthalten.

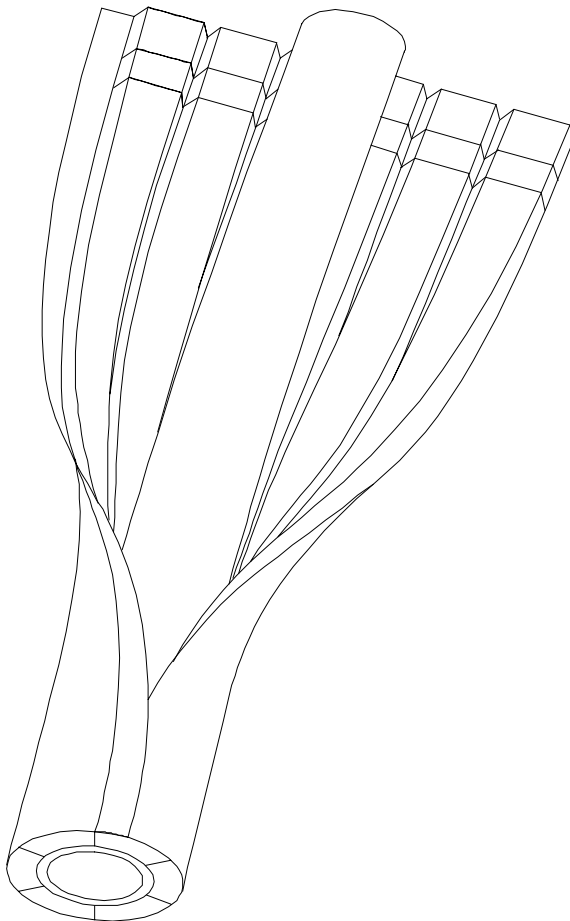
### **Vorteile**

- Gegenüber der Lösung in Kap. 5.1 ist die Isolation beweglicher und damit wird der Füllkörper weniger Knicken.

### **Nachteile**

- Die Isolationswirkung wird schlechter.

## **5.3. Längssegmentierte Umwicklung**



*Darstellung 6: Umwicklung mit Längskerben und Kunststoffeinslagen zur Quersegmentierung*

### **Beschreibung**

Diese Umwicklung ist mit Längskerben versehen. Die Folie ist auf einer Seite geschweisst, auf der anderen gefaltet. Die Füllkörper aus Kieselsäure werden als Längsstreifen eingelegt. Die Quersegmentierung kommt senkrecht zur Umwicklung zu liegen. Damit die Form der Folie über die Segmentgrenzen hinweg beibehalten werden kann, muss ein gasdichter Körper aus Kunststoff (z.B. Polyisobutylen?) eingeschweisst werden. Die Leitung wird der Länge nach wie ein Grashalm eingewickelt. Auf nebenstehender Zeichnung nicht eingetragen, aber trotzdem vorgesehen, ist eine Hüllfolie zum Schutze der Isolation.

### **Vorteile**

- Durch die Längseinschnürung sind vorgegebene Knickstellen vorhanden, die die Form der Wärmebrücken kontrollieren lassen.
- Die Längswicklung ist einfacher auszuführen als die spiralförmige Wicklung.
- Die Isolation kann einfach auf Rollen gewickelt und transportiert werden.
- Für grosse Serien sind die Umhüllungen einfach herzustellen.

### **Nachteile**

- Kleinster Biegeradius von isolierten Leitungen mit 2mm Isolation ist ca. 50 cm.
- Die Prototypenproduktion ist schwierig.
- Zur Vermeidung von Wärmebrücken sollten mindestens 2 Lagen versetzt auf die Leitungen gebracht werden.

## **5.4. Isolation in der Rohrwand**

### **Beschreibung**

Aerogele liegen in verschiedenen Korngrößen vor. Die Vorstellung ist die, dass man solches Granulat unter Vakuum in den Kunststoff einrührt und erst dann die Röhre produziert.

### **Vorteile**

- Keine zusätzlichen Arbeitsgänge um die Isolationshülle aufzubringen.



## Nachteile

- Gasdichtheit ist nicht geklärt.

## 5.5. Halbschalen

### Beschreibung

Für die nachträgliche Isolation von Leitungen kommen grosse, halbschalenförmige Elemente in Frage. Diese müssten in verschiedenen Längen hergestellt werden.

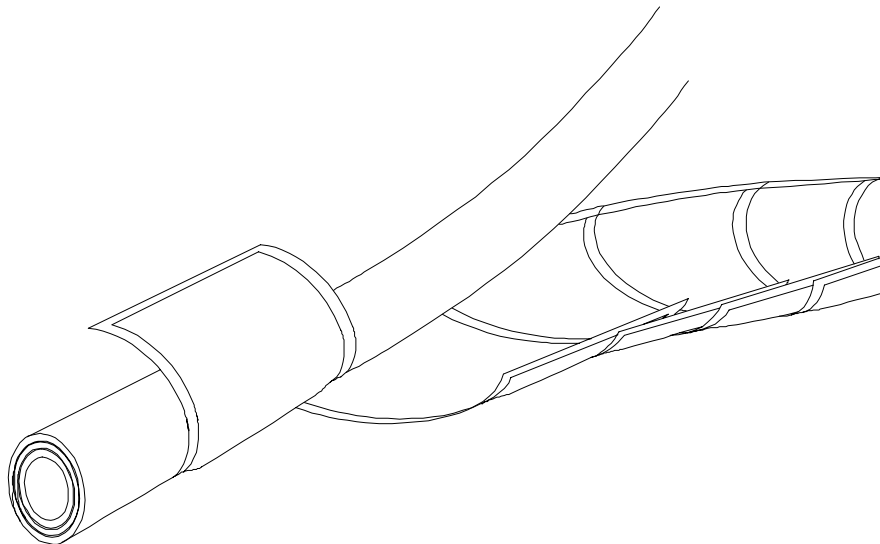
### Vorteile

- Kann an bestehenden Leitungen verwendet werden.
- Einfache Batchproduktion möglich.

### Nachteile

- Kann nicht bei beweglichen Leitungen angewendet werden.
- Darf bei der Montage nicht mit 'Gewalt' aufgezogen werden, da die Folie zerstört werden kann.

## 5.6. Schuppenförmige Umwicklung



*Darstellung 7: Umwicklung mit rechteckigen gekrümmt geschweissten Schalen*

### Beschreibung

Die Umwicklung besteht aus rechteckigen Schalen, die bereits rund geschweisst werden. Diese Schalen werden nach der Produktion an nur einer seitlichen Schweissnaht überlappend zu einem Band zusammengefügt. Damit bekommt die Umwicklung eine Röhrenform. Vor dem Aufziehen auf die Leitung muss diese "Röhre" etwas geöffnet werden. Als mechanischer Schutz wird eine Hülle vorgesehen (nicht auf der Zeichnung vorhanden).

### Vorteile

- Die Schalen sind im Prototypenstadium und in der Serie gleich Herzustellen.
- Durch die Überlappung werden die Effekte der Wärmebrücken minimiert.
- Die Leitung bleibt beweglich, weil sich die Schalen gegeneinander verschieben können.

### Nachteile

- Aufwickeln der Isolation auf grosse Rollen und der Transport vom Hersteller zum Verbraucher sind weniger einfach. Es besteht die Gefahr des Verdrückens.
- Viel Schweissnahtanteil im Vergleich zur Fläche, mit dem Risiko höherer Luftdurchlässigkeit.

### **5.7. Bewertung der Varianten**

Eine wesentliche Chance auf Erfolg kann bei den Varianten "5.3 Längssegmentierte Umwicklung" und "5.6 Schuppenförmige Umwicklung" erwartet werden. Bei der Variante 5.3 muss die schwierigere Herstellung der Isolation gelöst werden, dafür ist bei der Variante 5.6 eher ein Problem mit der Luftdichtigkeit in den Schweissnähten wahrscheinlich.

Die übrigen Varianten haben aufgrund des heutigen Kenntnisstandes eher kleine Chancen. Die Variante "5.1 Dünne Umwicklung mit Vakuum" führt bei der Leitungsherstellung zu grösseren Problemen und dehnt die äussere Folie über ein erträgliches Mass. Die Variante mit Kryptonfüllung verschenkt einen wesentlichen Isolationseffekt durch Gasleitung. Die "Isolation in der Rohrwand" hat den Nachteil, dass überhaupt keine Kontrolle der Gasdurchlässigkeit besteht und die Halbschalenvariante dürfte für die industrielle Herstellung einfach zu arbeitsintensiv sein.

## 6. Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit

Um den Vorteil von hoch isolierenden Schichten auf Leitungen abschätzen zu können, wurden mit Hilfe des Programms Bisco [12] zur Berechnung des 2-dimensionalen Wärmetransportes verschiedene Wärmeleitungsberechnungen über den Querschnitt durchgeführt. Dabei wurde als Grundlage ein handelsübliches Flex-Rohr mit Schutzrohr gewählt. Das Rohrmaterial ist vernetztes Polyethylen (VPE) und das Schutzrohr High density Polyethylen (HDPE). Der Originalaufbau wird zwischen Rohr und Schutzrohr mit einem mittlerem Abstand von ca. 4mm verkauft. Dieser Luftzwischenraum wird auch auf die anderen hypothetischen Konstruktionen übernommen, um vergleichbare Resultate zu erhalten.

Die Wärmeleitfähigkeit von HDPE beträgt  $0.5 \text{ W/(mK)}$  [10]. Für VPE konnte leider keine verlässliche Quelle gefunden werden. Daher wird ebenfalls eine Leitfähigkeit von  $0.5 \text{ W/(mK)}$  angenommen. Bisco berechnet im Normalfall für Luftzwischenräume eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit. Für unser Problem ist jedoch im Programm nichts vorgesehen. Somit wurde eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit [13] mit Hilfe des VDI-Wärmeatlas [14] (Kapitel Fc und Ka) berechnet. Auch bei diesen Berechnungen wurde eine Auswahl getroffen. Es wurde angenommen, die wasserführende Leitung sei waagrecht und konzentrisch im Inneren des Schutzrohres angeordnet. Eine nicht konzentrische Führung kann eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Luft um bis 10% zur Folge haben. Da diese Annahme jedoch für alle berechneten Fälle gleich gemacht wurde, bleiben die Resultate untereinander vergleichbar.

Um einen Wärmeverlust berechnen zu können, wurden folgende Randbedingungen festgelegt.

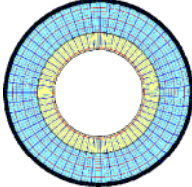
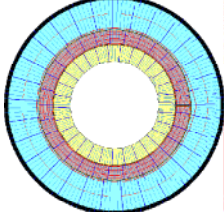
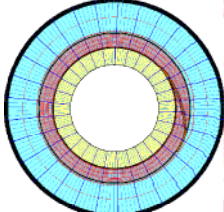
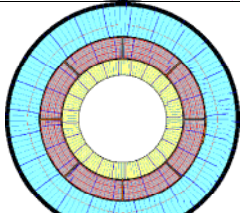
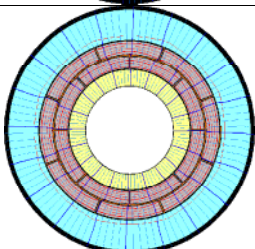
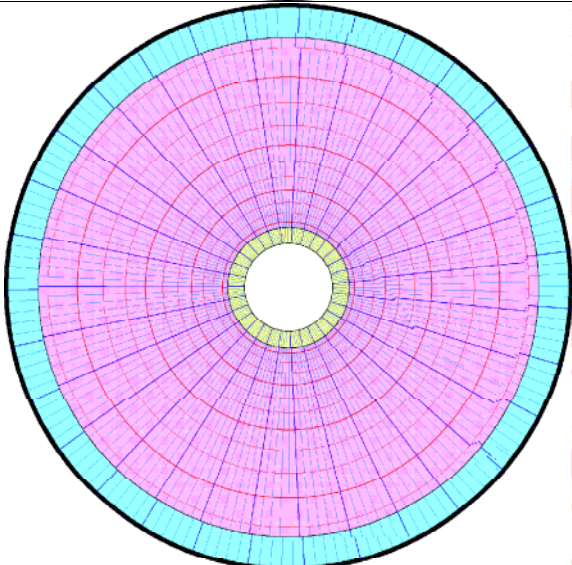
Innen: Laminar strömendes Wasser mit  $80^\circ \text{C}$  und einem  $h_w$  von  $200 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Aussen: Beton  $20^\circ\text{C}$  und einem  $h_b$  von ebenfalls  $200 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Die Wärmeleitfähigkeit der Folie wurde mit  $0.031 \text{ W/(mK)}$  und die des Stützkörpers mit  $0.005 \text{ W/(mK)}$  eingesetzt.

### Berechnungsergebnisse mit Bisco

In Darstellung 8 wurden die Dimensionen im Massstab 1:1 dargestellt, damit ein Eindruck entsteht, wie die Grössenverhältnisse aussehen.

	<p>Originalaufbau</p> <p>Wärmeleitung: 33.0 W/m</p> <p>Aussendurchmesser: 25 mm</p>
	<p>Aufbau mit 2mm Vakuumisolationsschicht Gestossener Übergang</p> <p>Wärmeleitung: 7.44 W/m</p> <p>Aussendurchmesser: 29 mm</p>
	<p>Aufbau mit 2mm Vakuumisolationsschicht Überlappender Übergang (Variante 5.6)</p> <p>Wärmeleitung: 7.49 W/m</p> <p>Aussendurchmesser: 29 mm</p>
	<p>Aufbau mit 3mm Vakuumisolationsschicht 8fache Längssegmentierung (Variante 5.3)</p> <p>Wärmeleitung: 6.04 W/m</p> <p>Aussendurchmesser: 31 mm</p>
	<p>Aufbau mit 2x2mm Vakuumisolationsschicht 2x8fache Längssegmentierung, versetzt angeordnet</p> <p>Wärmeleitung: 5.00 W/m</p> <p>Aussendurchmesser: 33 mm</p>
	<p>Aufbau mit 25 mm konventioneller Isolationsschicht (<math>\lambda = 0.032 \text{ W/(mK)}</math>),</p> <p>Wärmeleitung: 7.76 W/m</p> <p>Aussendurchmesser: 75 mm</p>

Darstellung 8: Vergleich der Grösse und Isolation der berechneten Varianten.

## 7. Generelles Anwendungspotential für Leitungen mit Hochisolationstechnologie

Vorgefertigte Hochisolationsleitungen können für nahezu alle in Neubauten anfallenden Wassertransportaufgaben eingesetzt werden.

Beim Brauchwarmwasser ergibt sich eine Verbesserung durch die langsamere Abkühlung des Heisswassers in den Leitungen, d.h. bei Stichleitungen muss weniger oft das kalte Wasser ausgestossen werden, bevor warmes Wasser verfügbar ist. Die Reduktion der Energieverluste hängt im wesentlichen von der Länge der Leitung und vom Zapfverhalten ab [15]. Bei längeren Stichleitungen können 10-15% der Verlustleistung durch Isolieren der Leitungen zurückgewonnen werden. Mit Konzepten, die für die am häufigsten gebrauchten Zapfstellen möglichst kurze Leitungen vorsehen, können noch einmal 10-20% eingespart werden. Somit lassen sich die Verluste der Leitungen um bis zu einem Drittel reduzieren. In einem EFH würde dies einem Minderverbrauch von ca. 100 kWh/Jahr entsprechen. Bei ca. 35m Rohrlänge, einem kWh-Preis von 10 Rp/kWh und einer Payback Time von 10 Jahren könnte der Aufpreis auf die Leitung bei ca. sFr. 3.- pro Meter liegen (siehe auch[15]).

Bei Zirkulationsschaltungen ist es besonders wichtig, dass gut isolierte Leitungen verwendet werden, da der Energieverlust durch die Temperaturhochhaltung gross sein kann.

Kaltwasserleitungen haben als generelles Problem die Kondenswasserbildung. Auch diese Leitungen wären in Zukunft einfacher realisierbar.

Die Zubringerleitungen zu den Heizverteiltern könnten ebenfalls mit solchen Leitungen gebaut werden, mit der Folge, dass die Wärme dort zur Verfügung steht, wo sie gebraucht wird. Heute werden diese Leitungen oft nicht isoliert, mit der Begründung, dass die verlorene Heizwärme im Haus sowieso gebraucht würde. Diese Argumentation ist vor allem für Kellerräume fraglich.

Ein zusätzliches Potential ergibt sich aus Sicht der Baubranche durch den kleinen Durchmesser, der mit diesen hochisolierten Leitungen möglich ist. Dadurch können sie erheblich besser in Decken und Wände eingelegt werden als Röhren mit konventionellen Isolationen.

Nebenprodukte der Leitungsisolation sind Isolationen für Heisswasser- und Kältespeicher. Die Probleme sind ähnlicher Natur wie bei Leitungen, nur müssen die Isolationen nicht beweglich sein. Gerade für kleine, gut isolierte Speicher ist der relative Platzgewinn gross.

## 8. Vorschlag Forschungsprojekt

### 8.1. Ziele

Ziel dieser Studie ist die Machbarkeit eines Projektes zu prüfen, mit welchem hochisolierende Leitungen entwickelt werden könnten. Damit ein solches Projekt zu einem Erfolg wird, müssen verschiedene Meilensteine erreicht werden:

- Es muss eine genügend gasdichte und bewegliche Folie gefunden oder entwickelt werden. Falls dieses Ziel nicht erreicht wird, wird das Projekt scheitern.
- Fragen des Fügens müssen geklärt werden. Damit sind Fragen zur Dichtigkeit und gebogene Fügestellen gemeint.
- Eine Konstruktion ist ausgewählt und für die Produktion angepasst. Diese Konstruktion ist zudem mit Hilfe von Berechnungstools energetisch optimiert.
- Prototypen sollen hergestellt werden, damit Probleme der Praxis aufgedeckt und Verbesserungspotential bestimmt werden kann.
- Die Prüfung der Alterungsbeständigkeit zeigt die Grenzen für die Einsatzgebiete auf.
- Der Einsatz von Vakuumisolationen sollte auch nach ökologischen Gesichtspunkten geprüft werden.
- Das Endprodukt muss in einem vertretbaren Preisbereich liegen, d.h. Komponenten und Arbeiten müssen wirtschaftlich gesehen optimiert werden.

### 8.2. Vorgesehene Arbeiten

#### 8.2.1. Materialfragen Folie

Für Anwendungen mit Temperaturen um die 100°C (und höher) ist die Beständigkeit der bisher verwendeten Folie nicht getestet worden. Für die Installation der Leitungen muss zudem eine gewisse Mindestbeweglichkeit gewährleistet werden. Ideal wäre eine neuartige Folie, die weniger Wärmeleitung aufweist, beweglicher wäre, höhere Temperaturen ertragen würde und eine noch kleinere Luftdurchlässigkeit hätte.

- Prüfen der bisher verwendeten Folie auf Luftdichtigkeit bei hohen Temperaturen
- Prüfen der bisher verwendeten Folie auf Luftdichtigkeit bei Bewegungen
- Suche nach besser geeigneten Materialien.
- Prototypenherstellung
- Prüfen der neuen Folie

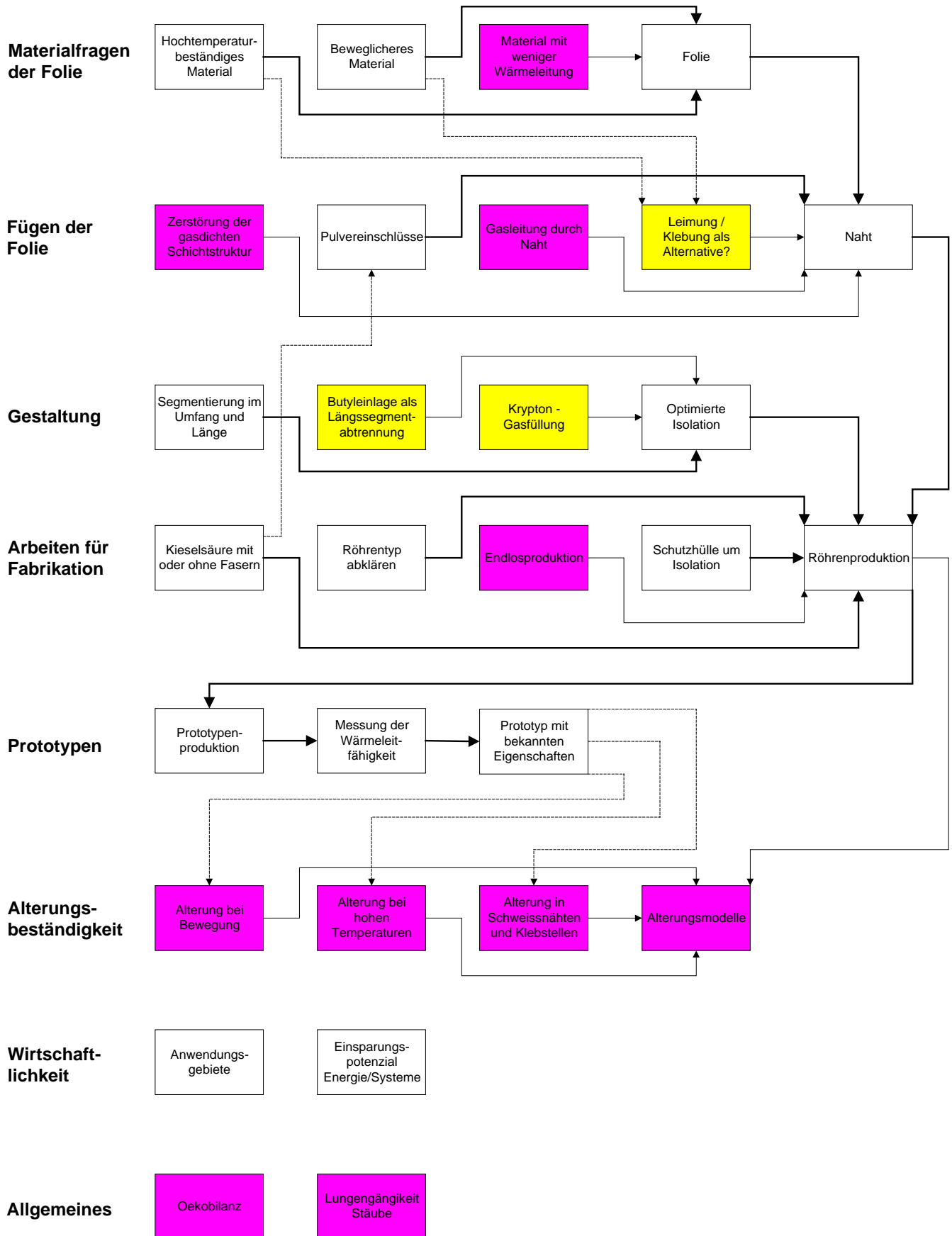
#### 8.2.2. Fügen der Folie

Eine wesentliche Bedeutung kommt der Fügetechnik der Folie zu. Beim Schweißen der Folie entstehen immer wieder Fehler die zu Vakuumverlust führen können. Um zuverlässigere Verbindungen zu erhalten sind folgende Dinge abzuklären:

- Wieviel Pulvereinschlüsse in der Schweissnaht zugelassen werden können
- Inwiefern die Schichtstruktur der Folie beim Schweißen zerstört wird und welche Folgen das haben kann
- Wieviel Gasleitung durch die Schweissnaht zu erwarten ist
- Ob Kleben statt Schweißen eine Alternative darstellt.
- Wie gebogene Kleb- bzw. Schweissnähte auszuführen sind

#### 8.2.3. Optimierung der Formgebung

Um die Leitungen auf der Baustelle ablängen zu können, ist eine Segmentierung der Isolierung notwendig. Bei den Segmentgrenzen entstehen zwangsläufig Wärmebrücken. Zwei wesentliche Anforderungen bestimmen die Form der Isolation: einerseits sollen Auswirkungen von Wärmebrücken klein gehalten werden und andererseits soll die Isolation dünn sein. Zudem muss ein einfacher Herstellungsprozess möglich sein.



Darstellung 9: Schematischer Ablauf des vorgesehenen Projektes

**Prioritäten:**

1. weisse Felder, Pfeile dick
2. rote Felder, Pfeile gestrichelt
3. gelbe Felder, Pfeile dünn

Nötige Arbeiten:

- Finite Elemente Berechnung zur Optimierung der Wärmeleitung.
- Je nach Formgebung: Abklären ob eine Längssegmentierung mit Einlagen sinnvoll sein könnte.
- Die Beweglichkeit der Leitung wird durch die stabile Form der vakuumierten Bandagen eingeschränkt. Mit einer Kryptongasfüllung wäre die Bandage beweglicher, hat aber auch eine höhere Wärmeleitung. Es soll abgeklärt werden, ob eine Kryptongasfüllung Vorteile bringen könnte.

#### **8.2.4. Aspekte der Fabrikation**

Die Herstellung der Isolation soll abhängig vom Durchmesser aber unabhängig vom Röhrentyp sein. Ziel ist es, eine Isolation zu erhalten die für vorgefertigte Produkte eingesetzt werden kann, die aber auch auf dem Bau zur (Nach-) Isolation taugt. Die Schichtdicken sollen so gewählt werden, dass Hüllen für dickere Rohre gerade als 2. oder 3. Lage bei kleineren Rohrdurchmessern verwendet werden kann. Zu erledigende Arbeiten:

- Abklärungen treffen, wieviel Fasern in der Kieselsäure verwendet werden sollen, damit eine gewisse Beweglichkeit der Isolation garantiert werden kann.
- Lösungen finden für gekrümmte Schweissung im Vakuum.
- Aspekte der Serienproduktion betrachten
- Für den Schutz der Isolation vor Verletzungen muss eine Hülle vorgesehen werden.

#### **8.2.5. Prototypenherstellung**

Nach der Festlegung und Berechnung der wichtigsten Parameter, werden mit Hilfe von Prototypen die Eigenschaften der Isolation kontrolliert.

#### **8.2.6. Alterungsbeständigkeit**

Um eine gewisse Sicherheit bezüglich der Dauerhaftigkeit der Eigenschaften (Vakuumverlust) zu gewinnen, müssen Modelle zur Alterungsbeständigkeit entwickelt werden und an Prototypen angewandt werden. Dabei ist zu berücksichtigen:

- Alterung durch Bewegung der Folie.
- Erhöhte Anforderungen durch erhöhte Temperaturen.
- Alterung in den Fügenähten.

#### **8.2.7. Ökologische und gesundheitliche Aspekte**

Mit Hilfe von Ökobilanzen soll gezeigt werden, wie sinnvoll im Vergleich zu aktuellen Lösungen der Einsatz von solchen Vakuumisolationen überhaupt ist.

Fumed Silica Gel hat eine Staubgrösse im Bereich von 50 nm. Die Lungengängigkeit dieser Stäube ist abzuklären, vor allem beim Einsatz auf dem Bau.

### **8.3. Partner**

Im wesentlichen zeichnen sich drei Problemkreise ab, bei denen mit Partnern zusammengearbeitet werden muss.

1. Fragen im Zusammenhang mit der Folie werden vorteilhafterweise mit einem Partner aus der Folienproduktion angegangen. Hier bietet sich eine Zusammenarbeit mit der Firma Lawson Mardon Neher AG, Kreuzlingen an. Nach mündlichen Besprechungen mit Herrn Lefebvre ist diese Firma an einer Zusammenarbeit interessiert. Sinnvollerweise sollte in diesem Themenkreis auch unsere Kunststoffabteilung mit einbezogen werden.
2. Die Produktion der Isolationen ruft nach einem Partner in der Isolationsproduktion. Gemäss Herr Randel von der Wacker Chemie, Kempten, könne man sich in einem noch zu definierenden Rahmen eine Mitarbeit vorstellen.
3. Auch ein Leitungsproduzent sollte bei diesem Projekt dabei sein. Bis jetzt konnte jedoch kein wirklicher Interessent gefunden werden.



## 9. Referenzen

- [1] Sagelsdorff Ralph, Frank Thomas: Element 29. Schweizerische Ziegelindustrie 2. Auflage 1993
- [2] Fricke Jochen: Physical Aspects of Heat Transfer and the Development of Thermal Insulations. HiPTI Kongress 2001, EMPA Dübendorf, Tagungsunterlagen
- [3] Eicher Hanspeter, Erb Markus: Schlussbericht BFE Projekt Hochleistungs-Wärmedämmung HLWD, Dezember 2000
- [4] VDI Wärmeatlas: Superisolationen. Springer Verlag, 8. Auflage 1997
- [5] Persönliche Besprechung mit F.J. Pötter, Cabot GmbH, Hersteller von Aerogel
- [6] Eicher Hanspeter, Erb Markus: Bericht Vorphase Hochleistungs-Wärmedämmung. BFE, Dezember 1997
- [7] Fricke Jochen: HiPTI Kongress 2001, Dübendorf, Angabe während des Vortrages.
- [8] Lefebvre Gérald: Ceramis Packaging for VIP, HiPTI Kongress 2001, EMPA Dübendorf, Tagungsunterlagen
- [9] Dominighaus Hans: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. VDI Verlag, 4. Auflage 1992
- [10] Anderson B.R. et al: Analysis, selection and statistical treatment of thermal properties of building materials for the preparation of harmonised design values. Final Report of the Thermal Values Group, EU-DG12, Project contract SMT4-CT96-2050, March 1999
- [11] Pötter F.J.: Nanogel<sup>TM</sup>. HiPTI Kongress 2001, EMPA Dübendorf, Tagungsunterlagen
- [12] BISCO 5.0w, computer program to calculate two-dimensional steady state heat transfer in objects with any shape using energy balance technique. Manual 25.10.99
- [13] Robert Weber: Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit. Technischer Bericht, EMPA 2001
- [14] VDI Wärmeatlas: diverse Kapitel. Springer Verlag, 8. Auflage 1997
- [15] Nipkow Jürg, Real Markus: Energieverluste von Warmwasserverteilsystemen und Sparpotentiale. EMPA-ZEN, 11. Schweizerisches Statusseminar 2000, Tagungsunterlagen