



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht** 30. Juli 2013

---

# **Anwendungen und Potenziale von Vakuum Spalt Isolation**

---

**Auftraggeber:**

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

**Auftragnehmer:**

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

**Autoren:**

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

<b>BFE-Bereichsleiter:</b>	Dr. Michael Moser
<b>BFE-Programmleiter:</b>	Roland Brüniger
<b>BFE-Vertragsnummer:</b>	SI/500552-05

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

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Projektziele	5
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	6
1. Überlegungen zu den maximal möglichen Anwendungstemperaturen von VSI	7
2. Kriterien zur Identifikation sinnvoller VSI-Anwendungen	9
3. Identifizierung von Anwendungsbereichen, Prozessen und Anlagen mit hohem $\Delta T$	9
4. Erweiterung und Spezifizierung der Anwendungsfälle durch Expertengespräche	14
5. Denkbare VSI Anwendungsfälle	14
6. Sinnvolle VSI Anwendungsfälle	19
6.1 Bewertung der Prozesse	19
6.2 "Nicht sinnvoll für VSI" bewertete Prozesse	27
6.3 "Sinnvoll für VSI" bewertete Prozesse	29
7. Identifizierung weniger Gruppen für VSI	31
7.1 Schlanker Zylinder	31
7.2 Kleiner, kurzer Zylinder	31
7.3 Schlanker Kubus	31
7.4 Kubus	31
8. Mögliche Aufbauten der VSI	32
8.1 Schlanker Zylinder	32
8.2 Kleiner kurzer Zylinder	36
8.3 Schlanker Kubus	38
8.4 Kubus	39
9. Abschätzung der potenziellen Gesamtenergie-Einsparung	41
Bewertung und Ausblick	44

# Zusammenfassung

Diese Studie versucht die Frage zu beantworten, wo industrielle Prozesse vorkommen, für die Vakuumpalt-Isolation (VSI) in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht sinnvoll sein könnten und wie entsprechende VSI aufgebaut sein könnten. Zur Bewertung vielversprechender Prozesse wurden Kriterien entwickelt. Es hat sich gezeigt, dass aus der Bewertung mehrerer 100 Prozesse mit grossem Temperaturunterschied zur Umgebung, weit über 50% nicht für einen sinnvollen Einsatz von VSI geeignet ist. Das Energiespar-Potenzial aller als sinnvoll bewerteter Prozesse ist für sich alleine gesehen wirtschaftlich interessant. Anhand einiger Beispiele konnten grosse gesamtschweizerische Energiespar-Potenziale aufgezeigt werden. Es konnten 4 geometrisch definierte Gruppen identifiziert werden, die jeweils eine ansehnliche Anzahl von Anlagen für verschiedene Prozesse beinhalten. Bezüglich dieser Gruppen wären jeweils untereinander sehr ähnliche VSI-Aufbauten möglich. Beispiele solcher VSI konnten aufgezeigt werden.

## Résumé

La présente étude essaie de trouver une réponse à la question de savoir d'une part, où se produisent des processus industriels pour lesquels, d'un point de vue technico-économique, l'isolation par le vide (IPV) pourrait être judicieuse et, de l'autre, comment des IPV correspondantes pourraient être configurées. Des critères ont été développés pour évaluer des processus prometteurs. L'évaluation de plusieurs centaines de processus présentant une grande différence de température par rapport à l'environnement a révélé que largement plus de 50 % des processus ne conviennent pas pour une utilisation judicieuse de l'IPV. En lui-même, le potentiel d'économie d'énergie de tous les processus estimés judicieux est intéressant du point de vue économique. Quelques exemples ont permis de révéler de grands potentiels d'économie d'énergie pour l'ensemble de la Suisse. Quatre groupes définis géométriquement contenant chacun un nombre important d'installations pour différents processus ont pu être identifiés. Pour ces groupes, des configurations d'IPV très similaires seraient possibles. Des exemples de tels IPV ont pu être montrés.

## Abstract

This study seeks to answer the question of which industrial processes could be of relevance to vacuum space insulation (VSI) in technical and economic terms and how VSI could be developed accordingly. Criteria were developed to assess these promising processes. It emerged from the assessment of several hundred processes with a significant temperature difference from the environment that over 50% were not suitable for use of VSI. The energy saving potential of those processes deemed to be relevant is of economic interest. Significant energy saving potential across Switzerland was demonstrated using a few examples. 4 geometrically defined groups were identified comprising a considerable number of systems for various processes. Very similar VSI structures would be possible in relation to this group. Examples of such VSI were presented.

# Projektziele

Die mit Unterstützung des BfE unter der Bezeichnung "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten" bisher von uns durchgeführten Arbeiten haben mittels Berechnungen und Messungen an Funktionsmustern gezeigt, dass mit der Anwendung von Vakuumpalt-Isolation (VSI) der Energietransport durch die Isolation um bis zu 80% gegenüber den heute besten Lösungen reduziert werden kann. Weiter konnte gezeigt werden, dass die durch Anwendung einer derartigen Isolation entstehenden Mehrkosten sich mit grösster Wahrscheinlichkeit im wirtschaftlich akzeptablen Rahmen bewegen.

Erste von uns durchgeführte Überlegungen und Berechnungen zur Anwendung von VSI für sehr viel grossvolumigere Anwendungen, wie beispielsweise saisonale Wärmespeicher, grosse Klima-Anlagen und industrielle Anlagen lassen begründet vermuten, dass ähnlich grosse Einsparungsprozente auf wirtschaftliche Weise nicht nur im Bereich Haushaltsgeräte sondern auch in Bereichen wie kommerziell genutzte Geräte, Bau von Wohn- oder Bürohäusern bzw. industrieller Gebäude, Transport von Waren, industrielle Maschinen sowie industrielle energieintensive Prozesse realisiert werden können. Und dies nicht nur für Räume oder Medien mit relativ kleinem Temperaturunterschied von beispielsweise bis 100°C zur Umgebung hin, sondern durchaus auch bei Anwendung bei welchen Temperaturunterschiede von einigen 100°C zur Umgebung hin isoliert werden müssen. Gleichgültig ob die Temperatur der zu isolierenden Medien oberhalb oder unterhalb der Umgebungstemperatur liegt.

Seit langem bekannt ist Vakuumpalt-Isolation (VSI) bei Anwendungen wie Thermosflaschen und Dewars für kryogene Prozesse. Seit einigen Jahren wird VSI auch für Vakuum-Röhrenkollektoren verwendet. Anwendungen wie Vakuum-Flachkollektoren oder Vakuum-Verglasungen sind Nischenprodukte am Markt.

Dass sich dem seit sehr langer Zeit bekannten VSI-Prinzip bisher kein breites Anwendungsfeld eröffnet hat, liegt unseres Erachtens an folgenden beiden, oftmals die thermische Wirksamkeit des Vakuums stark einschränkenden, Tatsachen:

- Üblicherweise müssen Distanzhalter zwischen die das Vakuum begrenzenden Flächen eingebracht werden, über welche hohe Mengen an Energie fließen können.
- Zusätzlich kann der Energiefluss durch Wärmestrahlung ohne Ergreifen entsprechender Massnahmen sehr gross sein.

In den von uns durchgeführten vorgängigen Arbeiten, konnten kostengünstige und thermisch wirksame Lösungen für diese beiden Probleme erarbeitet werden.

In dieser, im November 2012 begonnen Studie, soll deshalb das in den vorgängigen Projekten untersuchte Feld erweitert und versucht werden, zu folgenden Fragen Ansätze von Antworten zu finden:

- Bis zu welchen Anwendungstemperaturen können VSI zum Einsatz kommen und welche zusätzlichen Randbedingungen müssen bei welcher Temperatur erfüllt werden.
- Wo überall kommen in unserem technisierten Umfeld Geräte, Maschinen und Prozesse zum Einsatz, bei denen aus funktionellen Gründen nennenswerte Temperaturunterschiede zur Umgebung hin erzeugt und über einige Zeit aufrecht erhalten werden müssen.
- Wie hoch sind diese Temperaturunterschiede, wie sehen die heute zum Einsatz kommenden thermischen Isolationen aus, wie gross sind die von der Isolation beanspruchten Volumen, welche Wärmedurchgangskoeffizienten ( U-Wert,  $[W/m^2K]$ ) werden auf diese Weise realisiert und welche thermischen Verluste resultieren heute daraus.
- Wie gross ist das mögliche Marktvolumen bzw. die mögliche Anwendungsmenge und welche absolute Einsparung an Energie kann beispielsweise bei einer Halbierung der thermischen Verluste resultieren.

- Wie könnte eine Vakuumpalt-Isolation aufgebaut sein um diese thermischen Verluste beispielsweise auf die Hälfte zu senken und lassen sich damit - zum zusätzlichen Nutzen - Volumengewinne realisieren.
- Mit welchen Kosten zur Realisierung der VSI müsste jeweils voraussichtlich gerechnet werden.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Es wurden folgende Aufgabenstellungen bearbeitet:

1. Überlegungen zur vorläufigen Bestimmung von maximalen Anwendungstemperaturen von Vakuumpalt-Isolation (VSI) unter allfälliger Einhaltung zusätzlicher konstruktiver Randbedingungen.
2. Überlegungen zur Bestimmung von Kriterien, nach welchen der Einsatz von VSI für bestimmte industrielle Prozesse oder Geräte als allenfalls sinnvoll bezeichnet werden kann.
3. Identifizierung einer möglichst grossen Anzahl entsprechender Geräte, Maschinen und Prozesse unter Verwendung der eigenen Wissensbasis und der entsprechenden Datenbanken offizieller Institutionen wie BfE, der EU, des U.S. Departments of Energy, den Patentdatenbanken und anderer (über das Internet) zugänglicher Datenquellen.
4. Erweiterung und Spezifizierung der daraus resultierenden allfälligen Anwendungsfälle mittels Gesprächen mit Experten (d.h. mit in Technik und Vertrieb massgeblichen Personen) aus Anwendungsgebieten wie Haushaltsgeräte, kommerziell genutzte Geräte, industrielle Maschinen (wie beispielsweise Spritzguss- oder Druckgussmaschinen) und industrielle energieintensive Prozesse (wie beispielsweise der Herstellung von Glasprodukten, Mineralwolle, gewisser chemischer Produkte, usw.). Zusätzlich wurden (wenige) entsprechende Gespräche mit Vertretern aus Lehre, Wissenschaft und Forschung durchgeführt.
5. Aufgrund dieser Recherchen und Gespräche, wurde eine Zusammenfassung einer Auswahl von Anwendungen in einer matrixartigen Darstellung und Ordnung derselben nach den Kriterien "VSI denkbar" und "Temperatur" erstellt.
6. Rechnerische Abschätzung des Potenzials von VSI für die denkbaren dieser Anwendungen und Vergleich mit entsprechender konventioneller Isolation. Matrixartige Darstellung der Resultate geordnet nach dem Kriterium "VSI sinnvoll" und Diskussion der Resultate.
7. Identifizierung einiger weniger Gruppen in welchen bestimmte dieser Anwendungen in konstruktiver Hinsicht zusammengefasst werden können.
8. Erarbeitung von möglichen Aufbauten der VSI für diese Gruppen.
9. Abschätzung der potenziellen Gesamtenergie-Einsparung für einige Fälle.

# 1. Überlegungen zu den maximal möglichen Anwendungstemperaturen von VSI

Figur 1 zeigt ein Logikdiagramm der Punkte, welche die zulässige Einsatztemperatur einer Vakuumpalt-Isolation (VSI) bestimmen.

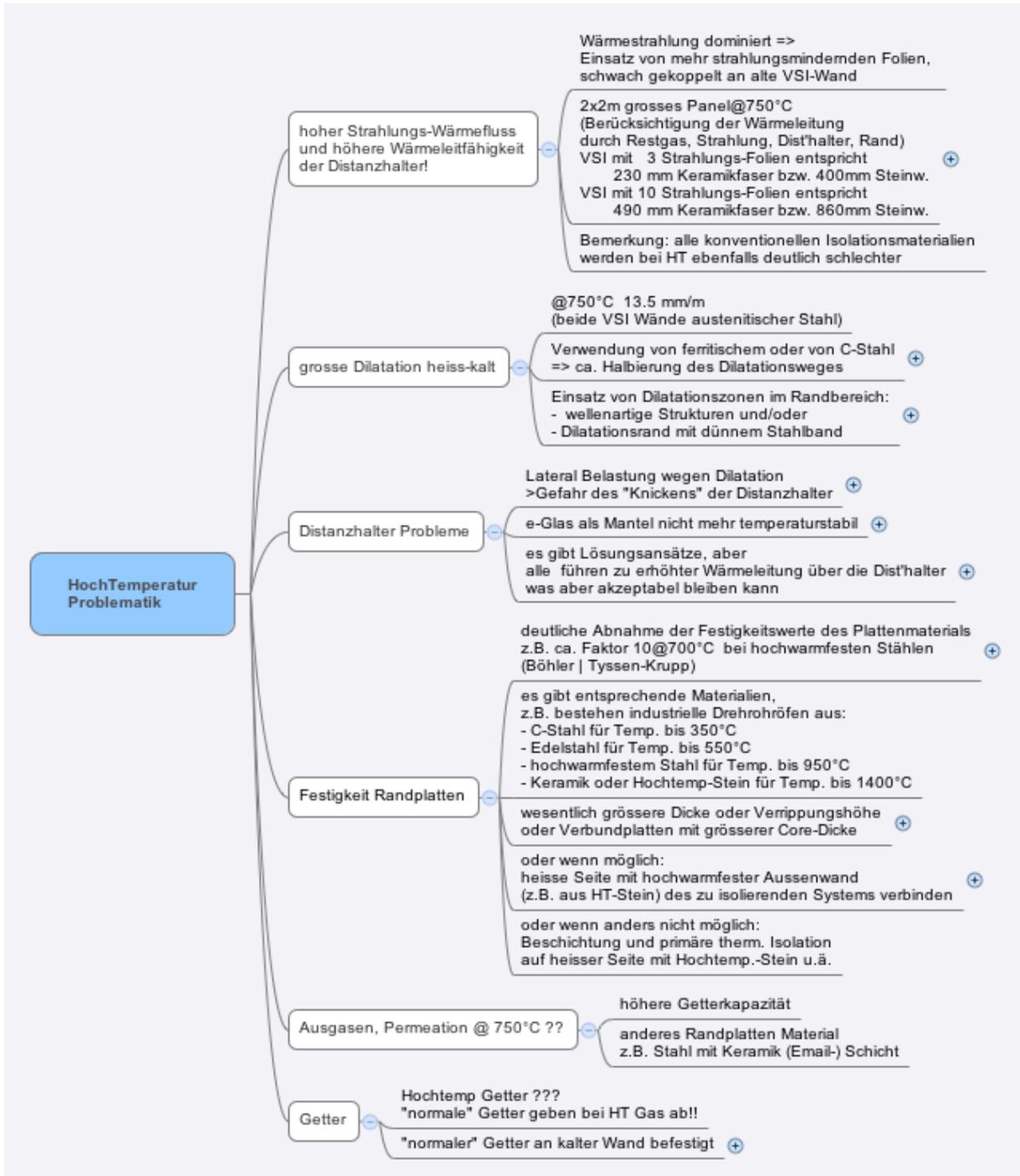


Fig. 1 Logikdiagramm der Punkte, welche die zulässige Einsatztemperatur einer VSI bestimmen

Ein erster Punkt ist die Tatsache, dass die Wärmestrahlung zwischen zwei den Vakuumpalt begrenzenden Wänden mit steigender Temperatur der heissen Wand - und nahezu konstant niedriger Temperatur der kalten Wand - näherungsweise in vierter Potenz dieser Temperatur grösser wird. Aufgrund dieser Tatsache dominiert die Wärmestrahlung bei höheren Einsatztemperaturen die anderen zur gesamten Wärmeübertragung beisteuernden Übertragungsprozesse durch das Restgas im Vakuum, durch die Distanzhalter und über den Randverbund.

Die einzige Möglichkeit dem entgegen zu wirken, ist eine vermehrte Investition in strahlungsmindernde Massnahmen, wie beispielsweise das Einbringen von thermisch schwach gekoppelten Aluminiumfolien in den Vakuumpalt. Da es wenig sinnvoll ist, beispielsweise mehr als 10 derartige Folien zur Strahlungsminderung in den Vakuumpalt einzubringen, leitet sich daraus eine Begrenzung der maximal sinnvollen Einsatztemperatur einer VSI ab. Diese liegt spätestens dort, wo der Wärmefluss durch eine vernünftig dicke Schicht eines konventionellen Isolationsmaterials gleich gross oder kleiner wird als der sehr stark durch Wärmestrahlung beeinflusste totale Wärmedurchgangskoeffizient der VSI.

Unsere rechnerischen Abschätzungen ergeben beispielsweise, dass der totale Wärmeübergangskoeffizient einer 20 mm dicken VSI mit 10 Strahlungsfolien bei einer Temperatur der heissen Seite von 750°C ungefähr halb so gross ist wie derjenige einer 250 mm dicken Schicht aus Keramikwolle. Mit 3 Strahlungsfolien hingegen, ist die VSI nur noch ungefähr gleich gut wie die 250 mm dicke Schicht aus Keramikwolle. Aufgrund dieser Überlegungen setzen wir (willkürlich) eine erste obere Grenze des sinnvollen Einsatzes einer VSI bei ca. 750°C.

Diese oberste Temperaturgrenze wird bestätigt, durch die sehr grosse Dilatation, welche bei hohem Temperaturunterschied zwischen heisser und kalter Wand auftritt. Geht man von austenitischem Stahl als Wandmaterial aus, beträgt die Dilation zwischen den beiden Wänden an jedem Rand eines ebenen Panels bei  $\Delta T=750^\circ\text{C}$  ca. 7 mm/m. Zur Beherrschung einer derartigen Dilatation müssen am Panel Dilatationsränder ausgebildet werden, was beispielsweise mit wellenartigen Strukturen geschehen kann. Eine andere Möglichkeit ist der Aufbau eines Randverbunds unter Verwendung von dünnen Stahlbändern, die so mit den beiden Grenzplatten des VSI verbunden sind, dass sie die Dilatation ausgleichen können.

Da derartig grosse Dilatationen bei grossen Panels offensichtlich nur noch mit erheblichem Aufwand beherrschbar sind, scheint es sinnlos den Einsatz von VSI bei noch höheren Temperaturen als ca. 750°C auf der heissen Seite anzustreben.

Ein nächster die Einsatztemperatur von VSI stark begrenzender Punkt ist die Stabilität der Distanzhalter, die - im Gegensatz zu stark gekrümmten VSI - bei quasi ebenen VSI unbedingt eingesetzt werden müssen, damit unter Luftdruck der Abstand zwischen den beiden Grenzplatten erhalten bleibt.

Da diese, mit hohem Druck belasteten Distanzhalter in der Gegend des Randes einer VSI die diagonale Summe der Dilation "mitgehen" müssen, werden sie bei hohen Temperaturen sehr hohen Scherkräften ausgesetzt. Da zusätzlich die Strukturfestigkeit der Distanzhalter-Materialien bei hohen Temperaturen drastisch sinkt, würden die von uns in früheren Arbeiten (BFE Projekt Nr. SI/500552) (1) besprochenen, für den Einsatz in Haushaltsgeräten vorgesehenen Distanzhalter bei einer Temperatur der heissen Seite über 400°C mit sehr grosser Wahrscheinlichkeit zerstört. Wir setzen also - zumindest vorerst - eine zweite, wesentlich niedrige Grenze des sinnvollen Einsatzes einer VSI bei ca. 400°C.

Diese Grenze gilt solange, bis es gelingt, den bestehenden Distanzhalteraufbau in Richtung höherer Temperatur- und Strukturfestigkeit zu verbessern bzw. zu erweitern. Ansätze hierfür sind in Diskussion und wir gehen davon aus, dass sich entsprechende Lösungen ergeben, sobald wir mit einem konkreten Anwendungsfall konfrontiert sind, der eine Temperatur der heissen Seite der VSI von 750°C verlangt.

Die in Figur 1 angedeuteten Lösungsansätze zeigen, dass auch die drei anderen, die Einsatztemperatur begrenzenden Punkte "strukturelle Festigkeit der Randplatten", "Ausgasen der bzw. Permeation durch die Randplatten" und "Gettern dieser Gase" bis zu einer Temperatur der heissen VSI-Seite von mindestens 750°C beherrschbar sind. Aufgrund der obigen Überlegungen setzen wir die beiden Temperaturgrenzen für die heisse Seite einer VSI bei:

- 400°C für den Einsatz von bekannten Bauelementen für VSI
- 750°C für den Einsatz von VSI nach zusätzlichem grösserem Entwicklungsaufwand

Dieser zusätzliche Entwicklungsaufwand steigt zwischen 400°C und 750°C quasi kontinuierlich an.

## 2. Kriterien zur Identifikation sinnvoller VSI-Anwendungen

Die im vorigen Abschnitt begründeten Grenzen der Temperatur der heißen Seite für den sinnvollen Einsatz einer Vakuumpalt-Isolation (VSI) von 400°C resp. 750°C, bilden einen ersten Grund, warum der Einsatz einer VSI nicht sinnvoll für einen bestimmten Anwendungsfall sein kann.

Ein zweiter Grund warum eine VSI für eine bestimmte Anwendung überhaupt nicht denkbar sein kann, ist eine zu komplizierte Prozesswand d.h. die materielle Abgrenzung einer, einen entsprechenden Prozess durchführenden, Anlage zur Umgebung bzw. zur heute existierenden thermischen Isolation hin. Wenn die Prozesswand eine zu komplizierte Geometrie und/oder sehr viele Durchdringungen oder dergleichen aufweist, steht von vorneherein fest, das eine VSI für diesen Prozess nicht wirtschaftlich aufgebaut werden kann.

Ein dritter solcher Grund ist die Sichtbarkeit anderer, heute nicht ausgeschöpfter Möglichkeiten, die wesentlich höhere Energie-Einsparungen ergeben als der Einsatz einer verbesserten thermischen Isolation.

Ein vierter, offensichtlicher Grund liegt vor, wenn das Einspar-Potenzial durch den Einsatz einer VSI so gering ist, dass sich deren Einsatz, unter Berücksichtigung einer vernünftig langen Amortisationszeitspanne, wirtschaftlich nicht lohnt.

Ein fünfter solcher Grund liegt vor, wenn durch den Einsatz einer bekannten, konventionellen thermischen Isolation vernünftiger Dicke ähnlich niedrige Wärmedurchgangskoeffizienten erzielt werden können, wie mittels einer VSI. Wir nennen eine konventionelle Isolation die ähnlich niedrige Wärmedurchgangskoeffizienten aufweist wie eine VSI im Folgenden "äquivalente konventionelle Isolation".

Natürlich ist hier der Begriff "vernünftige Dicke" entscheidend. Aus unserer heutigen Sicht liegt eine solche dann vor, wenn:

- eine deutlich dünnere VSI-Schicht keine wesentlichen zusätzlichen Gewinne bringt, wie beispielsweise entscheidende Gewinne an Nutzvolumen.
- genügend kostengünstiger Platz für eine dickere äquivalente konventionelle Isolation vorhanden ist
- die Dicke der äquivalenten konventionellen Isolation nicht völlig unproportional zu den Abmessungen des isolierten Aufbaus ist, also beispielsweise einen Rohrdurchmesser oder die Länge einer Wand nicht mehr als verdoppelt bis verdreifacht
- die äquivalente konventionelle Isolation zusammen mit einem allfällig notwendigen Schutzmantel nicht kostenaufwändiger ist als eine VSI.

## 3. Identifizierung von Anwendungsbereichen, Prozessen und Anlagen mit hohem $\Delta T$

Für die Bereiche Haushaltsgeräte war, durch die unter der Bezeichnung "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten" bisher von uns durchgeführten Arbeiten, im Wesentlichen klar, wo welche Temperaturunterschiede auftreten und wie entsprechende Vakuumpalt-Isolationen aufgebaut werden könnten. Die entsprechenden Erkenntnisse haben wir in den Tabellen 1 - 3 durch die Beispiele "Wärmespeicher solar saisonal", "Warmwasserspeicher (Boiler)" und "Kühlschrank" berücksichtigt.

Auf die Berücksichtigung allfälliger VSI Anwendungen für Gebäude haben wir im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Dies nicht, weil wir prinzipiell meinen, dass VSI für Gebäude - und insbesondere für Gebäude(-teile) in Elementbauweise - uninteressant wären, sondern weil es im Rahmen dieser kurzen Arbeit unmöglich war, fundierte Aussagen zu diesem Bereich zu erarbeiten.

Zu Beginn dieses Projektes haben wir uns darauf konzentriert, einen Überblick über Industriesektoren sowie industrielle Prozesse und Anlagen zu erarbeiten, bei welchen hohe Temperaturunterschiede zur Umgebung hin erforderlich sind.

Tabelle 1 zeigt einen Auszug aus dem vom Bundesamt für Energie veröffentlichten Bericht "Energieverbrauch in der Industrie und im Dienstleistungssektor, Resultate 2011", wobei wir uns auf die ersten 14, für die vorliegende Arbeit allenfalls relevanten Branchengruppen beschränkt haben.

Branchengruppe		Energieverbrauch [TJ]						Gesamt
Nr.	Bezeichnung	Anz. Betriebe	Elektrizität	Heizöl e.l.	Erdgas	Industrie-abfall	Anderere	
4	Chemie/Pharma	826	11'396	1'430	10'788	3'757	2'047	29'418
13	Handel	79'886	14'735	7'814	3'580			26'129
1	Nahrungsmittel	2'434	6'970	2'475	8'477			17'922
3	Papier/Druck	3'623	6'864	427	5'670	1'109	1'495	15'565
9	Metall Geräte	10'562	9'923	2'389	3'126			15'438
14	Gastgewerbe	25'704	7'892	4'733	2'109			14'734
5	Zement/Beton	41	1'840	190	1'166	5'760	5'443	14'399
11	Anderere Industrien	12'440	8'170	2'034	1'757			11'961
7	Metall/Eisen	207	4'762	209	3'381		437	8'789
10	Maschinen	3'565	3'256	1'366	922			5'544
6	Anderere NE-Metalle	1'243	1'727	861	1'307		722	4'617
12	Bau	37'881	1'671	2'031	631			4'333
8	NE-Metalle	73	1'053	58	1'143			2'254
2	Textil/Leder	1'506	838	450	595			1'883

Tab. 1 Energieverbrauch relevanter Branchengruppen (Auszug aus BfE-Bericht "Energieverbrauch in der Industrie und im Dienstleistungssektor, Resultate 2011".)

Die Tabelle zeigt sehr deutlich in welchen Branchen viel Energie verbraucht wird. Die ursprüngliche Idee, wir könnten aufgrund dieser Zusammenstellung Schwerpunkte für unsere Untersuchung setzen, hat sich aber als nicht durchführbar erwiesen. Dies, weil die in diesen Branchengruppen zusammengefassten Industrien so uneinheitlich sind, dass keine für eine allfällige Anwendbarkeit von Vakuumspalt-Isolation (VSI) relevanten Aussagen abgeleitet werden können.

Unter Verwendung des Internets und einschlägiger Literatur sowie mittels internen Gesprächen haben wir mit viel Zeitaufwand eine "freie" Suche nach Industrien, Produkten, Prozessen und Anlagen durchgeführt, bei welchen höhere Temperaturunterschiede zur Umgebung hin auftreten.

Figur 2-0 zeigt eine grobe Übersicht über die als relevant identifizierten und abgesuchten Gebiete in Form eines Logik-Diagrammes, welches, in den nicht dargestellten Verästelungen versteckt, mehrere 100 Prozesse beinhaltet, bei welchen höhere Temperaturunterschiede zur Umgebung hin auftreten und die deshalb allenfalls für VSI interessant sein könnten.

Bei den meisten in die Darstellung aufgenommenen Bereichen beträgt der erforderliche Temperaturunterschied zur Umgebung hin 50°C, in vielen Fällen einige 100°C und oft auch 1000°C und mehr.

Jeder der Knoten in Figur 2-0 führt zu - teilweise sehr zahlreichen - Unterpunkten mit detailliert hinterlegten Daten und Internet-Links. Zur Verdeutlichung der grossen Vielfältigkeit und dem Detaillierungsgrad der von uns gesichteten Daten zeigen die Figuren 2-1 bis 2-4 beispielhaft einige dieser, sich wiederum weiter verästelnden Unterbereiche bzw. -punkte. Sowohl der Unterbereich "Chemie" (Fig. 2-1) als auch "Metall" (Fig. 2-2) führen unter anderem zum weiteren Unterbereich "thermische Durchlaufprozesse" (Fig. 2-3), welcher unter anderem zu dem in Fig. 2-4 detailliert gezeigten Unterpunkt "Drehrohröfen" führt.

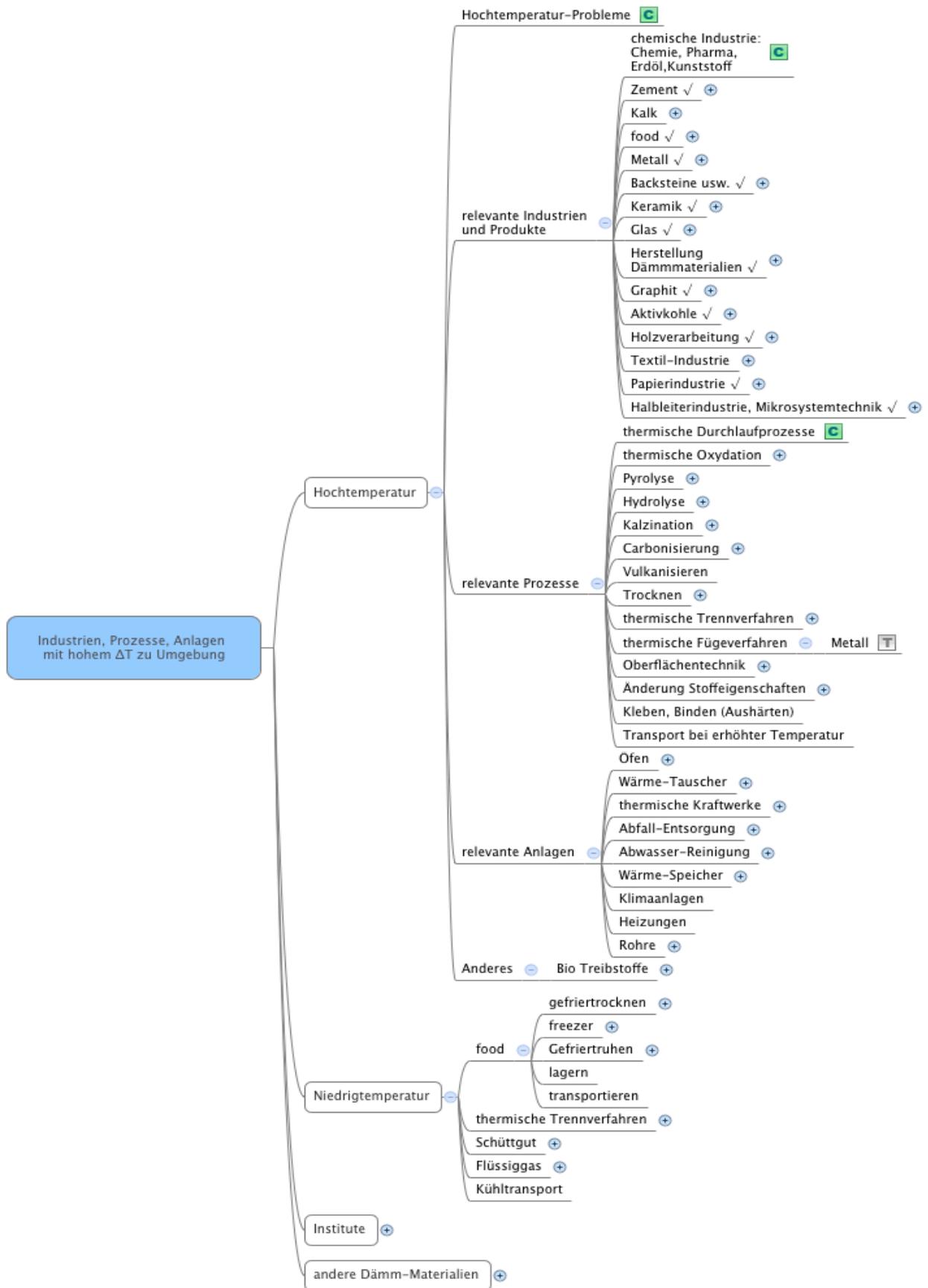


Fig. 2-0 Einige Industriesektoren, Prozesse und Anlagen bei welchen interessante Temperaturunterschiede zur Umgebung hin erforderlich sind

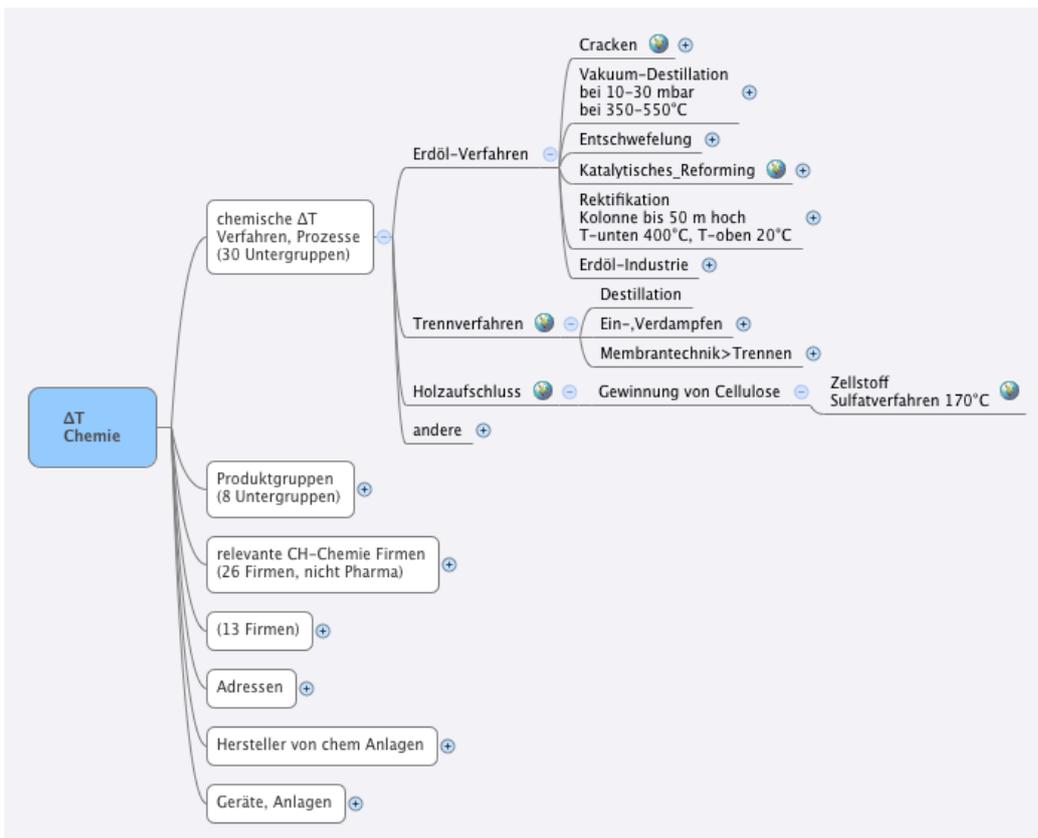


Fig. 2-1 Einige Unterpunkte und Verästelungen der betrachteten Punkte im Bereich Chemie

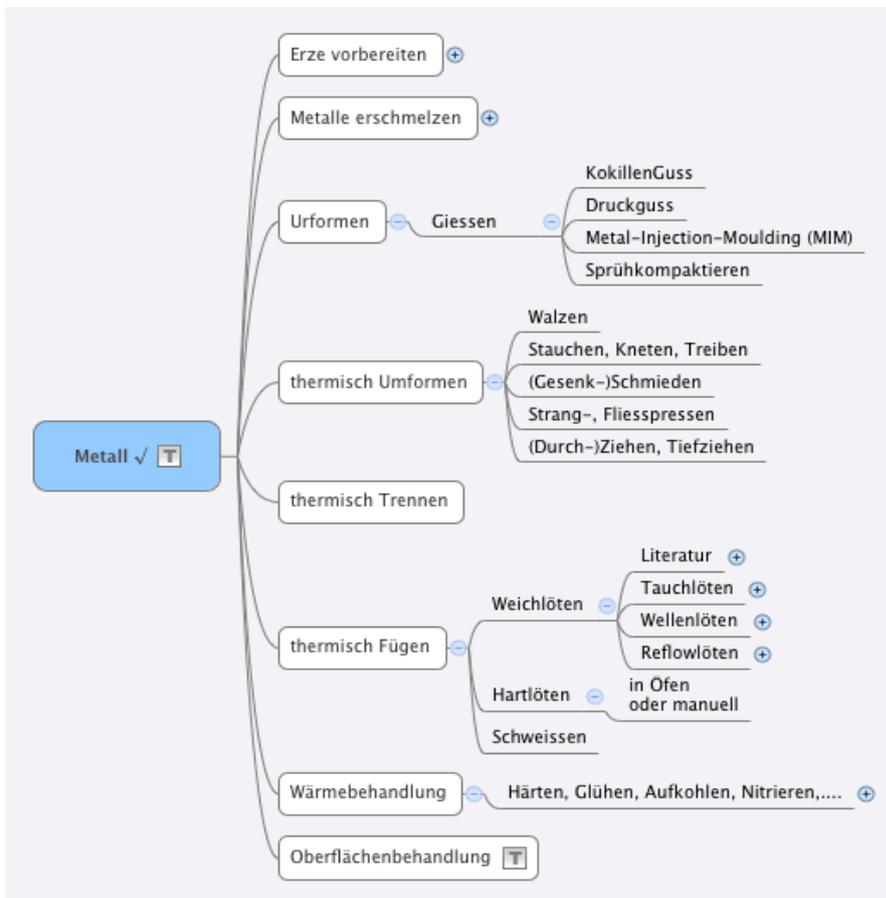


Fig. 2-2 Einige Unterpunkte und Verästelungen der betrachteten Punkte im Bereich Metall

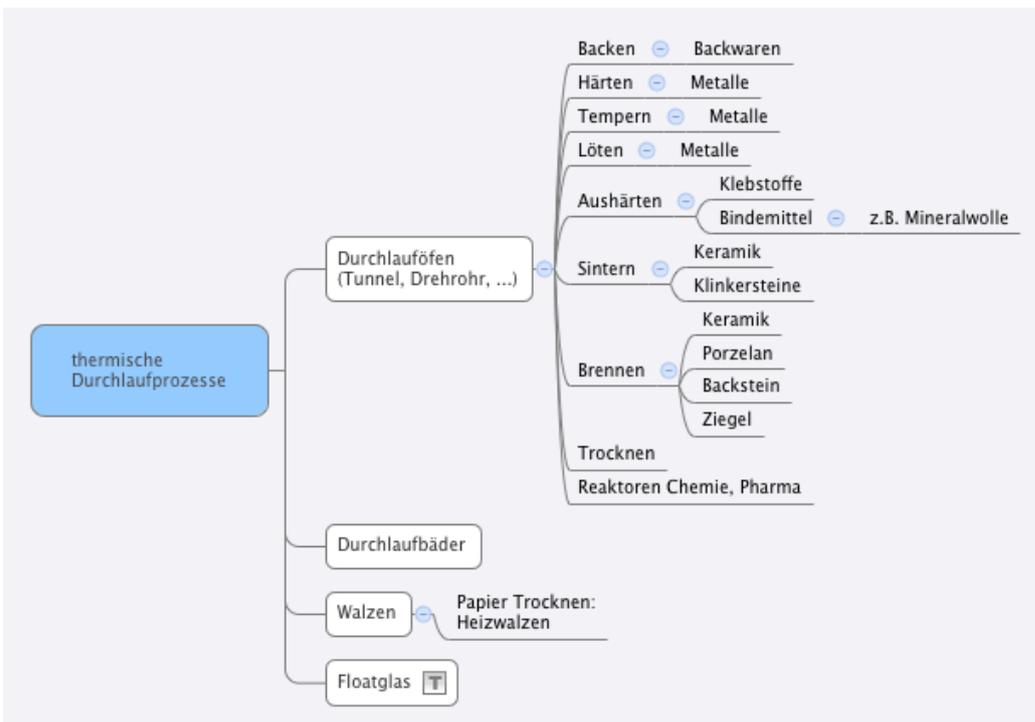


Fig. 2-3 Verästelungen des betrachteten Unterbereichs "thermische Durchlaufprozesse"

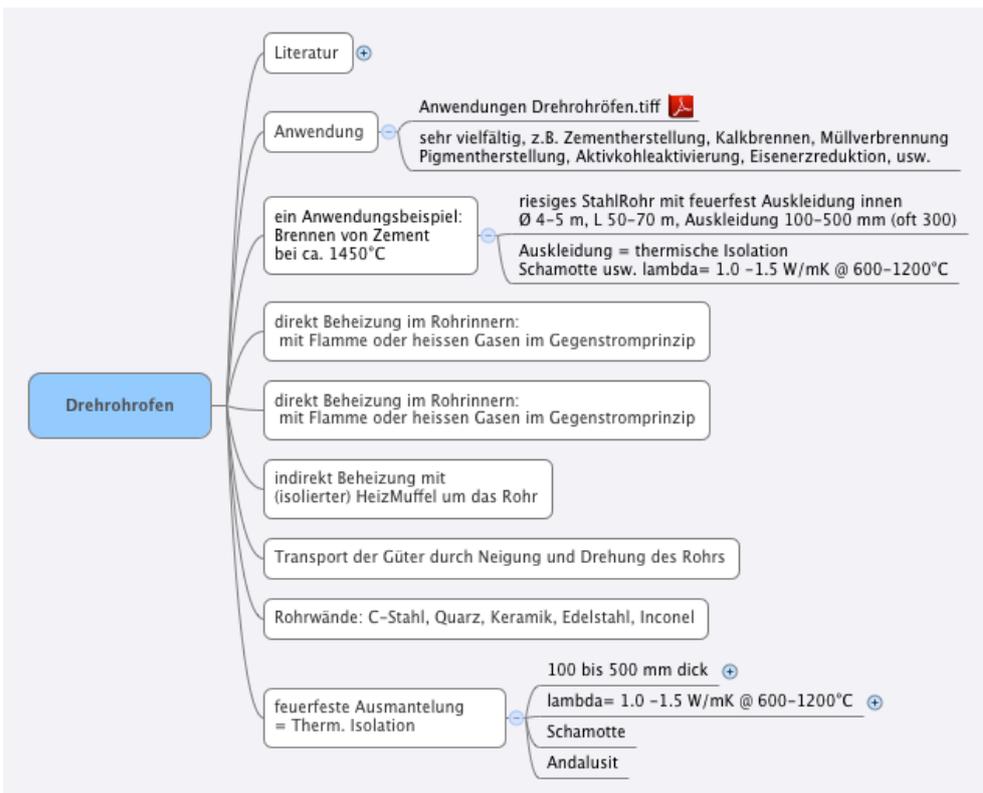


Fig. 2-4 Detailierung des Unterpunktes "Drehrohrofen"

Es ist uns im Rahmen dieses Berichtes nicht möglich alle gesichteten Daten detailliert zu diskutieren. Ebenso wenig möglich war es uns, die fast überwältigende Vielfalt der einzelnen Prozesse, Geräte und Anlagen in eine aussagekräftige Systematik zu überführen.

Wir haben uns deshalb in Abschnitt 5 darauf "beschränkt" eine - wie wir glauben - repräsentative Auswahl einiger der betrachteten Prozesse und Anlagen in einer matrixartigen Darstellung zusammen zu fassen.

#### 4. Erweiterung und Spezifizierung der Anwendungsfälle durch Expertengespräche

Vor der Auswahl von repräsentativen Prozessen, Geräten und Anlagen haben wir eine Reihe von ausführlichen Gesprächen mit Experten geführt und auch einige entsprechende Betriebe besichtigen können.

Weil Tabelle 1 zeigt, dass dieser Bereich ein Energie-Grossverbraucher ist, lag dabei ein Schwerpunkt bei "Chemie, Pharma", wo sich 2 Professoren und 3 unter anderem im Bereich "Energieverbrauch" erfahrene Industrie-Mitarbeiter viel Zeit für unser Anliegen genommen haben.

Hierbei ist unter anderem klar geworden, dass beispielsweise bei der Isolation von Prozessenergie zuführenden Rohren ein grosses Einsparpotential vorhanden sein könnte. Beispielsweise beträgt die totale Länge dieser, Wasserdampf bei Temperaturen zwischen 150°C und 220°C führenden Rohre in einem einzigen der besuchten schweizerischen Chemiewerke ca. 200 km. Unsere rechnerische Abschätzung zeigt, dass dies bei Ersatz der heutigen Rohrisolation durch VSI zu einer Einsparung von ca. 100 GWh/a bzw. ca. CHF 6 Mio/a in diesem Werk führen könnte.

Es ist aber auch klar geworden, dass nur eine beschränkte Auswahl der in den Werken eingesetzten Reaktoren, Kolonnen und anderen Anlagen für einen Einsatz von VSI geeignet sein könnte, und dass in jedem dieser Fälle eine detaillierte Untersuchung und Entwicklung der spezifischen VSI durchzuführen wäre. Einige wenige entsprechende chemische Anlagen sind in die Matrix von Abschnitt 5 übernommen worden.

Weitere Gespräche wurden mit Industrie-Experten für den Bau von thermischen Kraftwerken, Reaktoren zur Verkohlung von Abfällen sowie für die Herstellung von Stahl geführt.

Selbstverständlich wurde auch das Wissen interner Experten abgefragt, was beispielsweise zu detaillierten Daten in Bereichen wie "Herstellung von Mineralwolle", "SMD Löten in Durchlauföfen" und einigen weiteren führte.

#### 5. Denkbare VSI Anwendungsfälle

In Tabelle 2 sind 67 repräsentative Prozesse bzw. Anlagen zusammengefasst und nach der Prozesstemperatur geordnet, bei welchen uns eine Anwendung von Vakuumspalt-Isolation (VSI) vielversprechend erschien.

Diese Prozesse wurden einerseits nach der zu realisierenden Übergangstemperatur zu einer allfälligen VSI und andererseits nach der Eignung der Prozesswand<sup>(1)</sup> für die Aufbringung einer VSI einer ersten Bewertung unterzogen.

Das Resultat dieser Bewertung ist in der Spalte "VSI denkbar" in Form eines "ja" oder "nein" ablesbar.

Aufgrund dieser Bewertung verkleinert sich die Tabelle in den kommenden Abschnitten um 10 der von uns zunächst als vielversprechend eingestuften Prozesse.

Die restlichen Spalten in Tabelle 2 beinhalten beispielhafte Information über die heute übliche Prozesswand, die Dimensionen einer entsprechenden Anlage, die heute übliche thermische Isolation und die Übergangstemperaturen zu derselben, die im nächsten, in Abschnitt 6 besprochenen Schritt benötigt wurden.

(1) *Begriffserklärung: Wir verwenden den Begriff "Prozesswand" als Synonym für die materielle Abgrenzung einer, einen entsprechenden Prozess durchführenden, Anlage zur Umgebung bzw. zur heute existierenden thermischen Isolation hin.*

Übergangstemp. T-ü zu VSI [°C]	obere Prozesstemp. [°C]	Prozessart	Materialtragende Proz.-Wand	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	max. Übergangstemp zu Isola. heute [°C]	Proz.-Wand VSI tauglich? (Geom.)	VSI denkbar
750	2000	Brennen Sonderkeramiken (Durchlauf-ofen)	HT-Stein mögl.	1'000 x1'000 x5'000	(keine)	?	ja	ja
750	1500	Glas-, Mineral-Schmelzofen	Stein mögl.	Ø12'000 x3'000	(keine)	-	ja	ja
750	1500	Transport Flüssigstahl in "Pfanne"	Stahl		keine	-	ja	ja
400	1450	Brennen Zement (Dreh-rohrofen)	Stahl	Ø4500 x60'000	keine	150-250	ja	ja
750	1250	Glühen, Carbonisierung (Durchlauf-ofen)	HT-Stein mögl.	1'000 x3'000 x5'000	(keine)	-	ja	ja
300	1250	Kessel thermisch. Kraftwerk	Stahl	10'000 x10'000 x20'000	St'wo. 300 + 0.2 Alu	300	ja	ja
750	1200	Brennen von Keramik   Porzellan	HT-Stein mögl.	1'000 x1'000 x10'000		?	ja	ja
750	1200	Brennen von Klinker   Backstein	HT-Stein mögl.	2'500 x3'000 x40'000		?	ja	ja
750	1100	Diffusionsglühen Stahl	HT-Stein mögl.			?	ja	ja
750	1000	Hochtemperatur-Hartlöten	Stein   HT-Stahl		(St'wo. 100)	?	ja	ja
300	1000	Kessel Kehrricht-verbrennung	Stahl		St'wo. 300 + 0.2 Alu	300	ja	ja
700	1000	Pyrolyse (Pneu, Abfall, Biomasse)					ja	ja
750	1000	(Re-)Aktivierung Aktivkohle (Drehrohrofen)	HT-Stahl				ja	ja
750	900	Kalzinierung Titanoxyd (Drehrohrofen)	HT-Stahl		keine		ja	ja
600	900	Aufkohlen Stahl					ja	ja
750	800	Aufschäumung Schaumglas (Tunnel-ofen u.ä.)	Stein od. Stahl	1'000 x5'000 x10'000	(St'wo. 300 + 1.0Alu )		ja	ja
700	800	Hartlöten (Durchlauf-ofen)	HT-Stein	1'000 x1'000 x3'000	(St'wo. 300 + 1 Alu )	500	ja	ja

Tab.2, Blatt 1

Übergangs Temp. T-ü zu VSI [°C]	obere Prozess-temp. [°C]	Prozessart	Material tragende Proz.-Wand	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	max. Übergang-Temp zu Isola. heute [°C]	Proz.-Wand VSI tauglich? (Geom.)	VSI denkbar
500	750	Herstellung Ammoniak (kontinuierl. Prozess)	Stahl	Ø3000 x5'000	(St'wo. 100 + 0.2 Alu)	500	ja	ja
750	750	Härten   Vergüten   Glühen Stahl (Durchlaufofen u.ä.)	Stahl	1'000 x3'000 x5'000	(St'wo. 350 + 1 Alu)	500	ja	ja
600	600	spannungsarm   Rekristall. Glühen Stahl (Durchlaufofen u.ä.)	Stahl	1'000 x3'000 x5'000	(St'wo. 300 + 1 Alu )	600	ja	ja
600	600	Glas härten (Einscheiben Sicherheitsglas) (Durchlaufofen)	Stahl	1'000 x3'000 x10'000	Keram'-wol.50 St'wo. 300	600	ja	ja
500	500	Wärmespeicher solartherm.Kraftwerk	Stahl	50m3 Ø4x4m	(St'wo. 300 + 0.2 Alu)	500	ja	ja
400	400	Erdöl Rektifikation (Kolonnen)	Stahl	Ø3000 x20'000	St'wo. 100? + 0.2 Alu	400	ja	ja
350	350	Backen (food) (Durchlaufofen u.ä.)	Stahl	1'000 x3'000 x27'000	St'wo. 200 + Stahlabdeck.	350	ja	ja
300	300	Aushärten Binder Mineralwolle (Durchlaufofen)	Stahl	2'000 x2'000 x30'000	St'wo. 300 + 0.2 Alu	300	ja	ja
300	300	Weichlöten (Tunnelofen)	Stahl	1'000 x1'000 x5'000	St'wo. 50 + 1 Alu	300	ja	ja
250	250	Floatbad Floatglasherstellung	Stahl	5'500 x60'000 x 14	(St'wo. 300 + 1 Alu )	250	ja	ja
250	250	Rösten (food) (Durchlaufofen u.ä.)	Stahl	1'000 x1'000 x5'000	?	250	ja	ja
250	250	Papierherstellung: Dampf-Leitungen für Trocken-zylinder	Stahl	Ø100	(St'wo. 100 + 0.2 Alu)	250	ja	ja
250	250	Prozesswärme Solar-kollektoranlagen Leitungen	Stahl	Ø30	(St'wo. 50 + 0.2 Alu)	250	ja	ja

Übergangstemp. T-ü zu VSI [°C]	obere Prozesstemp. [°C]	Prozessart	Material tragende Proz.-Wand	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	max. Übergangstemp zu Isola. heute [°C]	Proz.-Wand VSI tauglich? (Geom.)	VSI denkbar
400	250	Prozesswärme Solar-kollektoranlagen: Vakuum-Flachkollektor	Glas	2'000 x1'200 x250			ja	ja

Tab.2, Blatt 2

220	220	Lösungsmittel Kolonne	Stahl	Ø600 x12'000	St'wo. 80 + 0.2 Alu	220	ja	ja
200	200	Sprüh-Trocknen (Lebensmittel, Keramik, Chemie, Pharma,...)	Stahl			200	ja	ja
180	180	Fernwärmeleitungen Chemie Prozesswärme	Stahl	Ø100	St'wo. 50 + 0.2 Alu	180	ja	ja
180	180	Vulkanisationskessel Schläuche	Stahl	Ø2000 x25000	(St'wo. 300 + 1.0Alu )	180	ja?	ja
175	175	Frittieren und Siedbacken	Stahl	1'000 x5'000 x500	(St'wo. 100 + Stahl-abdeck.	175	ja	ja
175	175	Gewinnung von Zellulose (Zellstoff-kocher)	Stahl	Ø6000 x35'000	(St'wo. 300+ 1.0Alu)	150	ja (teilweise)	ja
150	150	Fernwärmeleitungen Pharma	Stahl	Ø100	St'wo. 50 + 0.2Alu	150	ja	ja
125	125	Pasteurisieren (Wärmetauscher)	Stahl	Ø500 x1'100	St'wo. 50 + 0.2 Alu	125	ja?	ja
200	125	Fernwärmeleitungen Heizen	Stahl	Ø150	St'wo.1 50 + 0.2Alu	200	ja	ja
125	125	(Vakuum-) Walzen-Trocknen	nicht da   Stahl		-	125	nein   ja	ja
120	120	Beispiel Pharma Rohr-Reaktor	Stahl	Ø1500 x4'000	St'wo. 670 + 0.2 Alu	120	ja?	ja
105	105	Pharma Kolonne	Stahl	Ø1000 x5'000	St'wo. 80 + 0.2 Alu	105	ja	ja
100	100	Zuckergewinnung, Extraktionsturm	Stahl	Ø10'000 x30'000	(St'wo. 300 + 1.0 Alu)	100	ja	ja

Übergangs Temp. T-ü zu VSI [°C]	obere Prozess-temp. [°C]	Prozessart	Material tragende Proz.-Wand	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	max. Übergang-Temp zu Isola. heute [°C]	Proz.-Wand VSI tauglich? (Geom.)	VSI denkbar
100	100	industriell Kochen	Stahl	1'000 x5'000 x500	(St'wo. 300 + Stahl-abdeck.	100	ja	ja

Tab.2, Blatt 3

90	90	Wärmespeicher solar saisonal	Stahl	$\Sigma =$ 20'000 x500 x12'000	-	-	ja	ja
75	75	(Vakuum-) Band-Trocknen (Dörren)	nicht da   Stahl		-	75	nein   ja	ja
65	65	Warmwasserleitungen	Kunststoff	Ø20	PU 50	65	ja	ja
65	65	Warmwasserspeicher (Boiler)	Stahl	Ø590 x750 80 Liter	PU 85	65	ja	ja
10	10	Lagerhäuser usw.		30'000 x100'000 x10'000	St'wolle 300	10	ja	ja
5	5	Kühlschrank	Kunststoff	560x560 x1'400 250Liter	PU 50 (A++)	5	ja	ja
-20	-20	Leitungen Pharma-Prozesskühlung	Stahl	Ø100	St'wo. 50 + 0.2 Alu	-175	ja	ja
-20	-20	Gewerbe-Gefriertruhe	Stahl	1'640 x770 x 850	PU 84	-20	ja	ja
-40	-40	Industrie "freezer"	Stahl	1'640 x770 x 851	PU 84	-40	ja	ja
-50	-50	Gefriertrocknung	Stahl				ja	ja
-175	-175	Leitungen Flüssiggas	Stahl	Ø200	St'wo. 200 + Stahl-mantel	-175	ja	ja
-175	-175	Luftzerlegungs Kolonne	Stahl	Ø3000 x20'000	St'wo. 80 + 0.2Alu	-175	ja	ja
>1000	3000	Graphitierung						nein
400	2000	Schmelzzone Hochofen	Stahl		keine	-	nein	nein
400	1250	Kohlungszone Hoch-	Stahl		keine	-	nein	nein

Übergangstemp. T-ü zu VSI [°C]	obere Prozesstemp. [°C]	Prozessart	Materialtragende Proz.-Wand	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	max. Übergangstemp zu Isola. heute [°C]	Proz.-Wand VSI tauglich? (Geom.)	VSI denkbar
		ofen						
400	800	Reduktionszone Hochofen					nein	nein

Tab.2, Blatt 4

500	500	Wasserdampf für Turbinen (Leitungsrohre)	Stahl			St'wo. 100 + 0.2 Alu	500	nein	nein
450	450	Herstellung Ammoniak (Haber-Bosch)						nein	nein
400	400	Vorwärmzone Hochofen						nein	nein
350	300	Backen (food) Einzelofen Etagenofen	Stahl	1'300 x900 x1'300		St'wo. 100 + Stahlabdeck.	350	nein	nein
180	180	Vulkanisation Pneufertigung	Stahl			?	180	nein	nein
175	175	Spritzguss Thermoplaste						nein	nein

Tab.2, Blatt 5

Tab. 2 Einige industrielle Prozesse bzw. Anlagen, geordnet nach denkbarer Tauglichkeit für VSI und Prozess-Temperatur

## 6. Sinnvolle VSI Anwendungsfälle

### 6.1 Bewertung der Prozesse

Im nächsten Schritt haben wir für alle 57 in Tabelle 2 als denkbar bezeichneten Prozesse die in Abschnitt 2 definierten Kriterien wann eine Anwendung von Vakuumspalt Isolation (VSI) nicht sinnvoll ist, angewendet.

Diese Kriterien sind in Kurzdarstellung:

1. Überschreiten der Temperaturgrenze von 400°C bzw. 750°C
2. Eignung der Prozesswand für VSI
3. Nicht ausgeschöpftes, wesentlich grösseres Energiespar-Potenzial vorhanden
4. Das Einspar-Potenzial durch VSI ist zu klein um VSI wirtschaftlich einzusetzen
5. Gleich gute Isolation mit konventionellen Mitteln erreichbar

Dazu haben wir - in angemessener Vertiefung - mit analytischen Methoden rechnerisch für die meisten dieser Prozesse folgende Werte abgeschätzt:

- wie hoch ist der Energieverlust durch die heute bestehende Isolation
- wie hoch ist das Energiespar-Potenzial durch Einsatz einer VSI

- welche Kosteneinsparung ergibt sich daraus (hierfür sind wir auf der Basis unserer Expertengespräche branchenabhängig von Energiekosten zwischen 0.05 - 0.1 CHF/kWh ausgegangen)
- wie hoch dürfen demnach die Mehrkosten für eine VSI maximal sein, damit sie in einer bestimmten Zeitspanne amortisiert werden kann
- wie dick müsste eine äquivalente Isolationsschicht (I-äq) aus konventionellem Material sein, damit sie gleich gut wie das VSI isoliert und ist diese Dicke "vernünftig".

Die Resultate dieser Abschätzungen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Übergang-Temp T-ü zu VSI [°C]	obere Prozess-temp [°C]	Prozessart	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	VSI sinnvoll? (siehe =>)	warum oder warum nicht VSI	Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [MWh/a&Ein h.]	min. Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [CHF/a&Ein h.]	Amortisationszeit [a]	max. zul. Mehrkosten für VSI bezügl. heute [CHF/m2]	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq: Mat. u. Dicke	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq: sinnvoll?
750	800	Aufschäumung Schaumglas (Tunnelofen)	1'000 x 5'000 x 10'000	(St'wo . 300 + 1.0 Alu)	ja	zus. CHF 575 O.K. für VSI, St'wo. >1000 nicht sinnvoll	175	870	5	575	St'wo. >1000	nein
700	800	Hartlöten (Durchlauf-ofen)	1'000 x 1'000 x 3'000	(St'wo . 300 + 1 Alu)	ja	zus. CHF 415 O.K. für VSI, St'wo. >1000 nicht sinnvoll	28	1400	3	415	St'wo. >1000	nein
500	750	Herstellung Ammoniak (kontinuierl. Prozess)	Ø3000 x 5'000	(St'wo . 100 + 0.2 Alu)	ja	zus. CHF 240 O.K. für VSI, St'wo. 750 nicht sinnvoll	150	2300	5	240	St'wo. 750	nein
750	750	Härten   Vergüten   Glühen Stahl (Durchlauf-ofen u.ä.)	1'000 x 3'000 x 5'000	(St'wo . 350 + 1 Alu)	ja	zus. CHF 155 O.K. für VSI, St'wo. 700 nicht sinnvoll	27	1300	3	155	St'wo. 700	nein
600	600	spannungs-arm Glühen Stahl (Durchlauf-ofen u.ä.)	1'000 x 3'000 x 5'000	(St'wo . 300 + 1 Alu)	ja	zus. CHF 155 O.K. für VSI, St'wo. 700 nicht sinnvoll	27	1300	3	155	St'wo. 700	nein
600	600	Glas härten (Einscheibe-Sicherheitsglas) (Durchlauf-ofen)	1'000 x 3'000 x 10'000	Keramik'w. 50 St'wo. 300	ja	Einsparung ev. knapp wirtschaftl.	23	1100	3	69	Keram'wo.50 St'wo. 600	nein
350	350	Backen (food) (Durchlauf-ofen u.ä.)	1'000 x 3'000 x 27'000	St'wo. 200 + Stahlabdeck.	ja	zus. CHF 78 O.K. für VSI, St'wo. 510 nicht sinnvoll	57	5700	3	78	St'wo. 510	nein

Übergang-Temp T-ü zu VSI [°C]	obere Prozesstemp [°C]	Prozessart	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	VSI sinnvoll? (siehe =>)	warum oder warum nicht VSI	Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [MWh/a&Ein h.]	min. Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [CHF/a&Ein h.]	Amortisationszeit [a]	max. zul. Mehrkosten für VSI bezügl. Isolat. heute [CHF /m2]	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; Mat. u. Dicke	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; sinnvoll?
300	300	<b>Weichlöten (Tunnelofen)</b>	1'000 x1'000 x5'000	St'wo. 50 + 1 Alu	ja	zus. CHF 690 O.K. für VSI, St'wo. 500 nicht sinnvoll	29	2900	3	690	St'wo. 500	nein

Tab.3, Blatt 1

250	250	<b>Floatbad Floatglasherstellung</b>	5'500 x 60'000 x 140	(St'wo. 300 + 1 Alu)	ja	zus. CHF 152 O.K. für VSI, St'wo. 700 nicht sinnvoll	211	10500	5	152	St'wo. 700	nein
250	250	Rösten (food) (Durchlauf-ofen u.ä.)	1'000 x1'000 x5'000	?	ja	zus. CHF 261 O.K. für VSI, St'wo. 500 nicht sinnvoll	11	1100	3	261	St'wo. 500	nein
250	250	Papierherstellung: Dampf-Leitungen für Trockenzylinder	Ø100	St'wo. 100 + 0.2 Alu	ja	zus. CHF 164/Lfm O.K. für VSI, PU, >1000 nicht sinnvoll	580 /km	33000 /km	5	164 /Lfm => 522 /m <sup>2</sup>	PU, >1000	nein
250	250	Prozesswärme Solar-kollektor-anlagen Leitungen	Ø30	St'wo. 50 + 0.2 Alu	ja	zus. CHF 132/Lfm O.K. für VSI, PU, >1000 nicht sinnvoll	470 /km	26000 /km	5	132 /Lfm => 1400 /m <sup>2</sup>	PU, >1000	nein
400	250	Prozesswärme Solar-kollektor-anlagen Erzeugung: Vakuum-Flachkollekt	2'000 x1'200 x250		ja	mittels VSI erst möglich						
220	220	Lösungsmittel Kolonne	Ø600 x 12'000	St'wo. 80 + 0.2 Alu	ja	zus. CHF 425 O.K. für VSI, St'wo. 800 nicht sinnvoll	20	1600	5	425	St'wo. 800	nein

Übergang-Temp T-ü zu VSI [°C]	obere Prozess-temp [°C]	Prozessart	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	VSI sinnvoll? (siehe =>)	warum oder warum nicht VSI	Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [MWh/a&Ein h.]	min. Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [CHF/a&Ein h.]	Amortisationszeit [a]	max. zul. Mehrkosten für VSI bezügl. Isolat. heute [CHF/m <sup>2</sup> ]	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; Mat. u. Dicke	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; sinnvoll?
180	180	<b>Leitungen Chemie-Prozesswärme</b>	Ø100	St'wo. 50 + 0.2 Alu	ja	zus. CHF 155 O.K., PU, >1000 nicht sinnvoll	550 /km	31000 /km	5	118 /Lfm => 376 /m <sup>2</sup>	PU, >1000	nein
175	175	Frittieren und Siedbacken	1'000 x5'000 x500	(St'wo 100 + Stahlabde.)	ja	zus. CHF 240 O.K., PU, >800 nicht sinnvoll	16	820	3	240	PU, >800	nein

Tab.3, Blatt 2

150	150	Fernwärmeleitungen Pharma	Ø100	St'wo. 50 + 0.2Alu	ja	zus. CHF 143/Lfm O.K., PU, >1000 nicht sinnvoll	420 /km	24000 /km	5	118 /Lfm => 376 /m <sup>2</sup>	PU, >1000	nein
200	125	<b>Fernwärmeleitungen Heizen</b>	Ø150	St'wo. 150 + 0.2Al	ja	zus. CHF 79/m <sup>2</sup> O.K., PU, >1000 nicht sinnvoll	130 /km	7300 /km	5	37 /Lfm => 79/m <sup>2</sup>	PU, >1000	nein
105	105	Pharma Kolonne	Ø1000 x5'000	St'wo. 80 + 0.2 Alu	ja	Einspar/Kolo klein aber z.B. 1000 Kolon/Werk	7	1100	5	210	St'wo. 650	nein
90	90	Wärmespeicher solar saisonal	Σ= 20'000 x500 x12'000 0	-	ja	geringe Dicke (30mm) VSI macht Einbau in Hauswand möglich					PU, >700	nein
65	65	<b>Warmwasserleitungen</b>	Ø20	PU 50	ja	zus. CHF 52/Lfm O.K. PU, >1000 nicht sinnvoll	38/km	4300 /km	10	43 /Lfm	PU, >1000	nein
65	65	<b>Warmwasserspeicher (Boiler)</b>	Ø590 x750 = 80 Liter	PU 85	ja	Einspar-Potenzial in Summe der Boiler sehr gross	0.19	38	8	304 /Boiler => ca. 130 /m <sup>2</sup>	PU, >200	nein
5	5	<b>Kühlschrank</b>	560 x560 x1'400 = 250	PU 50 (A++)	ja	Einspar-Potenzial in Summe der Kühl-	0.054	11	8	88 /Kühlschra. =>	PU, 130	nein

Übergang-Temp T-ü zu VSI [°C]	obere Prozessstemperatur [°C]	Prozessart	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	VSI sinnvoll? (siehe =>)	warum oder warum nicht VSI	Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [MWh/a&Ein h.]	min. Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [CHF/a&Ein h.]	Amortisationszeit [a]	max. zul. Mehrkosten für VSI bezügl. Isol. heute [CHF /m2]	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; Mat. u. Dicke	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; sinnvoll?
			Liter			schränke sehr gross				ca. 22/m <sup>2</sup>		
-20	-20	<b>Gewerbe-Gefriertruhe</b>	1'640 x770 x 850	PU 84	ja	für 600 L Nutzinhalt Länge 1.06m statt 1.64 rechtfertigt VSI	0.077	9.2	5	12	PU, 260	nein

Tab.3, Blatt 3

-40	-40	Industrie "freezer"	1'640 x770 x 851	PU 84	ja	für 600 L Nutzinhalt Länge 1.06m statt 1.64 rechtfertigt VSI	0.11	13.2	5	17	PU, 270	nein
-50	-50	Gefrier-trocknung			ja?	??						
-175	-175	Leitungen Flüssiggas	Ø200	St'wo. 200 + Stahlmantel	ja	wenn aussen "vandalensicher": niedrige Mehrkosten bezügl. konventionell	265 /km	8600 /km	5	50 /Lfm	PU, >1000	nein
750	2000	Brennen Sonderkeramiken (Durchlauf-ofen)	1'000 x1'000 x5'000	(keine)	nein	Keram' wo. 100 kostengünstiger	264	13000			Keram' wo. 100	ja
750	1500	Glas-, Mineral-Schmelz-ofen	Ø 12'000 x3'000	(keine)	nein	Keram' wo. 100 kostengünstiger	540	54000			Keram' wo. 100	ja
750	1500	Transport Flüssigstahl in "Pfanne"		innen 4, ausen keine	nein	begrenzt durch T-ü					heutige Isol. innen	ja
400	1450	Brennen Zement (Drehrohr-ofen)	Ø4500 x60'000	keine	nein	St'wo 20 kostengünstiger	6200	155000	5	890	St'wo. 20	ja

Übergang-Temp T-ü zu VSI [°C]	obere Prozesstemp [°C]	Prozessart	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	VSI sinnvoll? (siehe =>)	warum oder warum nicht VSI	Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [MWh/a&Ein h.]	min. Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [CHF/a&Ein h.]	Amortisationszeit [a]	max. zul. Mehrkosten für VSI bezügl. Isolat. heute [CHF /m2]	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; Mat. u. Dicke	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; sinnvoll?
750	1250	Glühen, Carbonisierung (Durchlauföfen)	1'000 x3'000 x5'000	(keine)	nein	begrenzt durch T-ü, St'wo. 220 kostengünstiger	265	13000			St'wo. 220	ja
300	1250	Kessel thermisch. Kraftwerk	10'000 x 10'000 x 20'000	St'wo. 300 + 0.2 Alu	nein	Einsparung 70 MWh/a zu klein	70	3500			St'wo. 450	ja

Tab.3, Blatt 4

750	1200	Brennen von Keramik   Porzellan	1'000 x1'000 x 10'000		nein	begrenzt durch T-ü, St'wo. 220 kostengünstiger	325	1600			St'wo. 220	ja
750	1200	Brennen von Klinker   Backstein	2'500 x3'000 x40'000		nein	begrenzt durch T-ü, St'wo. 220 kostengünst.	3300	166000			St'wo. 220	ja
750	1100	Diffusionsglühen Stahl			nein	begrenzt durch T-ü, St'wo. 250 kostengünst.					St'wo. 250	ja
750	1000	Hochtemperaturlöten		(St'wo. 100)	nein	begrenzt durch T-ü, St'wo. 250 kostengünstiger					St'wo. 250	ja
300	1000	Kessel Kehrrechtverbrenn.		St'wo. 300 + 0.2 Alu	nein	begrenzt durch T-ü, St'wo. 300 kostengünstiger					St'wo. 300	ja
700	1000	Pyrolyse (Pneu, Abfall, Biomasse)			nein	Heizenergie aus Prozess selbst						
750	1000	(Re-)Aktivierung Aktivkohle (Drehrohröfen)			nein	begrenzt durch T-ü, St'wo. 200 kostengünst.	315	7900			St'wo. 200	ja

Übergang-Temp T-ü zu VSI [°C]	obere Prozesstemp [°C]	Prozessart	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	VSI sinnvoll? (siehe =>)	warum oder warum nicht VSI	Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [MWh/a&Ein h.]	min. Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [CHF/a&Ein h.]	Amortisationszeit [a]	max. zul. Mehrkosten für VSI bezügl. Isolat. heute [CHF /m2]	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; Mat. u. Dicke	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; sinnvoll?
						tiger						
750	900	Kalziniierung Titanoxyd (Drehrohr-Ofen)		keine	nein	begrenzt durch T-ü, St'wo. 200 kostengünstiger					St'wo. 200	ja
600	900	Aufkohlen Stahl			nein	begrenzt T-ü, St'wo. 250 kostengünstiger					St'wo. 250	

Tab.3, Blatt 5

500	500	Wärmespeicher solartherm. Kraftwerk	50m3 Ø4m x4m	(St'wo. 300 + 0.2 Alu)	nein	St'wo. 650 kostengünstiger	185	15400	3	927	St'wo. 650	ja
400	400	Erdöl Rektifikation (Kolonne)	Ø3000 x20'000	St'wo. 100? + 0.2 Alu	nein	St'wo. 380 kostengünstiger	257	7600	5	190	St'wo. 380	ja
300	300	Aushärten Binder Mineralwolle (Durchlauf-Ofen)	2'000 x2'000 x 30'000	St'wo. 300 + 0.2 Alu	nein	St'wo. 500 kostengünstiger	39	3900			St'wo. 500	ja
200	200	Sprüh-Trocknen (Lebensmittel, Keramik, Chemie, Pharma,...)			nein	Wärme Rückgewinnung aus Abluft bringt viel mehr						
180	180	Vulkanisationskessel Schläuche	Ø2000 x25000	(St'w. 300 + 1.0Al)	nein	PU, 300 kostengünstiger	13	900	5	29	PU, 300	ja

Übergang-Temp T-ü zu VSI [°C]	obere Prozesstemp [°C]	Prozessart	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	VSI sinnvoll? (siehe =>)	warum oder warum nicht VSI	Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [MWh/a&Ein h.]	min. Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [CHF/a&Ein h.]	Amortisationszeit [a]	max. zul. Mehrkosten für VSI bezügl. Isol. heute [CHF /m2]	VSI äquiv. konv. Isol. I-äq; Mat. u. Dicke	VSI äquiv. konv. Isol. I-äq; sinnvoll?
175	175	Gewinnung von Zellulose (Zellstoffkocher)	Ø6000 x35'000	(St'w. 300 + 1.0Al)	nein	PU, 460 kostengünstiger	100	7000	5	54	PU, 460	ja
125	125	Pasteurisieren (Wärmetauscher)	Ø500 x1'100	St'wo. 50 + 0.2Al	nein	Einsparung zu gering	1.1	152	3	250	St'wo. 500	nein
125	125	(Vakuum-) Walzen-Trocknen		-	nein	Wärme Rückgewinnung aus Abluft bringt mehr						
120	120	Beispiel Pharma Rohr-Reaktor	Ø1500 x4'000	St'wo. 670 + 0.2 Alu	nein	PU, 330 kostengünstiger	9	630	5	167	PU, 330	ja

Tab.3, Blatt 6

100	100	Zucker-gewinnung, Extraktions-turm	Ø 10'000 x 30'000	(St'wo . 300 + 1.0 Alu )	nein	zus. CHF25/m2 zu wenig für VSI	68	4750	5	25	PU, 500	ja?
100	100	industriell Kochen	1'000 x5'000 x500	(St'wo . 300 + Stahl-ab-deck.)	nein	zus. CHF39/m2 zu wenig für VSI	3	130	3	39	St'wo. >1000	nein
75	75	(Vakuum-) Band-Trocknen (Dörren)		-	nein	Wärme Rückgewinnung aus Abluft bringt viel mehr						
10	10	Lagerhäuser usw.	30'000 x 100'000 x 10'000	St'wo-le 300	nein	zus. CHF1/m2 viel zu wenig für VSI, wenn Platzgewinn nicht relevant	28	1400	5	1	St'wo. 700	nein

Übergang-Temp T-ü zu VSI [°C]	obere Prozessstemperatur [°C]	Prozessart	Bsp. Dim. Wand Ø*H bez. BxTxH	Isolat. heute üblich wenn (..) Annahme	VSI sinnvoll? (siehe =>)	warum oder warum nicht VSI	Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [MWh/a&Ein h.]	min. Einsp. Potenzial durch VSI od. I-äq [CHF/a&Ein h.]	Amortisationszeit [a]	max. zul. Mehrkosten für VSI bezügl. heute [CHF /m2]	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; Mat. u. Dicke	VSI äquiv. konv. Isolat. I-äq; sinnvoll?
-20	-20	Leitungen Pharma-Prozesskühlung	Ø100	St'wo. 50 + 0.2 Alu	nein	zus. 11/Lfm zu wenig für VSI	70/km	2350 /km	5	11 /Lfm	PU, 300	nein
-175	-175	Luftzerlegungskolonnen	Ø3000 x 20'000	St'wo. 80 + 0.2Alu	nein	PU, 410 kostengünstiger	82	6800	5	181	PU, 410	ja

Tab.3, Blatt 7

Tab. 3 Denkbare VSI taugliche industrielle Prozesse aus Tab. 2, bewertet und geordnet danach ob der Einsatz von VSI sinnvoll sein könnte.

(rot markiert: Abschätzung des gesamten CH-Energiespar-Potenzials in Abschnitt 9)

### 6.2 "Nicht sinnvoll für VSI" bewertete Prozesse

Es fällt auf, dass durch die Anwendung der obigen Kriterien 30 der 57 von uns als "für VSI Einsatz denkbar" eingeschätzten Prozesse als "nicht sinnvoll für VSI" bewertet werden.

Bei 20 dieser Fälle ist dies mit der Tatsache zu begründen, dass eine VSI-äquivalente konventionelle Isolation sinnvoll machbar und - mit einiger Wahrscheinlichkeit - kostengünstiger ist als eine VSI. In vielen dieser Fälle kommt dies daher, dass die Übergangstemperatur zu der heissen Seite der VSI beispielsweise 400°C oder 750°C nicht überschreiten darf und deshalb der Wärmedurchgang durch die VSI "künstlich" hoch gehalten werden muss, was leicht durch den Einsatz entsprechend weniger Folien zur Strahlungsminderung machbar ist. In den andern dieser Fälle begründet sich eine kostengünstigere äquivalente konventionelle Isolation dadurch, dass wegen der grossen Dimension der Prozessanlage auch sehr grosse Dicken von Isolationsmaterial sinnvoll erscheinen.

Bei weiteren 5, der als "nicht sinnvoll für VSI" bewerteten Fälle sind die Höhe der Einsparungen und die sich daraus ableitenden maximal sinnvollen Mehrkosten für eine VSI so gering, dass sich der Einsatz von VSI wirtschaftlich nicht auszahlt.

Bei 2 weiteren, nicht sinnvollen Fällen ist die Gesamteinsparung relativ zum gesamten "Energieumsatz" der entsprechenden Anlage so klein, dass ein näheres Eingehen auf VSI nicht lohnt. Beispielsweise bringt die abgeschätzte Einsparung durch VSI von ca. 70 MWh/a bei einem beispielhaften thermischen Kraftwerk eine "Verbesserung" des Gesamtwirkungsgrades des Kraftwerks um nur wenige Promille.

Bei den 3 Trocknungs-Prozessen, die Aufnahme in unsere Auswahl von Prozessen gefunden haben, hat sich bei näherer Betrachtung herausgestellt, dass in den von uns aufgefundenen Fällen keine Wärmerückgewinnung aus der Abluft stattfindet. Da das Einspar-Potenzial durch eine solche Rückgewinnung ungleich höher ist als dasjenige eines VSI-Einsatzes haben wir auf die nähere Betrachtung von Trocknungs-Prozessen verzichtet.

Zur genaueren Begründung dieser "Negativauswahl" besprechen wir 2 Beispiele:

### 6.2.1 Stahlpfanne

Eine Stahlpfanne wird in der Stahlindustrie zum Transport von ca. 80 Tonnen ca. 1600°C heissen flüssigen Stahls verwendet und ist prinzipiell wie ein übergrosser Kochtopf aus Stahl geformt. Der Durchmesser einer solchen Pfanne beträgt beispielsweise knapp 3 m und ihre Höhe knapp 4 m.

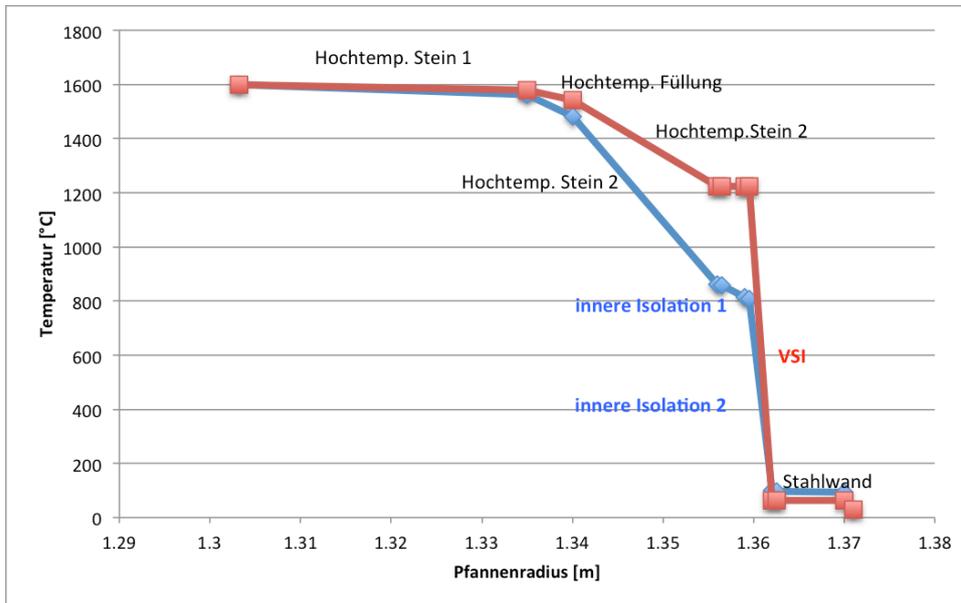


Fig. 3 Temperaturprofile durch die Wandung einer Stahlpfanne mit heutigem Aufbau (blau) und mit Annahme eines VSI-Aufbaus (rot)

Auf der Innenseite der Stahlwand befinden sich, von innen nach aussen aufgezählt, beispielsweise eine erste Schicht aus hochtemperaturfestem Stein, eine Hinterschüttung aus Hochtemperaturmaterial, eine zweite Schicht aus einem anderen hochtemperaturfestem Stein sowie eine erste und eine zweite thermische Isolationsschicht. Die 3 letzten Schichten sind untereinander mit einem hochtemperaturfesten Klebstoff verbunden.

Figur 3 zeigt mit der blau dargestellten Kurve das ungefähr abgeschätzte Temperaturprofil durch diesen Aufbau. Man erkennt, dass die Innenausschaltung des Stahlbehältnisses die Temperatur bis zur Stahlwand auf ca. 100°C absenkt.

Bei unseren Überlegungen zum allfälligen Einsatz einer Vakuumpalt-Isolation (VSI) sind wir davon ausgegangen, dass diese Temperatur der Stahlwand aus Festigkeitsgründen nicht wesentlich überschritten werden darf.

Es ist - ohne Darstellung eines entsprechenden Temperaturprofils - unmittelbar einsichtig, dass dies eine zusätzliche VSI auf der Aussenseite der Pfanne verbietet. In diesem Falle würde nicht nur die Temperatur der Stahlwand zu hoch, sondern auch die innere Isolation 2 würde zu hohen Temperaturen ausgesetzt.

Ein allfälliger Einsatz einer VSI müsste also so erfolgen, dass die VSI die heutige inneren Isolationen 1 und 2 ersetzt. Dazu nehmen wir an, dass die beiden Schichten aus Hochtemperaturstein den vom flüssigen Stahl auf die Wandung ausgeübten Druck soweit abbauen, dass die VSI dem restlichen Druck standhalten kann. (Dies ist nicht bewiesen und sehr zweifelhaft, spielt aber für unsere Überlegungen keine Rolle). Die rot dargestellte Kurve von Figur 3 zeigt ein entsprechend abgeschätztes Temperaturprofil. Es ist unmittelbar erkenntlich, dass sich ein solcher Einsatz einer VSI von selbst verbietet. Die Temperatur der inneren VSI-Wand liegt mit über 1200°C weit oberhalb der von uns als äusserste obere Grenze definierten 750°C.

### 6.2.2 Zement-Drehrohrofen

Ein weiteres Beispiel für eine zu hohe Übergangstemperatur auf der Innenseite einer VSI, ist der Zement-Drehrohrofen. Dieses Kerngerät der Zementindustrie ist für einen Grossteil des hohen Ener-

gieverbrauchs (siehe Tab. 1) dieser "kleinen" Branchengruppe verantwortlich. Aus diesem Grund ist diese mögliche VSI- Anwendung einer der Fälle die wir relativ ausführlich bearbeitet haben.

Ein Zement-Drehrohröfen besteht im Wesentlichen aus einem grossen C-Stahlrohr mit einem Durchmesser von 4 - 5m und einer Länge von 50 bis 70m. Die Rohrlängsachse verläuft mit einem kleinen Neigungswinkel von oben am Rohreingang nach unten am Rohrausgang. Das zu brennende Gut wird kontinuierlich am Rohreingang eingespeist und durch die Rotation des Rohrs um seine Längsachse gegen unten zum Rohrausgang transportiert. Die Energiezufuhr erfolgt in Form einer offenen Flamme, die im Gegenstromprinzip vom unteren Rohrausgang her eingeblasen wird. Die maximale Prozesstemperatur im Innern des Rohrs liegt bei ca. 1450°C.

Das Stahlrohr ist auf seiner Innenseite mit Hochtemperatur festen Steinen (Schamotte u.ä.) ausgekleidet, welche einerseits die, durch das zu brennende Gut ausgeübten hohen Kräfte und Abriebe aufnehmen müssen. Andererseits dient diese Auskleidung der thermischen Isolation, die so gut sein muss, dass das sonst seine Festigkeit verlierende C-Stahl Rohr keinesfalls heisser als 400°C wird. Bei modernen Zement-Drehrohröfen ist diese "innere" Isolation deutlich besser und die Temperaturen des Stahlrohrs liegen in der Gegend von 100°C.

Theoretisch wäre es möglich einen Teil dieser "inneren" Isolation so durch eine wesentlich dünnere VSI zu ersetzen, dass die Temperatur der heissen VSI-Wand nicht höher als 750°C wird. Dies würde bei gleichem Rohrdurchmesser zu einem vergrösserten Durchfluss führen. Bei näherer Betrachtung wird aber schnell klar, dass - zumindest mit den bis heute entwickelten Ansätzen zum Aufbau einer VSI - die wirkenden hohen Kräfte nicht von der VSI übernommen werden können.

Was theoretisch möglich bleibt, ist der Aufbau einer VSI auf der Aussenseite des C-Stahlrohrs. Dies aber würde sehr rasch zu einer Überhitzung des Stahlrohrs führen. Unsere rechnerische Abschätzung hat ergeben, dass die VSI zur Vermeidung einer Stahlrohrtemperatur von über 400°C bestenfalls so gut sein dürfte wie eine lediglich 20 mm dicke Steinwollschicht. Dies bedeutet, dass wenn man denn schon zusätzlich auf der Aussenseite des Stahlrohrs isolieren wollte, die Steinwollschicht wesentlich kostengünstiger wäre.

Die aus einer derartigen zusätzlichen Steinwolle-Isolation theoretisch resultierende Energieeinsparung erscheint mit ca. 6.2 GWh/a für ein einziges Drehrohr relativ gross. Für die (vermutlich) 6 schweizerischen Drehrohre ergäbe dies total ca. 37 GWh/a Einsparpotential. Bezieht man diesen Wert aber auf den aus Tabelle 1 ersichtlichen gesamten Energieverbrauch der Zementbranche (ca. 14400 TJ/a bzw. ca. 4000 GWh/a) erkennt man, dass mit dieser Investition in Isolation knapp 1% des Energieverbrauchs der Branche einzusparen wäre.

### 6.3 "Sinnvoll für VSI" bewertete Prozesse

Bei den 27 verbleibenden, positiv bewerteten Prozessen, haben wir für 6 derselben eine Übergangstemperatur zur heissen Seite der VSI von grösser als 400°C abgeschätzt. Dies bedeutet dass in diesen Fällen mit einem erheblichen zusätzlichen Entwicklungsaufwand für die VSI gerechnet werden müsste, der mit höherer Übergangstemperatur immer grösser wird.

Bei 16 der 27 als "sinnvoll für VSI" bewerteten Prozesse haben wir zulässige Mehrkosten für einen wirtschaftlichen Einsatz der VSI von teilweise weit über CHF 100 / m<sup>2</sup> abgeschätzt und bei weiteren 4 liegen die erlaubten Zusatzkosten zwischen CHF 50-100 / m<sup>2</sup>. Da wir nach dem heutigen Stand des Wissens davon ausgehen, dass sich die Kosten für einen Quadratmeter VSI, abhängig vom Anwendungsfall zwischen 50 bis 100 CHF bewegen werden, bedeutet dies, dass in diesen Fällen mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einem wirtschaftlichen Einsatz von VSI gerechnet werden kann.

Bei den restlichen 6 der als sinnvoll bewerteten Fälle, geschah dies aus unterschiedlichen Gründen.

In den beiden Fällen "Sonnen-Flachkollektor zur Erzeugung von Prozesswärme" und "Saisonal Solar-Wärmespeicher in der Hauswand" wird ein Bau derartiger Anlagen erst möglich durch den Einsatz von VSI.

In den drei Fällen "Kühlschrank", "Gewerbe-Kühltruhe" und "Industrie-freezer" rechtfertigt sich die positive Bewertung einerseits aus dem Zusatznutzen des wesentlich geringeren Platzverbrauch für den gleichen Nutzinhalt, was zu erheblichen Einsparungen an teurer Fläche beispielsweise im Verkaufs- und Lagerbereich von Einkaufszentren führen kann. Andererseits werden diese Geräte in sehr grossen Stückzahlen hergestellt und eingesetzt, so dass schon relativ kleine Einsparungen pro Gerät in Summe zu genügend hohem Gesamtnutzen bei Herstellung und Betrieb führen können.

Den Fall "Gefriertrocknung" haben wir gefühlsmässig positiv bewertet, obwohl es uns im Rahmen dieser Arbeit nicht gelungen ist, dies mit einem aussagekräftigen Beispiel zu untermauern.

Die von uns abgeschätzten Energiespar-Potenziale der als sinnvoll bewerteten Fälle sind unter Berücksichtigung einer plausiblen Anzahl solcher Geräte bzw. Anlagen gross bis sehr gross, was wir an einigen Beispielen zeigen wollen:

Druckleitungen in der Chemieindustrie transportieren Prozesswärme in Form von Druckdampf von einem zentralen Erzeuger zu den verschiedenen Verbrauchern im Werk. In einem Fall eines schweizerischen Chemiewerkes sind ca. 200 km derartiger Rohre vorhanden, die Dampf bei einer durchschnittlichen Temperatur von 180°C transportieren. Unsere rechnerische Abschätzung hat gezeigt, dass für eine VSI dieser Rohre ca. 155 CHF/Lfm über die heutigen Isolationskosten hinaus ausgegeben werden dürfen, damit sich die Investition innerhalb 5 Jahren amortisiert. Mit den von uns abgeschätzten 550 MWh/(a\*km) die mittels einer solchen VSI eingespart werden können, berechnet sich eine Gesamteinsparung von ca. 110 GWh/a in diesem einen Chemiewerk.

Sehr ähnlich sieht es für die Leitungsrohre in der Pharmaindustrie aus, bei welchen Dampf mit einer durchschnittlichen Temperatur von 150°C transportiert wird und ein Spar-Potenzial von 420 MWh/(a\*km) resultiert.

Die totale Länge des Fernwärmenetzes in der Schweiz beträgt zurzeit ca. 870 km. Wenn wir davon ausgehen, dass die Rohre durchschnittlich Ø150 mm und Steinwolle-Isolation der Stärke 150 mm aufweisen und damit Wasser bei durchschnittlich 125°C transportiert wird, so ergibt unsere Abschätzung ein Spar-Potenzial von 130 MWh/(a\*km) oder hochgerechnet auf die ganze Schweiz von ca. 100 GWh/a.

Da in der Schweiz zusätzlich eine erhebliche Anzahl neuer Wärmeleitungs-Netzwerke in Planung sind und - wie wir in Abschnitt 8 zeigen werden - VSI für Rohr relativ einfach und kostengünstig realisierbar sein sollte, kann die Summe der andiskutierten Netzwerke als erhebliches Potenzial bewertet werden.

Eine durchschnittliche Kolonne in der Pharmaindustrie hat ca. einen Durchmesser von 1 m, eine Höhe von 5m und arbeitet bei einer mittleren Temperatur von 105°C. Unsere Expertengespräche haben ergeben, dass eine Isolation aus 80 mm Steinwolle (oder einem ähnlichen Material) ein vernünftiger Durchschnittswert für die heutige Isolation sein könnte. Die rechnerische Abschätzung mit diesen Werten ergibt, dass für eine VSI dieser Kolonne ca. 210 CHF/m<sup>2</sup> über die heutigen Isolationskosten hinaus ausgegeben werden dürfen, damit sich die Investition innerhalb 5 Jahren amortisiert. Die von uns abgeschätzte 7 MWh/(a\*km) Energieeinsparung mittels VSI pro Kolonne erscheint zunächst als eher niedrig. Zieht man aber in Betracht, dass in entsprechenden Pharmawerken eine Grössenordnung von 1000 Kolonnen pro Werk im Einsatz sind, ergibt sich pro Werk ca. 7 GWh/a Spar-Potenzial.

Durchlauföfen zum Weichlöten sind tunnelartige Gebilde, die in Umfangrichtung ringsherum thermisch isoliert sind. Weil in den meisten Werken die solche Öfen einsetzen, viele dieser Anlagen nebeneinander stehen, ist diese Isolation aus Platzgründen in der Regel relativ dünn. Für unsere rechnerische Abschätzung haben wir eine Steinwolle-Isolation von 50 mm Stärke angenommen. Die Temperatur im Ofen beträgt durchschnittlich ca. 300°C. Für eine durchschnittliche Ofenabmessung

von 1x1x5 m ergeben unsere Abschätzungen, dass für eine VSI dieses Tunnelofens ca. 620 CHF/m<sup>2</sup> über die heutigen Isolationskosten hinaus ausgegeben werden dürfen, damit sich die Investition innerhalb 5 Jahren amortisiert. Mit einer entsprechenden VSI ergibt sich ein Einspar-Potenzial von ca. 29 MWh/ a pro Ofen und weil Tausende dieser oder ähnlicher Öfen in der Schweiz im Einsatz stehen ein erhebliches totales Einspar-Potenzial.

## 7. Identifizierung weniger Gruppen für VSI

Die Vielfalt der unterschiedlichen für einen allfälligen Einsatz von Vakuumpalt-Isolation (VSI) geeigneten Anlagen ist enorm. Es kann deshalb nicht gelingen, die Mehrzahl dieser Anlagen, Maschinen und Geräte in wenigen Gruppen zusammenzufassen.

Es scheint uns jedoch möglich, einige Gruppen zu definieren, innerhalb derer die Anlagen eine so grosse geometrische Ähnlichkeit aufweisen, dass prinzipielle Aussagen zum Aufbau einer geeigneten VSI für alle diese Geräte sinnvoll sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit haben wir beispielhaft die weiter unten besprochenen 4 Gruppen gebildet. Wir gehen einerseits davon aus, dass es gelingen kann, weitere solcher Gruppen zu finden und andererseits meinen wir, dass die in Abschnitt 8 diskutierten Aufbaubeispiele für diese Gruppen, Prinzipien aufzeigen, welche auch für Anlagen und Geräte ausserhalb der diskutierten Gruppen Anwendung finden könnten.

### 7.1 Schlanker Zylinder

Bei 9 der in Tabelle 3 als sinnvoll für VSI bewerteten Prozessen hat die entsprechende Anlage die Form eines schlanken Zylinders oder einer schlanken Röhre mit einem Durchmesser von  $\leq 1\text{m}$  und einer deutlich grösseren Länge. Da in diesen Fällen einerseits eine verbesserte thermische Isolation besonders viel Wirkung zeigt und andererseits eine sehr dicke konventionelle Isolation keinen Sinn macht, kann man generell festhalten, dass der schlanke Zylinder eine besonders für VSI geeignete Form ist. Dank der grossen geometrischen Ähnlichkeit können innerhalb dieser Gruppe Prinzipien für den Aufbau von VSI abgeleitet werden, auf welche wir in Abschnitt 8 anhand von Beispielen eingehen werden.

### 7.2 Kleiner, kurzer Zylinder

In Anwendungsfällen wie Warmwasser-Boilern, gewissen Wärmespeichern oder bestimmten chemischen Reaktoren usw. handelt es sich um im Wesentlichen zylindrische Körper, deren Höhe etwa ihrem Durchmesser entspricht oder sogar deutlich kleiner als dieser ist. Dabei gehen wir davon aus, dass der Durchmesser des Körpers einen Wert von ca. 3 m nicht überschreitet. Wir versuchen derartige Körper bezüglich VSI in einer Gruppe "kleine kurze Zylinder" zusammenzufassen. Ähnliche zylindrische Körper mit wesentlich grösserem Durchmesser müssten bezüglich VSI anders behandelt werden.

### 7.3 Schlanker Kubus

Die Aussagen von Abschnitt 7.1 können übertragen werden auf alle einen schlanken Kuben bildenden Körper, mit im Wesentlichen rechteckiger Querschnittsform, d.h. für viele Anlagen wie Tunnelöfen, andere Durchlauföfen oder Durchlaufbäder. Wir fassen derartige Körper bezüglich VSI in einer Gruppe "schlanker Kubus" zusammenzufassen.

### 7.4 Kubus

In Anwendungsfällen wie Kühlschränke, gewerbliche Tiefkühltruhen oder bestimmten industriellen "freezern" usw. handelt es sich um im Wesentlichen kubische Körper, deren Höhe etwa den Seitenlängen ihres im Wesentlichen rechteckigen Querschnitts entspricht. Wir versuchen derartige Körper bezüglich VSI in einer Gruppe "Kubus" zusammenzufassen.

## 8. Mögliche Aufbauten der VSI

Wir haben für die in Abschnitt 7 identifizierten Anwendungsgruppen einige mögliche Aufbaubeispiele von Vakuumpalt-Isolation (VSI) erarbeitet. Wir sind der Meinung, dass diese Beispiele jeweils für die entsprechende Gruppe gültige Aufbauprinzipien zeigen und dass mit diesen Prinzipien analoge Aufbauten für - geometrisch in die jeweilige Gruppe gehörige - Anlagen völlig unterschiedlicher Prozesse ausgearbeitet werden können.

Es muss jedoch betont werden, dass die gezeigten VSI-Aufbauprinzipien mindestens teilweise davon ausgehen, dass die gesamte Prozess-Anlage entsprechend angepasst ist. Mit anderen Worten heisst dies, dass es uns in der Regel unmöglich - oder zumindest aus Kostengründen unsinnig - erscheint, bei bestehenden Aufbauten einfach die konventionelle thermische Isolation durch VSI zu ersetzen, ohne entsprechende - oftmals relativ kleine - Anpassungen an der bestehenden Aussenhülle der Anlage zu machen.

Es ist klar, dies stellt ein prinzipielles Hindernis zur breiten Einführung von VSI bei industriellen Anlagen dar. Einerseits scheint es oftmals schwierig bis unmöglich, solche Anpassungen mit vernünftigem Aufwand durchzuführen, was wir bei ursprünglicher Auswahl der Prozesse von Tabelle 2 und der dortigen Bewertung der Prozesse in "VSI denkbar" und VSI nicht denkbar" auch schon gebührend berücksichtigt haben. Andererseits wird es in vielen Fällen an der Bereitschaft fehlen, den notwendigen konstruktiven Konstruktionszyklus zu durchlaufen und dies oftmals vermutlich aus uns jetzt nicht bekannten vernünftigen Gründen.

### 8.1 Schlanker Zylinder

#### 8.1.1 Rohre

Wir betrachten hier alle Arten von Leitungsrohren und lange rohrartige Gebilde in welchen beliebige Prozesse im Durchlaufprinzip stattfinden. Vom Prinzip her gehören damit beispielsweise die in der Chemie- oder Pharma-Industrie verwendeten Rohr-Reaktoren genauso in diese Untergruppe wie beispielsweise auch sämtliche Prozesse, die in Drehrohren ablaufen.

Figur 4a zeigt die Prinzipskizze eines denkbaren Aufbaus einer VSI gedämmten Rohrleitung. Die Leitung kann beispielsweise eine Druckleitung sein, in welcher in einem Chemiewerk Prozesswärme in Form von Dampf bei beispielsweise 220°C über mehrere Kilometer Distanz transportiert wird. Es kann sich beispielsweise aber auch um eine einfache Warmwasserleitung in Gebäuden oder um das Rohr eines Drehrohrofens handeln.

Im Falle der Chemie-Druckleitung sind die einzelnen miteinander durch Schraubflansche verbundenen Rohrabschnitte beispielsweise jeweils 6 m lang und tragen sich von Flansch zu Flansch selbst.

Von Flansch zu Flansch laufend, ist auf der Aussenseite des Druckrohrs ein Wellrohr eingeschweisst, das beispielsweise einen um 20 bis 50 mm grösseren inneren Durchmesser als das Druckrohr aufweist und eine Wandstärke von beispielsweise 0.5 mm hat. Der Zwischenraum zwischen Druckrohr und Wellrohr ist evakuiert und bildet die VSI. Die Verwendung eines Wellrohrs drängt sich auf, weil ein solches Rohr erstens problemlos eine grosse Wärmedilatation gegenüber dem Druckrohr aufnehmen kann und zweitens eine hohe radiale Druckfestigkeit zur Aufnahme des Luftdruckes aufweist. Distanzhalter sind deshalb nicht wegen des Luftdruckes notwendig, sondern es werden nur einige wenige gebraucht, welche ein "Durchhängen" des Wellrohrs verhindern müssen.

Die skizzierte Halterung, welche beispielsweise dafür sorgt, dass die gesamte Rohrleitung in genügender Höhe durch ein Chemiewerk läuft, kann bei den Flanschen angebracht sein. Wenn es sich bei dem skizzierten Rohr um das Rohr eines Drehrohrofens handelt, können die Flansche und die Halterung zusammen auch ein Rotationslager bilden, welches die Drehung des Rohrs um seine Längsachse erlaubt.

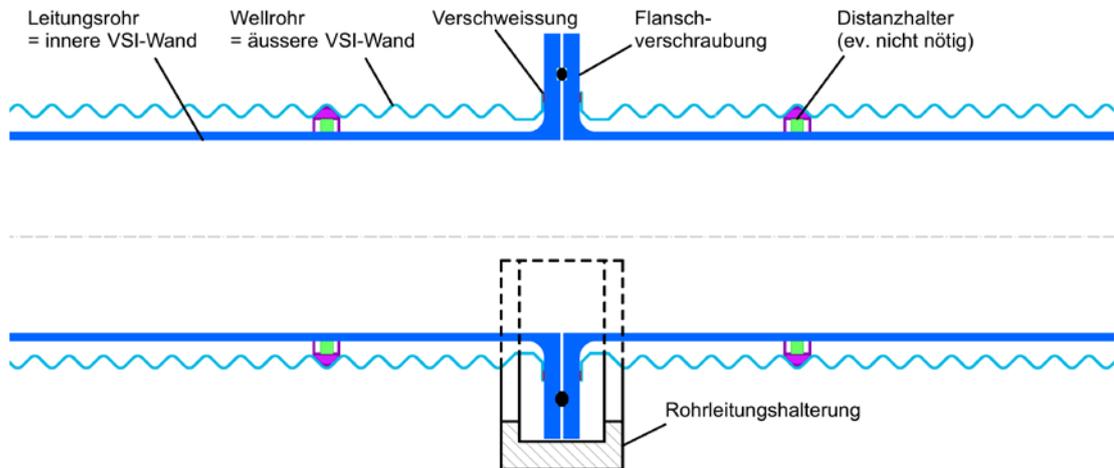


Fig. 4a Prinzipskizze eines denkbaren Aufbaus einer VSI gedämmten Rohrleitung

Es ist offensichtlich, dass der Bereich der Flansche in Figur 4a eine thermische Schwachstelle bildet, was aber bei den heute in den Chemiewerken verlegten, konventionell gedämmten Rohren auch der Fall ist.

Unsere Berechnungen haben zusätzlich gezeigt, dass der Wärmeverlust über diese beispielsweise nur 50 mm breite Zone bei langen Rohrabschnitten nahezu vernachlässigbar ist. Ausserdem wäre es relativ einfach diese thermische Schwachstelle mittels konventioneller Isolation wesentlich zu verbessern.

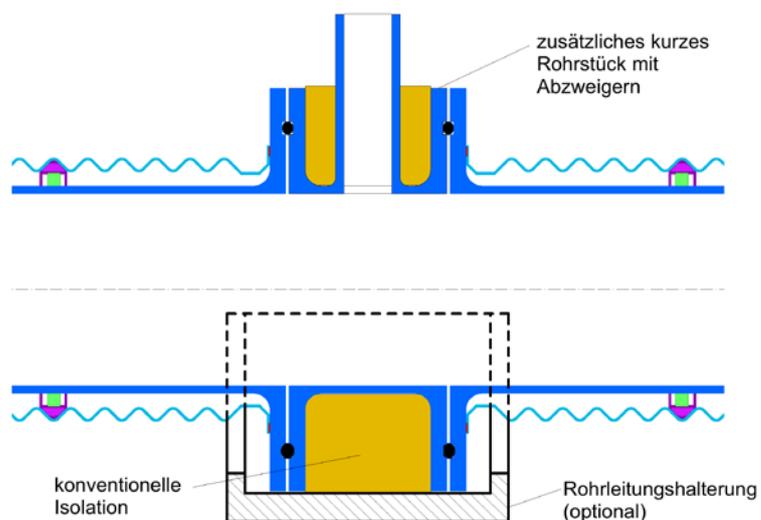


Fig. 4b Prinzipskizze einer VSI gedämmten Rohrleitung mit Abzweigungen

Figur 4b zeigt einen Lösungsansatz für den wichtigen Fall von Rohrabzweigern. In diesem Fall kann beispielsweise ein, mit konventionellen Werkstoffen gedämmtes, kurzes Verzweiger-Rohrstück zwischen zwei lange, mit VSI gedämmte Rohrabschnitte eingeflanscht sein. Von diesem Verzweiger-Rohrstück aus können dann radial so viele Rohre weglaufen, wie es die verwendeten Rohrdurchmesser zulassen.

Selbstverständlich können auch die weglaufenden Leitungen wiederum VSI gedämmt sein indem die radial vom Verzweiger-Rohrstück weglaufenden Rohre nach möglichst kurzer Strecke in einem Flansch enden an welchen dann ein VSI gedämmtes Rohr angeflanscht wird.

Es ist offensichtlich, dass auf ähnliche Art auch notwendige Krümmungen der Rohrleitung realisiert werden können. Statt eines als Zwischenstück eingeflanschten Rohrabzweigers müssen dann eingeflanschte kurze Rohrkrümmerstücke verwendet werden.

In Abschnitt 9 bei der beispielhaften Abschätzung von Gesamtpotenzialen der Energie-Einsparung wird deutlich werden, dass der verbesserten Isolation von Warmwasserleitungen in Gebäuden eine hohe Bedeutung zukommen könnte. Aus diesem Grunde gehen wir näher auf dieses Beispiel ein.

Das in Tabelle 3 ausgewiesene Einspar-Potenzial von 38 MWh pro Jahr und Kilometer wurde abgeschätzt für eine Warmwasserleitung mit 20 mm Innendurchmesser in welcher Wasser mit einer konstanten Temperatur von 65°C fließt. Als konventionelle thermische Isolation, gegenüber welcher das genannte Spar-Potenzial mittels VSI realisierbar ist, wurde eine Hülle aus PU-Schaum mit einer Stärke von 50 mm angenommen, also 10 mm mehr als entsprechend der heutigen VSI-Norm für Rohre mit Durchmesser 20 bis 30 mm. Die für die Berechnung verwendete Wärmeleitfähigkeit von 0.030 W/mK ergibt sich aus der Temperaturabhängigkeit dieses Wertes, der nominell mit dem bei 10°C gültigen Wert von ca. 0.022 W/mK in den Datenblättern zu finden ist.

Unsere Berechnung der Wärmeverluste für die VSI beinhaltet selbstverständlich auch die Abschätzung der Randverluste bei den Rohrstössen. Für die Abschätzung des in Tabelle 3 mit 4300 CHF/a\*km ausgewiesenen finanziellen Einspar-Potenzials haben wir für die Rohrabzweigungen einen weiteren Verlust von 10%, einen Kesselwirkungsgrad von 80% und Energiekosten von 0.1 CHF/kWh (entsprechend ca. 1 CHF/Liter Heizöl) angenommen.

Unter Annahme einer - für Warmwasserleitungen bescheidenen - Amortisationszeit von 10 Jahren ergibt sich daraus, dass ein VSI gedämmtes Rohr CHF 43 mehr kosten darf, als ein mindesten 17 CHF/Lfm kostendes mit 50 mm PU gedämmtes Rohr. Dies bedeutet, dass für ein VSI gedämmtes Rohr ca. 60 CHF/Lfm aufgewendet werden dürfen damit es sich nach Ablauf von 10 Jahren beginnt auszuzahlen.

Um abzuschätzen ob VSI-Rohre für diesen Preis überhaupt machbar sein könnten, gehen wir von dem in Figur 4c skizzierten, sehr aufwändigen Prinzip aus. Wir betonen, dass es sich bei dieser Skizze keinesfalls um eine ausgereifte Konstruktion handelt, sind aber überzeugt, dass auf diese oder ähnliche Weise ein VSI-Rohrleitungssystem für Gebäude entwickelt werden könnte. In Figur 4c überlappen sich die VSI aneinander stossender Rohrleitungsstücke gegenseitig und die Rohre sind beispielsweise mittels einer druckwasserdichten Schnappvorrichtung miteinander verbunden. Geht man davon aus, dass sowohl das innere (Øi z.B. 20mm) als auch das äussere (Øe z.B. 26 mm) teilweise gewellte Edelstahlrohr eine Wandstärke von 1 mm aufweisen, findet man beispielsweise im Salzgitter-Mannesmann Katalog (2013) dass die beiden auf Dichtigkeit geprüften, nahtlosen Edelstahlrohre in Summe ca. CHF 30/Lfm kosten. Für die Herstellung der beispielsweise 0.1 bis 0.2 mm starken Überlapprohrstücke, die notwendigen Rollnahtverschweissungen, die Distanzhalter, das Evakuieren und den notwendigen Getter stehen also weitere ca. CHF 30/Lfm zur Verfügung. Dies sollte bereits bei einer Produktion mittelgrosser Serien machbar sein.

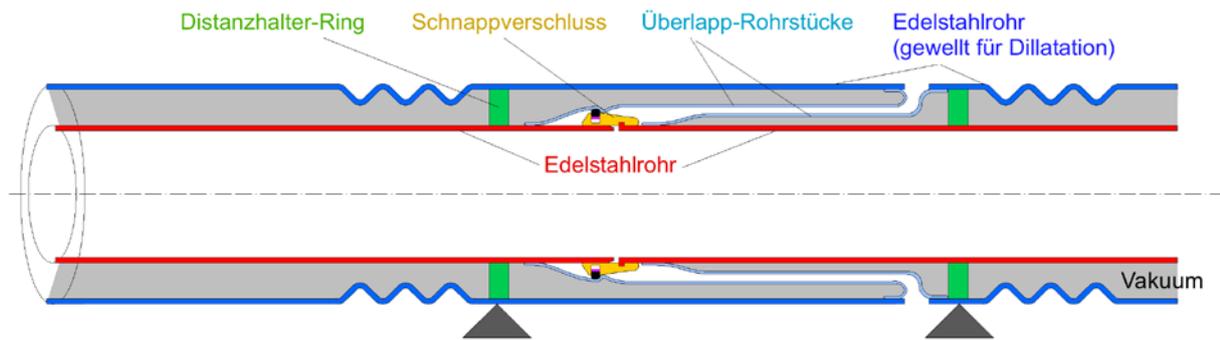


Fig. 4c Prinzipskizze einer denkbaren Warmwasserleitung mit Überlappung an den Rohrstößen

### 8.1.2 Verschlussene schlanke Zylinder

Figur 5 zeigt die Prinzipskizze eine VSI gedämmten, an beiden Enden verschlossenen schlanke Zylinders anhand einer beispielhaften Rektifikationskolonne, die beispielsweise einen Durchmesser von 0.5 bis 1.5 m und eine Höhe von 3 bis 12 m aufweist.

Innerhalb des eigentlichen, mit zwei angeflanschten oder eingeschweissten Deckeln versehenen Prozessrohres, können nach Bedarf die üblicherweise notwendigen zusätzlichen Schichten oder Heizrohre usw. vorhanden sein.

Es ist sofort ersichtlich, dass das in Figur 5 skizzierte VSI-Aufbauprinzip exakt demjenigen des vorherigen Abschnittes entspricht. Zwischen zwei Flanschen ist ein, das Vakuum einschliessendes dünnes Wellrohr eingeschweisst. Weil die Kolonne senkrecht steht und deshalb das Wellrohr nicht durchhängt, kann mit grosser Wahrscheinlichkeit ganz auf Distanzhalter verzichtet werden.

In vielen Fällen muss den in der Kolonne ablaufenden Prozessen auf verschiedenen Höhen Stoff zu- oder abgeführt werden. Dies bildet solange kein prinzipielles Hindernis zum Einsatz von VSI, solange diese Zu- bzw. Ableitungen in einige wenige kurze Zonen gebündelt werden können. Prinzipiell könnte dann der Aufbau exakt dem in die Senkrechte gestellten von Figur 4b entsprechen. Wir haben in Figur 5 aber einen Fall gezeigt, in welchem das den Prozess umschliessende Rohr keine störenden Spalte aufweisen darf und deshalb durchgängig aufgebaut ist.

In diesem Falle kann die Verzweigungszone von zwei flanschartigen Wänden begrenzt sein, an welche das Vakuum-Wellrohr angeschweisst ist. Um die dadurch erzeugten Wärmeverluste zu minimieren, sind diese Wände möglichst dünn und kurz. Zwischen diese Wände und um die abzweigenden Rohre herum kann wiederum konventioneller Dämmstoff eingefüllt sein, welche zur Minimierung der Wärmeverluste auch noch ein Stück weit über das Wellrohr gezogen sein kann.

Die beiden die Kolonne verschliessenden Deckel sind als nicht thermisch isoliert dargestellt. Dies ist immer dann

wirtschaftlich sinnvoll, wenn das Verhältnis von Deckelfläche zu Umfangsfläche sehr klein ist, was bei den oben genannten Dimensionen der Fall ist. Bei Notwendigkeit der Isolation der Deckel wäre in der Regel aus Aufwand-, Nutzengründen eine konventionelle Isolation einer allenfalls mit grossem Aufwand machbaren VSI vorzuziehen.

## 8.2 Kleiner kurzer Zylinder

Figur 6 zeigt die Prinzipskizze eines VSI gedämmten, kleinen kurzen Zylinders bei welchem es sich beispielsweise um einen Warmwasser-Boiler oder einen kleineren Wärmespeicher mit  $\varnothing \leq 3\text{m}$  und Höhe  $\leq 5\text{m}$  handeln könnte.

Der prinzipielle Unterschied zu den oben gezeigten Beispielen mit schlanken Zylindern besteht darin, dass die kreisförmigen Endflächen an den beiden Zylinderenden in ihrer Grösse gegenüber der Zylinderfläche nicht mehr vernachlässigbar sind und damit substantiell zu den Wärmeverlusten beitragen.

Es ist deshalb unbedingt notwendig, diese beiden Endflächen ebenfalls thermisch zu isolieren. Im Beispiel von Figur 6 schlagen wir vor, dies mit konventionellem Dämmstoff zu tun. Dies aus dem Grund, dass eine VSI für diese Flächen zwar machbar wäre, aber der notwendigen Durchführungen wegen so aufwändig wäre, dass sich die damit erzielbare Verbesserung vermutlich wirtschaftlich nicht rechtfertigen liesse.

Wie in den vorgängig gezeigten Beispielen bildet die Druckwand des Speichers die innere VSI-Wand, wobei hier diese Druckwand mittels eines angeschweissten kurzen und sehr dünnwandigen - z.B. 0.1 bis 0.2 mm starken - Zylinders so weit gegen oben und unten verlängert ist, dass sie die diskutierte konventionelle Isolation der beiden Endflächen vollständig umschliesst.

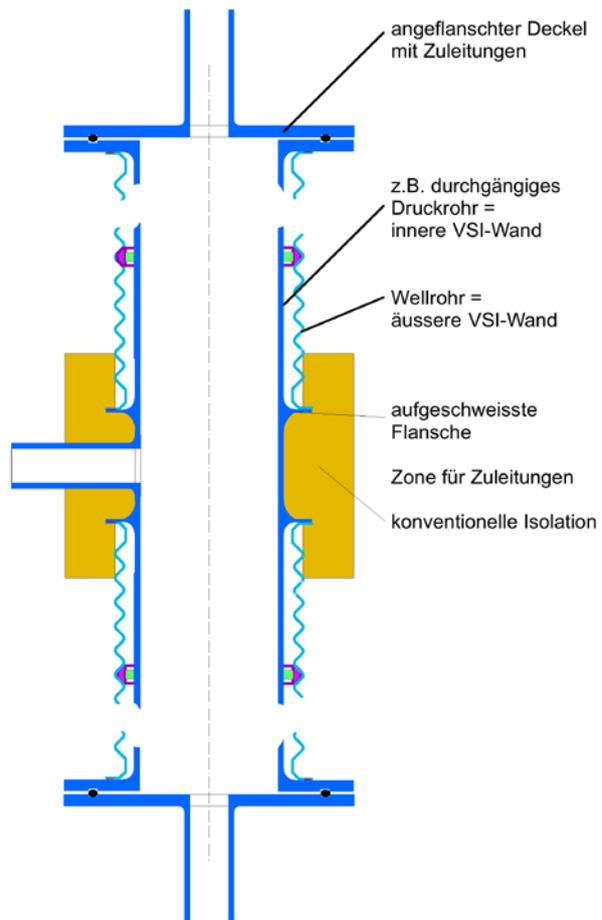


Fig. 5 Prinzipskizze einer VSI gedämmten Kolonne

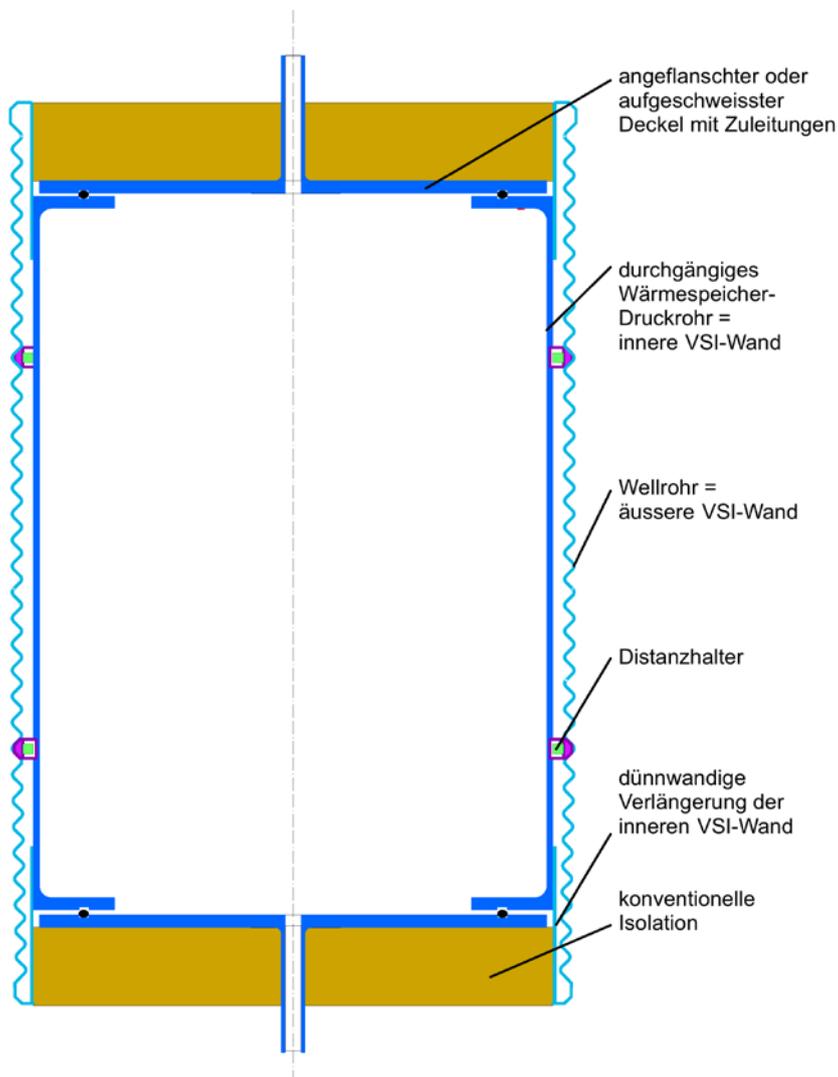


Fig. 6 Prinzipskizze eines VSI gedämmten Warmwasserspeichers

Diese dünnwandige Verlängerung der inneren VSI-Wand dient durch die Realisierung des Überlappungsprinzips der Minimierung der Wärmeverluste. Auf diese Weise erfolgt der Wärmetransport vom heissen Teil der inneren VSI-Wand nach aussen über eben diese dünne Wand und kann deshalb, abhängig von der Höhe dieser Wand, nahezu vernachlässigbar klein gehalten werden.

Die äussere VSI-Wand ist, aus Gründen der mechanischen Stabilität und der Wärmedilatation, auch hier wieder als Wellrohr aus dünnwandigem Stahl ausgebildet. Zur Stabilisierung des Wellrohrs sind einige wenige Distanzhalter /  $m^2$  vorzusehen.

Wenn bei einem Wärmespeicher Wasser unterschiedlicher Temperatur auf unterschiedlichen Höhen des Speichers eingeführt oder entnommen werden muss, ist es bei einem VSI-isolierten Gebilde entsprechend Figur 6 unbedingt empfehlenswert, die entsprechenden Leitungen durch die konventionell gedämmten Endflächen und durch das Speicherinnere auf die gewünschte Höhe zu führen. Auf diese Weise können die - im Falle einer VSI sehr grossen - Wärmeverluste über die ansonsten notwendigen und nur mit grossem Aufwand realisierbaren Durchführungen durch den VSI-Zylinder vermieden werden.

### 8.3 Schlanker Kubus

Figur 7 zeigt - als Beispiel für die Gruppe "schlanker Kubus" - die Prinzipskizze eines mit VSI gedämmten Durchlaufofens, der beispielsweise für das Curing des Binders von Mineralwolle, das Härten von Glas, das Weichlöten von SMD usw. geeignet sein könnte. Entsprechende Aufbauten könnten allenfalls auch bei der Produktion von völlig anderen Gütern, wie beispielsweise Keramiken oder bis hin zu Backwaren, zum Einsatz kommen.

Die VSI Dämmung ist in der Skizze als ein aus 4 Elementen bestehender, modularer Aufbau dargestellt, bei welchem sich die einzelnen VSI Module gegenseitig so überlappen, dass die an den Modulübergängen entstehenden Energieverluste minimiert sind.

Das Fördermittel, die Heizelemente und das mit Wärme zu behandelnde Gut sind vollständig umhüllt von VSI.

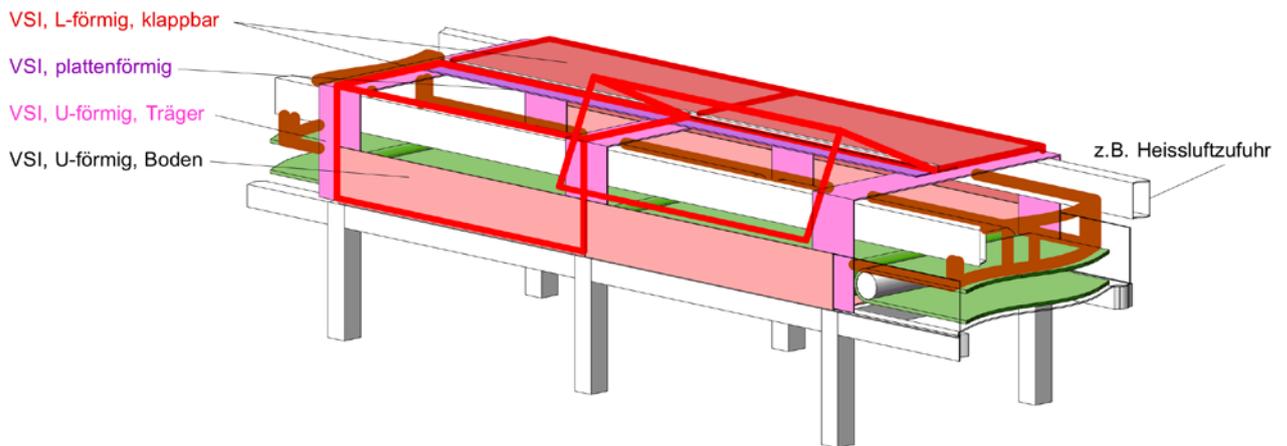


Fig.7 Prinzipskizze eines VSI-gedämmten Durchlauf-Ofens

Als ein Beispiel für die Wirksamkeit der VSI zeigt Tabelle 4 die, bereits aus den Tabellen 2 und 3 bekannte Energieeinsparung mittels VSI im Vergleich zu einem heute üblichen Durchlauf-Lötofen für SMD mit 50 mm Mineralwolle Dämmung.

	heute	VSI
Annahme Breite	1 m	1 m
Annahme Höhe	1 m	1 m
Annahme Länge	5 m	5 m
$\Delta T$	300 °C	300 °C
Isolation	0.05 m Steinwolle	0.02 m VSI
lambda@T-mittel	0.058 W/mK	0.0029 W/mK
Verlust-Leistung theor	5.97 kW	0.79 kW
Annahme Nutzung.	16 h, 350d	16 h, 350d
Verlust-Energie theor.	33.5 MWh/a	4.5 MWh/a
Einsparung		29 MWh/a
Industriestrom Preis ca.		0.1 CHF/kWh
Einsparung		2'900 CHF/a
Amortisation		5 a
Mehrkostenziel total		14'500 CHF
Mehrkostenziel / m <sup>2</sup> VSI		690 CHF/m <sup>2</sup>

Tab.1 Abschätzung der Verlust-Energie eines Durchlauf-Lötofens

Es zeigt sich, dass eine Einsparung an Verlustenergie in der Grössenordnung von 29 MWh/a denkbar ist. Bei einem Industrie-Strom Preis von ca. 0.1 CHF/kWh (ca. Durchschnitt Hoch-/Tieftarif heute) ergibt sich damit eine Einsparung von CHF 14'500 in 5 Jahren, oder auf die zu dämmende Fläche bezogen CHF 690/m<sup>2</sup>. Setzt man sich zum Ziel, dass die Mehrkosten für VSI gegenüber dem mit Mineralwolle gedämmten Ofen nicht höher sein sollen als dieser Betrag, ist dies mit sehr grosser Wahrscheinlichkeit leicht realisierbar.

#### 8.4 Kubus

Die Vielfalt nicht schlanker im wesentlichen kubischer Körper, für die eine thermische Isolation mit VSI allenfalls interessant sein könnte, ist riesig. Alle derartigen Körper bezüglich VSI in einer Gruppe zusammenfassen zu wollen ist sinnlos. Wir zeigen im Folgenden dennoch zwei Ansätze die - wie wir meinen - sinngemäss für eine grössere Anzahl unterschiedlicher Aufbauten angepasst werden könnten.

##### 8.4.1 Kleiner Kubus

Figur 8 zeigt - als Beispiel für einen "kleinen Kubus" - die Prinzipskizze eines mit VSI gedämmten kubischen Kühlschranks.

Die Wände und die Tür des Kühlschranks bestehen im Wesentlichen aus U-förmigen, doppelwandigen, evakuierten Körpern, deren totale Wandstärke an den Rändern halb so gross ist wie im grössten Teil des Körpers. Dies erlaubt es, die einzelnen Körper so übereinander zu schieben, dass die dadurch entstehenden Überlappungen die Wärmeverluste an den Übergängen verhindern. Auch die Türelemente sind so konzipiert, dass sie den Hauptkörper bei geschlossenem Zustand teilweise überlappen.

In den Überlappungszonen der U-förmigen Hauptkörper können - beispielsweise auf der nicht sichtbaren Rückseite - sich durch die Überlappung ergebende "Durchgangskanäle" vorgesehen sein, durch welchen notwendige Elektrizitäts- und Flüssigkeitsleitungen geführt werden können.

Auf diese Weise lässt sich mit beispielsweise 6 bis 8 unterschiedlichen Elementen ein modulares System definieren, das den Aufbau von VSI gedämmten Kühlschränken mit völlig unterschiedlichen Höhen und Nutzinhalt erlaubt. Damit können sehr grossen Stückzahlen und damit kleine Gestehungskosten für die einzelnen Module realisiert werden.

Es ist offensichtlich, dass bei entsprechender Anpassung des Konzepts auf diese Weise auch gewerbliche Kühltruhen oder industrielle "freezer" und ähnliche Geräte aufgebaut werden könnten.

Weiter ist es leicht vorstellbar, dass sehr ähnliche

Aufbauten beispielsweise für industrielle Klimaschränke und ähnliche Geräte realisierbar sind.

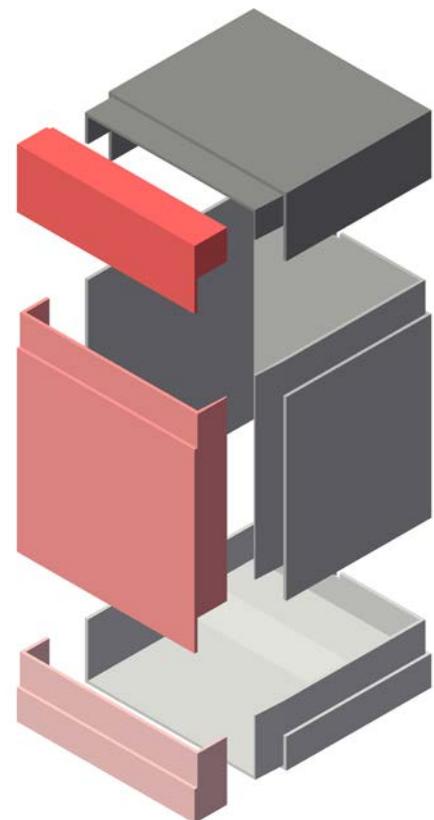


Fig. 8 Prinzipskizze eines mit VSI gedämmten Kühlschranks

#### 8.4.2 Grosser Kubus

In Fällen wie beispielsweise von grösseren Kühl- oder Klimaräumen oder bei sehr grossen Wärmetauschern und ähnlichem, kann es Sinn machen eine gesamte Anlage vollständig thermisch zu ummanteln.

Figur 9 zeigt - als Beispiel für einen "grossen Kubus" - die Prinzipskizze eines mit VSI gedämmten solchen ummantelten Raums.

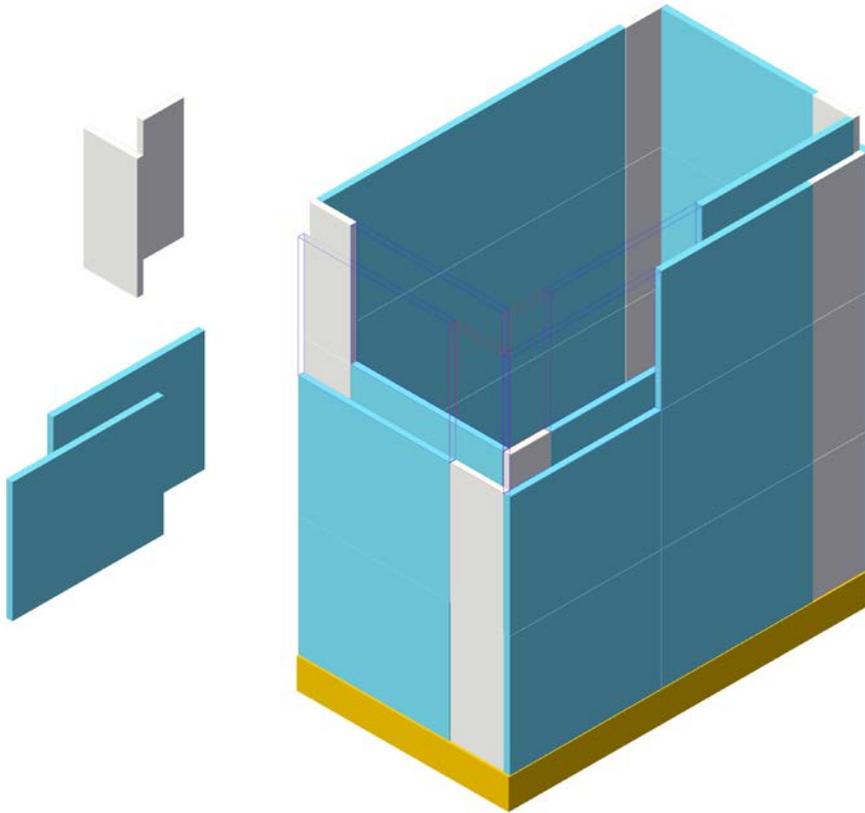


Fig. 9 Prinzipskizze eines modularen Aufbaus von VSI für grosse kubische Räume

Der gezeigte Aufbau kann beispielsweise aus lediglich drei unterschiedlichen Elementen bestehen, die modular zusammengefügt werden können. Zwei derartige Module sind auf der linken Seite von Figur 9 skizziert.

Das flächige Hauptmodul ist ein doppelwandiger Körper mit einer totalen Stärke, die so variiert, dass er von aussen wie zwei aufeinander gelegte ebene Platten aussieht. Der Hohlraum zwischen den Wänden ist durchgängig und evakuiert. Zwei solche Körper können so übereinander gelegt werden, dass sich ihre entsprechenden dünnen Stellen vollständig oder nur zum Teil überlagern. Auf diese Weise können durch die Kombination immer desselben Elementes ebene Wände mit völlig unterschiedlichen Abmessungen aufgebaut werden.

Zum Bau kubischer Körper braucht es noch ein Kantenmodul für die vertikalen und horizontalen Kanten, das im Beispiel von Figur 9 aus zwei doppelwandigen, gegeneinander verschobenen, senkrecht aufeinander stehenden ebenen Körpern besteht, die so verbunden sind, dass das innere Volumen durchgängig offen und evakuierbar ist.

Zusätzlich wird noch ein - nicht dargestelltes - Eckmodul benötigt, das auf entsprechende Art aufgebaut sein kann.

Die notwendige Durchführung von Leitungen kann so sichergestellt werden, dass die Module so ausgebildet sind, dass sich in den Überlappungszonen Durchführungskanäle ergeben.

In vielen Fällen kann man aber davon ausgehen, dass beliebig viele und beliebig grosse Leitungen durch ein, in Figur 9 gelb skizziertes, konventionell gedämmtes Bodenelement zugeführt werden können.

Eine Zugänglichkeit zum Innern des VSI gedämmten Raumes kann sichergestellt sein, indem die Verbindung zwischen den einzelnen ebenen Modulen so gestaltet ist, dass eine geeignete Modulgruppe als Ganzes mit einem Handgriff abnehmbar oder wie eine Türe aufklappbar ist.

## 9. Abschätzung der potenziellen Gesamtenergie-Einsparung

Aufgrund der grossen Anzahl von Anwendungen war es nicht möglich, für alle als sinnvoll für VSI bewerteten Prozesse vertrauenswürdige Zahlen über die Anzahl der gesamthaft in der Schweiz vorhandenen verschiedenen relevanten Anlagen, Maschinen oder Geräten zu finden.

Stattdessen haben wir einige möglichst repräsentative derartige Prozesse ausgewählt und anhand dieser die Grössenordnung der theoretisch vorhandenen Energiespar-Potenziale in der ganzen Schweiz abgeschätzt. In Tabelle 5 sind die entsprechenden Resultate zusammengestellt.

Anwendung	Einheiten CH geschätzt	Potenzial / Einheit	Verluste durch Verzweiger, Türen, usw.	Potenzial CH	Bemerkung
	Anzahl bzw. km	MWh/ (a,Einh.)		MWh/a	
Flachglas Floatbad	11	211		2'321	Basis für Anzahl: STAT-TAB CH
SMD-Öfen	425	29	10.00%	11'093	Basis für Anzahl: STAT-TAB CH
Haushalts-Kühlschränke	4'159'000	0.054	5.00%	213'357	Annahme: 1 pro Haushalt 2 pro Betrieb
Tiefkühltruhen usw. gewerblich	524'000	0.08	5.00%	39'824	EU-Statistik > umgerechnet auf Schweiz
Boiler elektrisch	2'380'000	0.19		452'200	
Boiler alle Arten	6'340'000	0.19		1'204'600	
Warmwasser Leitungen Gebäude [km]	44'300	38	20.00%	1'346'720	Annahme: 10 m/Haushalt 30 m/Betrieb
Fernwärme Leitungen [km]	1'000	130	5.00%	123'500	fernwärme-schweiz.ch
Prozesswärme Leitungen Chemie [km]	1'000	497	10.00%	447'300	Annahme 5 Werke mit je 200 km Leitung

Tab.5 Beispiele von Grössenordnungen der in der gesamten Schweiz theoretisch vorhandenen Energiespar-Potenziale durch Einsatz von VSI

Als erste - nicht erstaunliche - Erkenntnis verdeutlicht Tabelle 5, dass gesamthaft gesehen nicht unbedingt die Prozesse mit sehr grossen einzelnen Spar-Potenzialen die interessantesten für einen möglichen Einsatz von VSI sind, sondern diejenigen bei denen sich ein - allfällig relativ geringes - Spar-Potenzial mit einer sehr grossen Menge multipliziert. Helbling Technik AG hat dieser Tatsache bei seinen Bemühungen um die Entwicklung von Vakuumspalt Isolation (VSI) von vorneherein dadurch Rechnung getragen, dass man sich auf den Einsatz von VSI für massenhaft eingesetzte Haushaltsgeräte konzentriert hat. Natürlich steht man dabei vor der Herausforderung, dass sich der

Einsatz von VSI trotzdem für jedes einzelne Gerät rechnen muss. Dies sollte aber zumindest in allen den in Tabelle 3 als sinnvoll für VSI eingeschätzten Fällen erreichbar sein.

Eine zweite - ebenfalls nicht weiter erstaunliche - Erkenntnis ist, dass im Bereich Warmwasser in Gebäuden sehr viel Energie einsparbar ist. Hier summieren sich die Potenziale von Boilern und Leitungen auf ca. 2.5 Mio. MWh/a.

Die Werte für die Energiespar-Potenziale in Tabelle 5 und die Annahmen für deren Abschätzung sind den Tabellen 2 und 3 zu entnehmen. Die Schätzung der Anzahl Einheiten bzw. der vorhandenen Leitungslänge wurde in Einzelnen wie folgt durchgeführt.

Das schweizerische Bundesamt für Statistik stellt mit seiner interaktiven Statistiktabelle "STAT-TAB" (<http://www.pxweb.bfs.admin.ch>) ein ausgezeichnetes Werkzeug zur Abschätzung von Betriebszahlen zur Verfügung. Wir haben dies für die Fälle Flachglasherstellung (Tabelle 6) und SMD-Löten (Tabelle 7) genutzt:

Anzahl Betriebe 2008	Arbeitsstätten	
Herstellung von Flachglas	11	
Potenzial pro Floatbad	211	MWh/a
Potenzial total	2321	MWh/a

Tab. 6 Anzahl der Flachglas-Hersteller aus STAT-TAB und resultierendes Energiespar-Potenzial

Anzahl Betriebe 2008	Arbeitsstätten	Annahme Anzahl Lötöfen pro Betrieb	Lötöfen total	
Herstellung von bestückten Leiterplatten	103	2	206	
Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten und peripheren Geräten	83	0.5	41	
Herstellung von Geräten und Einrichtungen der Telekommunikationstechnik	119	0.5	59	
Herstellung von Geräten der Unterhaltungselektronik	69	0.5	34	
Herstellung von Mess-, Kontroll-, Navigations- u. ä. Instrumenten und Vorrichtungen	342	0.25	85	
Annahme Durchlauf-Lötöfen CH total			425	
Sparpotenzial pro Ofen			29	MWh/a
zusätzliche Verluste			10.00%	
Total CH			11'093	MWh/a

Tab. 7 Anzahl der möglichen Verwender von SMD-Lötöfen aus STAT-TAB und Abschätzung des resultierenden Energiespar-Potenzials

Für die Abschätzung des Energiespar-Potenzials durch Haushalts-Kühlschränke haben wir zunächst angenommen, der durchschnittliche schweizerische Kühlschrank entspräche einem 250 Liter A++

Kühlschrank ohne Kühlfach. Aus dieser Annahme ergibt sich das in Tabelle 3 und 5 ausgewiesene, durch Einsatz von VSI erreichbare Energiespar-Potenzial von 0.054 MWh pro Jahr und Kühlschrank. Für die Abschätzung der in der Schweiz vorhandenen Kühlschränke haben wir angenommen, jeder der 3'535'000 schweizerischen Haushalte (Bundesamt für Statistik 2011) habe einen Kühlschrank und jeder der ca. 312'000 schweizerischen Betriebe (Bundesamt für Statistik 2008) habe durchschnittlich deren 2.

Für die Abschätzung der Anzahl gewerblicher Tiefkühltruhen haben wir auf die Energie-Statistiken der EU ( [http://ec.europa.eu/energy/efficiency/studies/ecodesign\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/studies/ecodesign_en.htm) ) zurückgegriffen und die Anzahl der dort für 2012 ausgewiesenen Geräte (3'380'904) im Verhältnis  $3 \times 8 / 460 = 0.05$  (Schweiz 8 Mio. Einwohner, EU27 460 Mio. Einwohner, Schweiz durchschnittlich 3 mal soviel Geräte) auf die Schweiz zurückgerechnet.

Entsprechend sind wir für die Anzahl von Boilern vorgegangen, wobei wir hier von den gesondert ausgewiesenen Mengen für die BRD (2004: 52'832'000 Geräte total, 18'832'000 Geräte elektrisch) ausgegangen sind und diese zunächst mit einem Faktor 1.2 auf 2012 hochgerechnet und dann im Verhältnis 8/80 auf die Schweiz zurückgerechnet haben.

Für die totale Länge der Warmwasserleitungen in schweizerischen Gebäuden haben wir angenommen, pro Haushalt (Bundesamt für Statistik 2011: 3'535'000) seien durchschnittlich 10 m und pro Betrieb (Bundesamt für Statistik 2008: 312'000) 30 m Leitung vorhanden.

Die Leitungslänge des Fernwärmenetzes in der Schweiz haben wir aufgrund der Statistik in fernwaerme-schweiz.ch geschätzt. Die dort downloadbare ausführliche Statistik weist in Zahlen 870 km derartige Leitungen aus. Da aber für zahlreiche Orte, an welchen dort Fernwärmeleitungen ausgewiesen sind, keine Längenangaben vorhanden sind, haben wir die in der Berechnung verwendete Gesamtlänge auf 1000 km erhöht.

Die von uns verwendete gesamte Länge von Prozesswärme-Leitungen in schweizerischen Chemiewerken von 5x200 km haben wir aufgrund der mit Experten aus dieser Branche geführten Gespräche geschätzt.

## Bewertung und Ausblick

Zu Beginn der Arbeit war es - über unsere bisherigen Erfahrungen mit Vakuumpalt-Isolation (VSI) im Bereich von Haushaltsgeräten hinaus - notwendig, obere Temperaturgrenzen der heissen VSI-Wand für den möglichen Einsatz von VSI zu definieren. Wir haben dies überlegungsmässig begründet getan, mit der Definition der beiden Grenzwerte 400°C für den Einsatz von bekannten Bauelementen für VSI sowie 750°C für den Einsatz von VSI nach zusätzlichem grösserem Entwicklungsaufwand. Eine experimentelle Bestätigung dieser Grenzen steht aber noch aus.

Weiter haben wir Bewertungs-Kriterien definiert, mit welchen ein allfälliger Einsatz von VSI als "nicht sinnvoll" ausgeschlossen werden kann. Diese Kriterien sind in Kurzdarstellung:

1. Überschreiten der Temperaturgrenze von 400°C bzw. 750°C
2. Eignung der Prozesswand für VSI
3. Nicht ausgeschöpftes, wesentlich grösseres Energiespar-Potenzial vorhanden
4. Das Einspar-Potenzial durch VSI ist zu klein um VSI wirtschaftlich einzusetzen
5. Gleich gute Isolation mit konventionellen Mitteln erreichbar

Diese Kriterien haben sich im Verlauf der Arbeit als brauchbar und - nach unserem heutigen Stand des Wissens - auch als genügend erwiesen.

In der Folge haben wir mit einer ausführlichen Suche einige 100 industrielle Prozesse gefunden und in einem grossen Logik-Diagramm dargestellt, bei welchen Temperaturunterschiede zwischen 10°C und 2000°C zur Umgebung hin auftreten.

Mittels internen Diskussionen und ausführlichen Gesprächen mit Experten haben wir eine möglichst repräsentative Gruppe von knapp 70 dieser Prozesse als vielversprechend für VSI ausgewählt und matrixartig dargestellt. Diese Prozesse wurden ausführlich analysiert und einer Bewertung und Ausbeurteilung mit den geschilderten Kriterien unterzogen. Dazu haben wir mit analytischen Methoden rechnerisch folgende Werte abgeschätzt:

- wie hoch ist der Energieverlust durch die heute bestehende Isolation
- wie hoch ist das Energiespar-Potenzial durch Einsatz einer VSI
- welche Kosteneinsparung ergibt sich daraus (hierfür sind wir auf der Basis unserer Expertengespräche branchenabhängig von Energiekosten zwischen 0.05 - 0.1 CHF/kWh ausgegangen)
- wie hoch dürfen demnach die Mehrkosten für eine VSI maximal sein, damit sie in einer bestimmten Zeitspanne amortisiert werden kann
- wie dick müsste eine äquivalente Isolationsschicht (I-äq) aus konventionellem Material sein, damit sie gleich gut wie das VSI isoliert und ist diese Dicke "vernünftig".

Wir gehen davon aus, dass es mit diesem Vorgehen gelungen ist, anhand einer repräsentativen Auswahl von allenfalls relevanten Prozessen vernünftig begründet zu zeigen, dass, von der - fast erdrückenden - Vielfalt derartiger industrieller Prozesse, eine grosse Anzahl tatsächlich für den Einsatz von VSI geeignet sein kann.

Das Energiespar-Potenzial aller Prozesse für die ein Einsatz von VSI als sinnvoll bewertet wurde, ist für sich alleine gesehen gross genug um wirtschaftlich interessant zu sein. Anhand einiger weniger repräsentativer Beispiele haben wir gezeigt, dass dies im Sinne einer schweizweiten Energieeinsparung zum Teil grosse Bedeutung haben könnte.

Die Studie zeigt aber auch auf, dass ein Anteil von weit über 50% der einigen 100 von uns kurz betrachteten Prozesse nicht für einen sinnvollen Einsatz von VSI geeignet ist. Hierfür sind im überwiegenden Teil der Fälle die Kriterien 1, 2 und 5 verantwortlich, in einigen wenigen Fällen das Kriterium 4 und selten (und in Zukunft wohl immer seltener) das Kriterium 3.

Das als "nicht sinnvoll" Ausscheiden von Prozessen bzw. Anlagen ist in vielen Fällen auf den ersten Blick erstaunlich. Ein Beispiel hierfür ist eine denkbare VSI für den Kessel eines thermischen Kraftwerks. Unsere rechnerische Abschätzung hat ergeben, dass bei dem von uns als Beispiel gewählten

Kessel (10x10x20 m) ein Einspar-Potenzial von ca. 70 MWh/a vorhanden sein könnte, wenn die herkömmliche Isolation (300 mm Steinwolle) durch VSI ersetzt würde. Wenn man zum Vergleich annimmt, dass der Standby-Betrieb eines Computers durchschnittlich ca. 2.5 W bzw. ca. 22 kWh/a benötigt, entspricht das Spar-Potenzial des Kraftwerk-Kessels mehr als 3000 Computern die bei Nichtgebrauch konsequent vollständig ausgeschaltet werden. Trotzdem ist klar, warum die Experten mit denen wir uns über den Kessel unterhalten haben, zum Schluss kommen, ein Einsatz von VSI sei nicht sinnvoll. Die erwähnten 70 MWh/a entsprechen einer minimalen Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades eines entsprechenden Kraftwerks von weniger als einem Promille. Um dies zu erreichen gibt es andere Möglichkeiten, bei welchen nicht in eine neue und deshalb mit - aus unserer Sicht allerdings abschätzbaren - Risiken behaftete Technologie investiert werden muss.

Eine Definition von wenigen Gruppen in welche die Grosszahl der als " für VSI sinnvoll" bewerteten Prozesse bezüglich des Aufbaus der VSI eingeteilt werden können, ist im allgemeinen Sinne nicht gelungen. Immerhin haben wir 4 geometrisch definierte Gruppen identifizieren können, die jeweils eine ansehnliche Anzahl von Anlagen für verschiedene Prozesse beinhalten. Bezüglich dieser Gruppen wären jeweils untereinander sehr ähnliche VSI-Aufbauten möglich und Beispiele hierfür konnten von uns aufgezeigt werden.

Es muss jedoch betont werden, dass die gezeigten VSI-Aufbauprinzipien mindestens teilweise davon ausgehen, dass die gesamte Prozess-Anlage entsprechend angepasst ist. Mit anderen Worten heisst dies, dass es uns in der Regel unmöglich - oder zumindest aus Kostengründen unsinnig - erscheint, bei bestehenden Aufbauten einfach die konventionelle thermische Isolation durch VSI zu ersetzen, ohne entsprechende - oftmals relativ kleine, oft aber auch grosse - Anpassungen an der bestehenden "Prozesswand" zu machen.

Es ist klar, dies stellt ein prinzipielles Hindernis zur breiten Einführung von VSI bei industriellen Anlagen dar. Einerseits scheint es oftmals schwierig bis unmöglich, solche Anpassungen mit vernünftigem Aufwand durchzuführen, was wir bei ursprünglicher Auswahl der Prozesse von Tabelle 2 und der dortigen Bewertung der Prozesse in "VSI denkbar" und VSI nicht denkbar" auch schon gebührend berücksichtigt haben. Andererseits wird es in vielen Fällen an der Bereitschaft fehlen, den notwendigen konstruktiven Konstruktionszyklus zu durchlaufen und dies oftmals vermutlich aus uns jetzt nicht bekannten vernünftigen Gründen.

Als Ausblick kann festgehalten werden, dass zur Realisierung der ohne Zweifel vorhandenen Energiespar-Potenziale für jeden Einzelfall noch ausführliche Entwicklungsarbeit geleistet werden muss.

Wir halten es für sehr sinnvoll, dies anhand einiger konkreter Ausarbeitungen in Zusammenarbeit mit interessierten Industriefirmen zu tun.