



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht** 30. Juni 2015

---

# **Anwendung von Vakuum Spalt Isolation (VSI) für Warmwasserrohre**

---

**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)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Michael Moser  
**BFE-Programmleiter:** Roland Brüniger  
**BFE-Vertragsnummer:** SI/500552-06

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

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Ausgangslage	6
1.1 Stand der Technik	6
1.1.1 Trinkwarmwasser- und Heizungsrohre	6
1.1.1.1 Norm für die thermische Isolation (SIA 385/1, 2011)	6
1.1.1.2 Marktsituation	7
1.1.2 Lösungen in verwandten Anwendungen wie Fernwärme-, Öl- und Gastransport	9
1.1.2.1 Isolierte Rohre mit konventioneller Isolation	9
1.1.2.2 Stahlmantelrohre mit Feinvakuum	9
1.1.2.3 Rohre mit Hochvakuum	10
1.2 Anforderungsprofil VSI-Rohre für Trinkwarmwasser	11
1.2.1 Prinzipielle Anforderungen	11
1.2.2 Sollwert der Wärmedämmung und Amortisationszeit	12
1.2.3 Anforderungen an die Langzeit-Stabilität der Wärmedämmung	13
1.2.4 Anforderungen an die Robustheit	14
1.2.5 Anforderungen an den Installationsaufwand	14
1.2.6 Tabellarische Zusammenfassung	14
2 Neuinstallation von VSI-Leitungen	15
2.1 Konstruktiver Aufbau von VSI-Rohren	15
2.1.1 Gesamtaufbau	15
2.1.1.1 Möglichkeit 1: Wasserrohr ist VSI-Innenrohr, Vakuum ist durchgehend	15
2.1.1.2 Möglichkeit 2: Wasserrohr ist VSI-Innenrohr, Vakuum ist segmentiert, 2 Fälle	16
2.1.1.3 Möglichkeit 3: Wasserrohr ist unabhängig, Isolation mit VSI-Hüllrohren	18
2.1.2 Materialien	18
2.1.2.1 Mögliche Materialien für VSI-Rohre mit Wasserrohr = VSI-Innenrohr	18
2.1.2.2 Evaluation Ausgasen	19
2.1.2.3 Evaluation Gasdichtigkeit	23
2.1.2.4 Strahlungs-Emissionsgrade	24
2.1.3 Aufbau der Rohrhohlwände	25
2.1.3.1 Abstützungen Innen-Aussenrohr	25
2.1.3.2 Wandstärken	26
2.1.3.3 Aufhängung gesamtes VSI-Rohr	27
2.1.3.4 Dilatation	27
2.1.3.5 Endverschluss	28
2.1.4 Übergang zum nächsten Rohr mit minimiertem Wärmeverlust	29
2.1.5 Verbindung von VSI-Rohr zu VSI-Rohr	32
2.1.6 Ablängbare VSI-Rohre	33
2.1.7 Strahlungsminderung	35
2.1.8 Getter	35
2.1.9 Absaugöffnungen	37
2.1.10 Pump-Leistung und Zeit	38
2.1.11 Aufbau von VSI-Rohrkrümmern	39
2.1.12 Aufbau von VSI-Rohrabzweigern	39
2.2 Experimentelle Erprobung verschiedener Bauelemente	41
2.2.1 Rohre	41
2.2.2 Stützkörper	41
2.2.3 Strahlungsminderung	41
2.2.4 VSI-Fittings	41
2.3 Rechnerische Evaluation von VSI-Leitungsvarianten	43
2.3.1 vakuumtechnische Berechnungen	43
2.3.2 thermische Werte und Berechnungen	43
2.3.3 mechanische Werte und Berechnungen	43
2.4 Messtechnische Evaluation einer VSI-Leitungsvariante	43
3 VSI-Retrofit	46
3.1 Retrofit mit durchgehendem Vakuumspalt, ohne Aufschneiden der vorhanden Rohre	46
3.1.1 Zusätzliche Anforderungen	46
3.1.2 Aufbau Möglichkeiten	46
3.1.2.1 Retrofit-Aussenrohr	46
3.1.2.2 vorhandene Leitung vakuumtauglich machen	47

3.1.2.3	Erstes Resultat und Konsequenz daraus	48
3.2	Retrofit mit über die alten Rohre geschobenen VSI-Hüllrohren	49
3.2.1	prinzipielle Überlegungen	49
3.2.2	möglicher Aufbau eines Hüllrohrs	49
3.2.3	rechnerische Abschätzung des Wärmedurchgangskoeffizienten Ur-Hüllrohr	51
4	Kosten und Potenzial VSI-Leitungen	52
4.1	mögliche Fertigung von offenen VSI Rohren und Fertigungskosten	52
4.2	Kostenschätzungen für neu installierte VSI-Leitungen mit durchgehendem Vakuumspalt	52
4.2.1	Abschätzung der Kosten, der zur Herstellung von VSI-Rohren nötigen Materialien	52
4.2.2	Abschätzung der Kosten der VSI-Rohre mit durchgehendem Vakuumspalt	53
4.2.3	Abschätzung der Installationskosten	53
4.2.4	Abschätzung der Kosten für die in Betrieb genommene VSI-Leitung	55
4.2.5	Abschätzung der Kosten der normgerecht isolierten, konventionellen Leitung	55
4.2.6	Vergleich und Potenziale	55
4.3	Kostenschätzung und Potenziale für einen Retrofit mit VSI-Hüllrohren	57
5	Bewertung und Ausblick	58
5.1	Bewertung	58
5.2	Ausblick	58

## Zusammenfassung

Eine deutlich verbesserte thermische Isolation von Haus- und Industrie-Warmwasserleitungen weist ein sehr grosses Energie-Einsparpotenzial auf. Im Verlauf der Arbeit wurde nachgewiesen, dass im Vergleich mit konventionell gemäss SIA-Norm gedämmten Leitungen, mittels Vakuum Spalt Isolation (VSI) zwischen 75% und 90% der Energieverluste eingespart werden können. Dies geschah anhand der Erarbeitung von Aufbauprinzipien neuer erstellter VSI-Leitungen sowie aus davon abgeleiteten Berechnungen und Messungen an Funktionsmustern. Damit ist klar, dass neue VSI-Leitungen nicht nur technisch machbar sind, sondern dass sie so hohe Energiekosten-Einsparung ermöglichen und so kostengünstig erstellt werden können, dass sich ihre Installation innerhalb weniger Jahre rechnet. Von hohem Interesse ist die Erkenntnis, dass neue VSI-Leitungen vor Ort ohne Vakuum aufgebaut und nachträglich evakuiert werden können.

Weitere Überlegungen weisen darauf hin, dass Retrofit VSI-Leitungen, d.h. nachträglich mit VSI gedämmte alte Warmwasser-Leitungen, machbar sind. Weil aber der Vergleich VSI-Leitung zu konventionell gedämmte Leitung im Falle von neu installierten Leitungen deutlicher zu Gunsten der VSI-Leitung ausfällt ist diese Lösung zu favorisieren.

## Abstract

By considerably improving the thermal isolation of hot water pipes of homes and industrial buildings, a very large amount of energy can be saved. In this document, it is shown that with the thermal isolation of hot water pipes by vacuum slit technology (VSI) 75% to 90% of the lost energy could be saved, compared to conventionally isolated pipes (according SIA norm). This fact has been verified by building functional prototypes of VSI hot water pipes and compared the measurements with thermal models and calculations of it. Because of that, it is obvious that not only VSI isolated hot water pipes are technically feasible, but also that it's costs are amortized within a few years because of its high energy saving rates. Highly interesting is the fact that it is possible to first install the VSI pipes, and evacuate the air out of it later.

Further consideration indicate that it is possible to retrofit existing pipes with a VSI system. But the case where the VSI system is installed together with the warm water pipes is much more convenient, that's why this approach is favored.

## Sommaire

On peut gagner beaucoup d'énergie en améliorant fortement l'isolation thermique des conduits d'eau des maisons et des bâtiments industriel . Dans ce document, on montre qu'avec des conduits d'eau qui sont isolé avec une fente de vacuum (en allemand : Vakuum Spalt Isolation [VSI]), les pertes d'énergie se réduisent de 75% à 90%, comparé par des conduits d'eau qui sont isolé d'une manière conventionnelle après la norme SIA. Cette circonstance avait été prouvée par des calculassions et des modélisations thermiques, qui s'avaient été vérifiés par des analyses des prototypes fonctionnels des conduits d'eau VSI. A cause de cela, il est claire que pas seulement les conduits d'eau sont techniquement faisable, mais aussi que le taux d'énergie qu'on peut gagner avec cette technique est très haute et pour ça l'amortissement des coûts est possible après quelques années. Un point intéressant est le fait qu'on peut d'abord installer les conduits d'eau VSI, et l'évacuation d'air est fait plus tard.

Des considération indique qu'il est possible de compléter une installation des conduits d'eau existant avec un système VSI. Mais le cas où le système VSI est installé ensemble avec les conduits d'eau est beaucoup plus favorable, c'est pour ça qu'on favorise cette approche.

# 1 Ausgangslage

## 1.1 Stand der Technik

### 1.1.1 Trinkwarmwasser- und Heizungsrohre

#### 1.1.1.1 Norm für die thermische Isolation (SIA 385/1, 2011)

Die Norm bezieht sich auf alle Verteilungsrohre von Warmwasser in Gebäuden inklusive Heizungsrohre. Schwerpunkt ist die Verteilung von Trinkwarmwasser. Die Skizze eines entsprechenden Verteilsystems findet sich in der Norm und ist in Fig. 1 dargestellt.

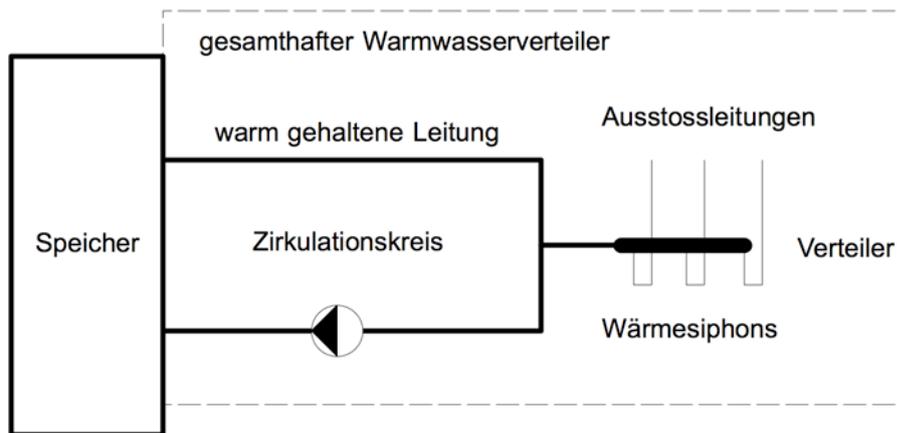


Fig. 1 Warmwasserverteilsystem (SIA 385/1)

Aufgrund des Legionellen Problems hält die Norm fest, dass Trinkwarmwasserrohre lediglich in den Bereichen stark thermisch isoliert werden dürfen, in denen das Wasser über mindestens 50°C warm gehalten wird. Dies ist entweder in Speichern mit Heizung oder in Zirkulationsleitungen möglich.

Alle anderen Systemkomponenten, also insbesondere auch die Ausstossleitungen, dürfen nur so stark isoliert werden, dass der Leitungsinhalt nur für 3 bis 6 Stunden bei einer Temperatur zwischen 50°C und 25°C verweilt, was aus Sicht der Legionellen-Prophylaxe unbedenklich ist. Diese Forderung ist gemäss Norm dann erfüllt, wenn die Wasserleitung mit einer Dämmstärke von lediglich 6 bis 8 mm aus beispielsweise Mineralwolle umgeben ist. Aus Sicht der zu entwickelnden hocheffizienten VSI Wärmedämmung sind Ausstossleitungen daher kein Thema.

Bezüglich der geforderten Dämmstärken für warm gehaltene Leitungen stellt die Norm SIA 385/1 die Information in Form einer Tabelle (s. Tab. 1) dar, in welcher die minimal erforderlichen Dämmstärken der heute üblichen Dämmstoffe in Funktion des äusseren Rohrdurchmessers  $D_a$  und des Wärmeleitwerts  $\lambda$  des Dämmstoffes bei 40°C dargestellt sind.

Rohr-Ø ausseren $D_a$ [mm]	15	18	22	28	35	42	54	64	76.1	88.9	108
$\lambda$ [W/mK]											
0.01	5	6	7	8	9	11	12	14	16	17	20
0.015	10	11	12	14	16	19	21	24	26	29	33
0.02	17	18	20	23	26	29	32	36	39	43	48
0.025	26	28	31	34	38	42	46	50	55	60	66
0.03	40	42	45	49	53	58	63	68	74	80	88
0.035	58	60	63	68	72	78	85	90	97	104	113
0.04	60	72	88	92	97	103	111	117	125	133	143
0.045	60	72	88	112	129	135	143	150	159	167	179
0.05	60	72	88	112	140	168	183	190	199	208	221

Tab. 1 nach SIA 385/1 Mindestdämmstärken für Rohrleitungen in [mm]

Diese Tabelle ist für den Praktiker sehr verständlich und deshalb für den täglichen Gebrauch gut geeignet. Für den Zweck der vorliegenden Arbeit, der Entwicklung einer neuen Art der Wärmedämmung, liefert sie aber keine brauchbaren Vergleichswerte.

Die genannten Werte aus SIA 385/1 wurden deshalb in die entsprechenden, auf den Laufmeter Rohr bezogenen, Wärmedurchgangs-Koeffizienten  $U_r$  [W/Lfm\*K] umgerechnet und in Tab. 2 dargestellt.

Rohr-Ø aus- sen $D_a$ [mm]	15	18	22	28	35	42	54	64	76.1	88.9	108
$\lambda$ [W/mK]											
0.01	0.123	0.123	0.128	0.139	0.151	0.149	0.171	0.173	0.179	0.194	0.199
0.015	0.111	0.118	0.128	0.136	0.145	0.146	0.164	0.168	0.181	0.188	0.198
0.02	0.106	0.114	0.121	0.129	0.138	0.145	0.161	0.167	0.178	0.186	0.198
0.025	0.105	0.111	0.117	0.127	0.136	0.143	0.158	0.167	0.176	0.184	0.197
0.03	0.102	0.109	0.116	0.125	0.135	0.142	0.157	0.165	0.175	0.183	0.195
0.035	0.101	0.108	0.115	0.124	0.135	0.142	0.155	0.164	0.174	0.182	0.195
0.04	0.114	0.114	0.114	0.124	0.134	0.142	0.154	0.163	0.173	0.182	0.194
0.045	0.129	0.129	0.129	0.129	0.133	0.141	0.154	0.163	0.172	0.181	0.193
0.05	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.153	0.162	0.172	0.181	0.193
<b>mittel</b>	<b>0.115</b>	<b>0.119</b>	<b>0.123</b>	<b>0.131</b>	<b>0.139</b>	<b>0.144</b>	<b>0.158</b>	<b>0.166</b>	<b>0.175</b>	<b>0.184</b>	<b>0.196</b>

Tab. 2 nach SIA 385/1 zulässige Wärmedurchgangs-Koeffizienten  $U_r$  [W/Lfm\*K]

Es ist erkenntlich, dass die so berechneten zulässigen  $U_r$ , für einen gegebenen Rohrdurchmesser, stark abhängig vom Wärmeleitwert des verwendeten Dämmstoffes sind, was eigentlich inkonsequent ist. Wir benötigen aber einen konsequenten Vergleichswert für die zu entwickelnde Wärmedämmung mit Vakuum Spalt Isolation (VSI). Wir haben uns entschlossen uns deshalb für Vergleichszwecke immer auf den in der untersten Zeile von Tab. 2 sichtbaren Mittelwert zu beziehen. Diese Werte sind in Fig. 2 dargestellt und lassen sich mit sehr guter Näherung mittels des folgenden Polynoms be- rechnen:

$$(1) \quad U_r = -4 \cdot 10^{-6} \cdot D_a^2 + 0.00134 \cdot D_a + 0.096$$

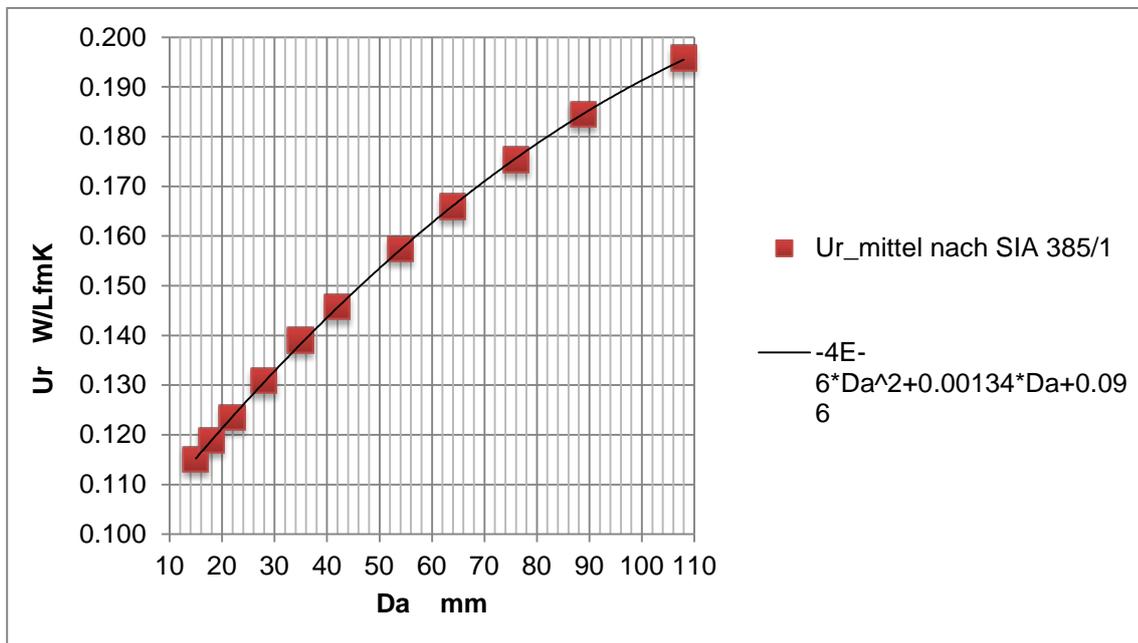


Fig. 2 zulässige  $U_r$ -mittel, berechnet aus SIA 385/1

### 1.1.1.2 Marktsituation

Weil Trinkwarmwasserrohre während des ganzen Jahres annähernd ununterbrochen mit einem Temperaturunterschied zur Umgebung von mindestens 40°C betrieben werden, sind sie für die Entwicklung einer wesentlich verbesserten thermischen Isolation massgebend.

Wir beschränken die folgende Betrachtung handelsüblicher Rohre daher auf Trinkwasserrohre.

Am Markt angeboten wird eine Vielzahl von Warmwasserrohren aus unterschiedlichen Materialien. Eine Auswahl davon findet sich in Tab. 3.

Um eine Basis für den späteren Vergleich mit einem VSI-Rohr zu ermöglichen sind in Tab. 3 die relevanten Werte unterschiedlicher Materialien am Beispiel Rohr-Nennweite 25 dargestellt. Im Einzelnen sind dies die normgerechten, bzw. die am Markt erhältlichen Dimensionen und das daraus resultierende Gewicht pro Meter Rohrlänge. Die in der nächsten Spalte aufgeführten Preise sind den am Internet einsehbaren Tabellen verschiedener Grosshändler bzw. den Angaben der Isolations-Hersteller entnommen und deshalb nur als Vergleichswerte aufzufassen.

Rohre								
Material	Erklärung	Øi / Øa	Ge- wicht	ca. Preis	ca. graue Energie		eco-devis 426	Öko. Bauen (køb)
		mm	kg / m	CHF/ m	MJ/ m	kWh/ m	interessant	empfohlen
Kupfer	primär	25 / 28	1.11	28.5	64.5	17.9		2. Priorität (pH > 7.2)
Stahl ver- zinkt	37% Re- cyclat	25 / 28	0.98	6.6	36.3	10.1		2. Priorität (pH > 7.2)
Edelstahl	37% Re- cyclat	25 / 28	0.99	11.5	57.2	15.9	ja (vertikal Leitungen)	2. Priorität
PE-X	vernetztes Poly- ethylen	25 / 32	0.301	8.7	25.9	7.2	ja (horizontal Leitungen)	1. Priorität
PE-Al Ver- bundrohre	ein Bei- spiel	25 / 30	0.223	12	49.0	13.6	ja (vertikal Leitungen)	1. Priorität
PP	Poly- propylen	26.2/32	0.259	8.6	21.2	5.9		
PB	Polybuten	25/29.6	0.165	8.7	27.0	7.5	ja (horizontal Leitungen)	
PVC C	Poly- vinylchlorid	27.2/32	0.38	7.9	25.5	7.1		
ABS	Acrylnitril- Butadien- Styrol	27.8/32	0.21	9.6	22.3	6.2	ja (horizontal Leitungen)	
Rohr- Isolation								
Material	Norm- Dämm- stärke mm	kg/m3						
Steinwolle	50 (λ=0.03)	28/128	40	11.5	9.8	2.7		1. Priorität
Glaswolle	50	28/128	30	10.9	16.9	4.7		1. Priorität
PIR	40	28/108	30	12.4	25.6	7.1		2. Priorität
isoliertes Rohr								
Material								
Edelstahl +Steinw		25/128		23	67	18.6		
PE-X +Steinw.		25/128		20	43	12		

Tab. 3 relevante Werte von Rohren und Dämmungen am Beispiel Nennweite DN25

Die Werte MJ/m und kWh/m wurden mittels einer vom Internet heruntergeladenen Excel Tabelle „Ökologische Baustoffliste“ der EMPA bzw. der entsprechenden Liste „Ökobilanzdaten im Baubereich“ von KBOB/eco-bau/IPB 2009 berechnet. Weiter wurden die Empfehlungen aus dem eco-devis 426 und aus dem Dokument „Ökologisch Bauen“ der Koordinationsgruppe Ökologisch Bauen (kÖb) in Tab. 3 aufgenommen.

Die für die thermische Isolation von Rohren angebotenen Materialien umfassen prinzipiell das gesamte Spektrum der am Markt angebotenen Isolationsmaterialien für beispielsweise Hauswände. Wir schränken uns auf zwei Arten ein: faserige Dämmstoffe und Schäume, die pro Art ähnliche graue Energien und Preise zeigen. Für die Fasern stehen die sehr verbreiteten Mineralwolle Stein- bzw. Glaswolle, für die Schäume der thermisch beste PUR bzw. PIR. Diese Dämmstoffe finden sich ebenfalls in Tab. 3.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass von der EMPA im Auftrag des Bundesamtes für Energie eine Vorstudie bezüglich des möglichen Einsatzes von VIP durchgeführt wurde: *"Hochisolationsleitungen, Schlussbericht Vorstudie, 2001"*. Die Resultate der Studie scheinen aber zu keinem marktfähigen Ansatz geführt zu haben.

Angeboten werden bereits isolierte Rohre, deren Dämmstärken aber in der Regel weit unterhalb der von der Norm SIA 385/1 geforderten liegen. Wir betrachten deshalb nur am Markt angebotene Rohr-Dämmschalen.

Die Auswertung von Tab. 3 ergibt, dass unter Berücksichtigung der beiden "Öko-Kriterien" nur die 3 Rohrarten PE-X, Edelstahl und PE-Al-Verbundrohr für hochwertige Lösungen übrig bleiben. Da die beiden letzteren in jeder Hinsicht sehr ähnliche Werte zeigen, haben wir uns entschlossen die gelb markierten Rohre bzw. Isolationsmaterialien als Basis für den späteren Vergleich mit VSI-Rohren heranzuziehen. Von den Dämmmaterialien beschränken wir uns für diesen Zweck auf Steinwolle, das Material mit der kleinsten grauen Energie.

### 1.1.2 Lösungen in verwandten Anwendungen wie Fernwärme-, Öl- und Gastransport

#### 1.1.2.1 Isolierte Rohre mit konventioneller Isolation

Für Fernwärmeleitungen werden von zahlreichen Herstellern vorisolierte Rohre angeboten. Ein typisches Beispiel sind Rohre unterschiedlicher Nennweite aus PE-Xa mit einer Dämmung aus PUR Schaum und einem Schutzmantel aus LLD-PE. Bei beispielsweise einer Nennweite von 25 mm hat ein solches Rohr eine Dämmstärke von lediglich ca. 20 mm und wird im Grosshandel zu einem Preis von ca. CHF 59.00 pro Meter angeboten. Damit sind derartige Rohre für Fernwärmeleitungen vermutlich marktgerecht, für Haus-Warmwasserleitungen sind sie aber viel zu teuer und erfüllen zudem SIA 385 bei weitem nicht.

Als bestmögliche Lösung ohne Einsatz von Vakuum werden am Markt flexibel um das Rohr legbare Panels angeboten, die im Wesentlichen aus VIP-Kernmaterial (pyrogene Kieselsäure) bestehen und bei Temperaturen bis einigen 100°C Wärmeleitwerte von  $< 0.03$  W/mK und bei 65°C ca. von 0.018 W/mK aufweisen. Dies ist für Hochtemperaturanwendungen von grossem Interesse. Für unsern Fall ist diese teure Art der Isolation aber nicht wesentlich besser als eine Isolation mit PU-Schaum und deshalb nicht von Interesse.

#### 1.1.2.2 Stahlmantelrohre mit Feinvakuum

Für Fernwärme, für den Transport von heissem Öl (Viskosität) bzw. Wasserdampf und für den Flüssiggas Transport sind seit Jahrzehnten die sogenannten Stahlmantelrohre im Einsatz. Ein solches Rohr besteht im Wesentlichen aus zwei konzentrischen Stahlrohren zwischen welchen – nach Verlegung – ein Vakuum von ca. 1 bis 0.1 hPa (mbar) erzeugt wird. Dieser Unterdruck genügt nicht um die Wärmeleitfähigkeit (ca. 0.025 W/mK) der Restluft zu beeinflussen, sondern dient dazu, die bei Normaldruck zwischen den Rohren stattfindende natürliche Konvektion der Luft zu unterbinden. Damit herrscht die Wärmeleitfähigkeit von stehender Luft und nicht diejenige von Luft mit Konvektion, welche Wert von 0.1 bis 0.3 W/mK annimmt.

Damit der Wärmetransport zwischen den beiden Rohren in der genannten Grössenordnung bleibt, muss die Wärmestrahlung unterbunden werden. Dies geschieht bei Stahlmantelrohren in der Regel mittels einer grossen Anzahl (mehr als 10 Schichten) von thermisch relativ stark gekoppelten reflektierenden Folien. Als Folienmaterial kommt u.a. beidseitig mit Aluminium bedampftes PET oder Aluminiumfolie zum Einsatz. Als Folienträger und Zwischenlage zwischen den Folien wird beispielsweise PP-Flies oder Micro Fibre Paper verwendet.

Selbstverständlich muss der Abstand zwischen innerem und äusserem Rohr durch entsprechende Stützkörper gewährleistet sein, die in den unterschiedlichsten Ausführungen existieren.

Zusätzlich wird zur langzeitigen Erhaltung des Vakuums einer der wohlbekanntesten Getter eingesetzt. Ein Getter ist ein Material wie beispielsweise Zeolithe und bestimmte Metalloxyde, das in der Lage ist Gase wie beispielsweise H<sub>2</sub>O-Dampf, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> usw. chemisch oder physikalisch zu binden und in diesem Sinne wie eine ständig arbeitende Vakuumpumpe wirkt, welche den Vakuum-Unterdruck auf dem gewünschten Niveau hält.

Für die Entwicklung der von uns angestrebten VSI-Rohre für Haus-Warmwasserleitungen sind Stahlmantelrohre nur in dem Sinne interessant, dass sie im Prinzip sehr ähnlich aufgebaut sind, wie dies die angestrebten VSI-Rohre sein müssen und dass deshalb gewisse Rückschlüsse auf Materialien und Ausführungen möglich sind.

### 1.1.2.3 Rohre mit Hochvakuum

Für den Transport von heissem Öl (Viskosität) bzw. Wasserdampf und für den Flüssiggas Transport sind seit Jahrzehnten auch VSI-Rohre, d.h. Rohre mit Vakuum Spalt Isolation im Einsatz, bei welchen dauerhaft ein Unterdruck von  $< 5 \cdot 10^{-4}$  hPa (=mbar) aufrechterhalten wird.

Damit der Wärmetransport zwischen den beiden Rohren in der gewünschten Grössenordnung bleibt, muss die Wärmestrahlung unterbunden werden. Dies geschieht mittels einer grossen Anzahl (mehr als 10 Schichten) von thermisch relativ stark gekoppelten reflektierenden Folien. Als Folienmaterial kommt u.a. beidseitig mit Aluminium bedampftes PET oder Aluminiumfolie zum Einsatz. Als Folienträger und Zwischenlage zwischen den Folien wird beispielsweise PP-Flies oder Micro Fibre Paper verwendet.

Selbstverständlich muss der Abstand zwischen innerem und äusserem Rohr durch entsprechende Stützkörper gewährleistet sein, die in den unterschiedlichsten Ausführungen existieren.

Zusätzlich wird zur langzeitigen Erhaltung des Vakuums einer der wohlbekanntesten Getter eingesetzt.

Am Markt werden derartige Rohre von zahlreichen Herstellern (uns bekannt sind ca. 20) unter dem Namen VIP (vacuum insulated piping) oder VIT (vacuum insulated tubing) oder SIVL (super insulated vacuum line) vertrieben. Wir bleiben beim Ausdruck „VSI-Rohre“.

Laut Aussagen der Hersteller sind die durch den Einsatz von VSI-Rohren erreichbaren Einsparungen riesig und dies besonders im Bereich des Transport von Flüssig-Erdgas (LNG: liquefied natural gas).

Wir zitieren einen der Hersteller, der laut eigener Aussage viele 100 km derartige Rohre verlegt hat: *"Based on a "typical" LNG terminal with 2 km transfer pipes, ... and assuming an LNG product value of \$500 per ton, the thermal efficiency savings through installing VIP (vacuum insulated piping) versus cellular glass or polyisocyanurate MIP will be at least \$6.8 million per annum."*

Dies bedeutet, dass in diesem Anwendungsfeld die Mehrkosten von VSI gegenüber konventionellen Dämmstoffen fast beliebig hoch sein dürfen. Entsprechend aufwendig dürfen die VSI-Rohre deshalb sein und sind es auch. Dies ist ein erster Grund, warum die Bauweisen dieser Rohre nicht einfach auf Trinkwarmwasserrohre, übertragen werden können. Die Mehrkosten der Trinkwarmwasser VSI-Rohre müssen sehr viel geringer sein.

Ein zweiter Unterschied zu unserer Aufgabenstellung ist die Tatsache, dass bei Hausinstallationen die Länge eines grossen Prozentsatzes der Rohre vor Ort, oder wenigstens vom Installateur in seiner Werkstatt, angepasst werden können muss, während bei LNG-Installationen alle Rohre werkseitig vorbereitet werden können. Dies beeinflusst erstens die Konzepte mit welchen die Übergänge von Rohrstück zu Rohrstück angegangen werden müssen und zweitens ist eine Lösung anzustreben, welche die Längenanpassung eines Vakuum-Rohres vor Ort erlaubt.

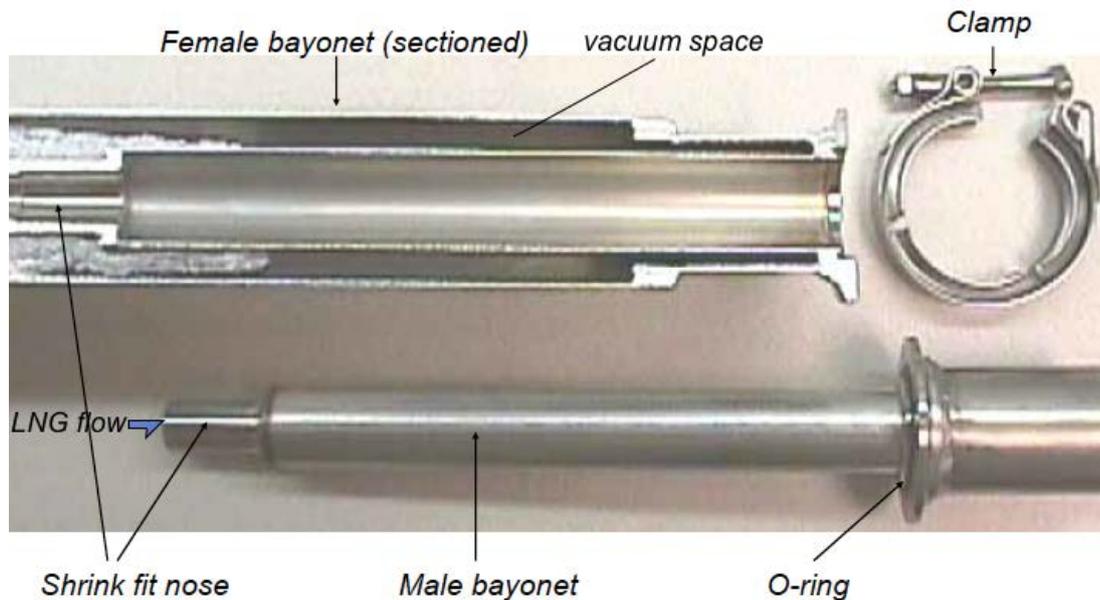


Fig. 3 Beispiel der Rohr Verbindung einer am Markt erhältlichen VSI-Leitung für LNG Transport

Trotz dieser massgeblichen Unterschiede bestätigt die langjährige Existenz von VSI-Rohren im Bereich von heissem Öl (Viskosität) bzw. Wasserdampf und für den Flüssiggas Transport zunächst einmal, dass VSI-Rohre, welche den notwendigen tiefen Unterdruck über Jahrzehnte aufrecht erhalten, technisch machbar sind. Zusätzlich erlaubt das Studium der bei diesen bekannten Rohren verwendeten Detail-Lösungen die Ableitung neuer, kostengünstiger Ansätze für unsere Problematik. In den Grundzügen sind die diskutierten Hochvakuum VSI-Rohre identisch aufgebaut, wie die oben beschriebenen Stahlmantelrohre. Die Unterschiede leiten sich aus der Notwendigkeit ab, dauerhaft einen wesentlich tieferen Unterdruck ( $< 5 \cdot 10^{-4}$  mbar statt 1 mbar) aufrecht zu erhalten. Dies erfordert, des Ausgasens wegen, andere Materialien und bei allen Verbindungen oder Ventilen deutlich tiefere Leckraten. Ein, für alle anderen Fälle stehendes Beispiel der entsprechend teuren Ausführungen findet sich in Fig. 3.

## 1.2 Anforderungsprofil VSI-Rohre für Trinkwarmwasser

### 1.2.1 Prinzipielle Anforderungen

Ziel der Arbeit ist, mit Vakuum Spalt Isolation hoch effizient isolierte Leitungen (VSI-Rohre) für Trinkwarmwasser und Heizungswasser für Industriebauten, Mehrfamilien- und Einfamilienhäuser zu ermöglichen.

Damit eine Chance besteht, VSI-Rohre in diesem Anwendungsbereich zu etablieren, müssen – aus unserer Sicht – vier prinzipielle Voraussetzungen erfüllt sein:

- Für den Besitzer bzw. Betreiber der entsprechenden Liegenschaft muss das Kosten-/Nutzenverhältnis im Vergleich zu einer nach Norm (SIA 385) isolierten Leitung so sein, dass sich eine allfällig notwendige Mehrinvestition innerhalb nützlicher Frist ausgleicht. In der gängigen Literatur wird die Amortisationszeit von Wasserleitungen in Gebäuden mit 30 Jahren angegeben.  
Wir legen deshalb die maximal sinnvolle Ausgleichszeit auf ein Drittel der Amortisationszeit, also auf 10 Jahre fest.
- Die Langzeit-Stabilität des Vakuums – und damit der Wärmedämmung – muss gewährleistet sein.
- Die VSI-Rohre müssen gegen Schlag- und Stossbelastungen unempfindlich sein und die Erzeugung von Öffnungen in der Vakuumhülle (Zerstörung der Isolationswirkung des Vakuums) darf nur willentlich mit Werkzeugen wie beispielsweise einer Bohrmaschine oder einer Säge herstellbar sein.

- Die Handhabung der VSI-Rohre darf für den Installateur nicht schwieriger sein, als diejenige konventioneller, entsprechender Rohre.  
Insbesondere heisst dies, dass die Längenanpassung der Rohre, das Einbringen von Rohrbögen und – Abzweigern sowie die Verbindung der einzelnen Leitungskomponenten untereinander ähnlich einfach und kostenmässig entsprechend sein muss, wie heute beispielsweise mit Edelstahlrohren und Pressfittings.

### 1.2.2 Sollwert der Wärmedämmung und Amortisationszeit

In Fig. 4 ist die Kurve der aus SIA 385/1 abgeleiteten - und bezüglich Fig. 2 besprochenen - mittleren zulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten  $U_r$  nochmals abgebildet.

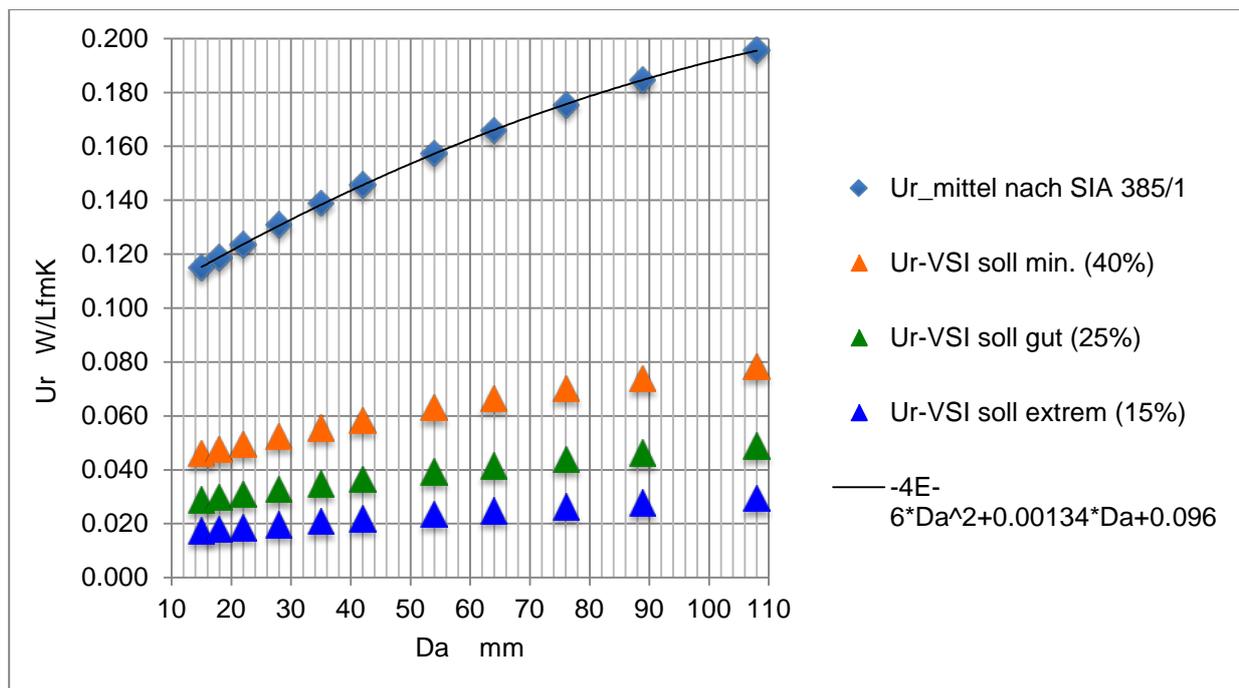


Fig. 4 mittlere zulässige  $U_r$ - nach SIA 385/1 und  $U_{r\_soll}$  Werte für die zu entwickelnden VSI-Rohre

Als Anforderung für die Wärmedämmung der zu entwickelnden VSI-Rohre haben wir 3, ebenfalls in Fig. 3 sichtbare, unterschiedliche Stufen definiert:

- Als Minimalziel soll erreicht werden, dass ein VSI-Rohr höchstens 40% des Wärmeverlustes eines entsprechenden mit konventionellem Dämmstoff nach SIA 385/1 isolierten Rohres aufweist. Wird dieses Ziel nicht erreicht, ist unseres Erachtens die spätere Entwicklung eines marktreifen Produktes nicht lohnend.
- Als Zielwert, der eine spätere Entwicklung zum marktreifen Produkt gut rechtfertigt, haben wir einen Wärmeverlust eines VSI-Rohres von höchstens 25% des konventionell isolierten Rohres festgelegt.
- Als extrem guten, wünschenswerten Soll-Wert legen wir für das VSI-Rohr einen Wärmeverlust von höchstens 15% des konventionell isolierten Rohres fest.

Zur Festlegung dieser 3 Stufen haben wir zunächst abgeschätzt, welche Einsparungen an Energiekosten sich mit einer bestimmten prozentualen Reduktion der Wärmeverluste bei Trinkwarmwasser Leitungen ergeben. Dabei gehen wir von folgenden Annahmen aus: Der Temperaturunterschied sei im Jahresmittel 40°C und die Trinkwarmwasser Versorgung sei das ganze Jahr ununterbrochen aktiv. Weiter haben wir angenommen, dass sich die Mehrkosten einer VSI-Leitung innerhalb einer „Ausgleichszeit“ (break-even) von 10 Jahren (siehe Abschn. 1.2.1) durch Energiekosten-

Einsparungen ausgleichen sollen. Mit diesen Annahmen und den in Fig. 2 sichtbaren Unterschieden der Ur lässt sich Tab. 4 errechnen.

Rohr-Øa [mm]	15	18	22	28	35	42	54	64	76.1	88.9
Einspar@10a, soll min [CHF/m]	22	22	23	25	26	28	30	31	33	35
Einspar@10a, soll gut	27	28	29	31	33	34	37	39	41	44
Einspar@10a, soll extrem	31	32	33	35	37	39	42	44	47	49

Tab. 4 Bei Zielerfüllung in 10 Jahren erreichbares Einsparpotenzial CHF pro Laufmeter VSI-Rohr

Die angenommenen Kosten für die Energie zur Erwärmung des Wassers sind 0.09 CHF/kWh. Diese Kosten entsprechen dem Mittelwert der Energiekosten welche – unter Berücksichtigung der Anlagen-Wirkungsgrade - zur Erzeugung von Heizwärme und/oder Warmwasser durch eine zentrale Anlage entstehen, die entweder mit Erdgas oder Erdöl oder Holz oder einer Luft-Wasser-Wärmepumpe betrieben wird (Quelle: Erdgas/Preise/Kostenvergleich auf [www.erdgas.ch](http://www.erdgas.ch), 2014) Wir gehen davon aus, dass das „Ausgleichsziel“ von 10 Jahren mit den geschätzten Kosteneinsparungen bei Erfüllung des minimalen Solls (40% konventionell) nicht ganz erfüllt werden kann. Dies bedeutet, dass versucht werden muss, mindestens die Zielsetzung "gut" (25% konventionell) zu erfüllen.

Selbstverständlich gelten die diskutierten Werte der Wärmedurchgangs-Koeffizienten Ur [W/Lm\*K] integral über das gesamte VSI-Leitungssystem. Dies bedeutet, dass an den Stössen, wo sich einzelne Rohrabschnitte miteinander oder mit Rohrbögen oder Rohrabzweigern treffen, keine (bedeutenden) thermischen Schwachstellen vorhanden sein dürfen.

### 1.2.3 Anforderungen an die Langzeit-Stabilität der Wärmedämmung

Die Soll-Wärmedämmwerte der VSI-Rohre bzw. Leitungssysteme müssen für einen Zeitraum von mindestens 50 Jahren eingehalten werden. Dies bedeutet, dass das Vakuum im VSI am Ende dieser Lebensdauer einen Druck von höchstens  $5 \cdot 10^{-4}$  mbar(=hPa) aufweisen darf. Der Anwender der VSI-Rohre muss die Sicherheit haben, dass dieser Hochvakuum-Unterdruck auch tatsächlich eingehalten wird. Wir leiten daraus folgende Anforderungen an die VSI-Rohre ab:

- Die Leckage und das Ausgasen aller in der Vakuummhülle verwendeten Komponenten muss in Summe so klein sein, dass der dadurch erzeugte Druckanstieg entweder klein genug ist, oder von einem im Vakuumpalt vorhandenen Getter kompensiert werden kann. Ein Getter ist ein Material wie beispielsweise Zeolithe und bestimmte Metalloxyde, das in der Lage, ist Gase wie beispielsweise H2O-Dampf, H2, O2, N2, CO2 usw. chemisch oder physikalisch zu binden und in diesem Sinne wie eine ständig arbeitende Vakuumpumpe wirkt, welche den Vakuum-Unterdruck auf dem gewünschten Niveau hält.
- Dies bedeutet zunächst, dass die Dichtheit sämtlicher Verbindungen, während der Installation des Systems, auf einfache Weise durch Prüfung sichergestellt werden kann.
- Weil ein Getter naturgemäss mit der Zeit gesättigt wird, muss aus Sicherheitsgründen und als Vertrauen bildende Massnahme der allfällig notwendige Getter - nach einer längeren Zeitperiode - auswechselbar sein, ohne das vorhandene Vakuum zu brechen. Und dies heisst, dass ein sehr preiswertes Ventil mit genügend kleiner Leckage, über welches der Getter mit dem VSI-Leitungssystem verbunden ist, vorhanden sein muss.
- Aus Sicherheitsgründen und als Vertrauen bildende Massnahme muss der Unterdruck im Vakuum kontrollierbar und allenfalls - nach einer längeren Zeitperiode - nochmals evakuierbar sein. Da es sich um Hochvakuum handelt, bedeutet dies, dass in längeren Abständen ein entsprechender Sensor – also beispielsweise eine Kalt-Kathoden-Messzelle – und im Bedarfsfalle beispielsweise eine Turbomolekular-Pumpe an das VSI-Leitungssystem angeschlossen werden kann, ohne das vorhandene Vakuum zu brechen. Und dies heisst, dass ein zweites, sehr preiswertes Ventil mit genügend kleiner Leckage, an welches Messzelle und/oder Pumpe angeschlossen werden können, im System vorhanden sein muss.

### 1.2.4 Anforderungen an die Robustheit

Folgende Anforderungen sind sowohl für die Zeitdauer der Installation, als auch für die lange Betriebszeit der VSI-Rohre zu erfüllen:

- Die VSI-Rohre sollen gegen Schlag- und Stossbelastungen ebenso robust sein, wie ein heute übliches Trinkwarmwasserrohr aus Edelstahl.
- Eine Verletzung der Vakuumschicht aus Versehen muss ausgeschlossen werden können, d.h. eine Hüllenschichtverletzung - und damit der Verlust der Dämmwirkung - darf nur willentlich (oder eben auch böswillig) durch Verwendung von Werkzeugen wie Bohrmaschine oder Säge zustande kommen. Der Aufwand hierfür muss gleich gross sein, wie heute derjenige zur Verletzung eines Warmwasserrohres aus PE-X.

### 1.2.5 Anforderungen an den Installationsaufwand

Die Installationsvorgänge:

- Längenanpassung der Rohrabschnitte
- Verbindung der Rohrabschnitte untereinander oder mit Rohr-Krümmern bzw. -Verzweigern
- Montage von Rohr-Krümmern bzw. -Verzweigern
- Befestigung des VSI-Leitungs-Systems an Decken, Wänden, Trägern
- Durchdringung von Wänden

dürfen als

- Minimalforderung  
Nicht (kosten-)aufwendiger und nicht weniger flexibel sein als bei Verwendung von konventionellen vorisolierten Rohren.
- als Wunschforderung  
nicht (kosten-)aufwendiger und nicht weniger flexibel sein als bei Verwendung von konventionellen nicht isolierten Edelstahl-Rohren. Dies bedeutet auch, dass die zur Montage benötigten Werkzeuge nicht mit hohen Investitionskosten verbunden sein dürfen.

### 1.2.6 Tabellarische Zusammenfassung

<b>Kosten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Allfällige Mehrkosten gegenüber gemäss SIA 385/1 gedämmter Warmwasser-Rohre sind maximal so hoch, dass sie innerhalb 10 Jahren durch Energiekosten Einsparungen ausgleichbar sind.</li> </ul>
<b>Effizienz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Die thermischen Verluste sind um 75% kleiner als bei konventionell normgerecht (SIA 385/1) isolierten Rohren.</li> </ul>
<b>Langzeit-Stabilität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Der notwendige Unterdruck (<math>10^{-4}</math> mbar) ist mindestens 50 Jahre sichergestellt Vertrauen bildende Vorkehrungen:             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Dichtheit ist (bei der Installation) prüfbar</li> <li>- Der Unterdruck ist (periodisch) messbar</li> <li>- Der Unterdruck ist (wenn nötig) wieder herstellbar</li> </ul> </li> </ul>
<b>Robustheit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Die VSI-Rohre sind unempfindlich gegen Schlag- und Stossbelastung.</li> <li>■ Die Vakuumschicht der VSI-Rohre kann nur willentlich verletzt werden.</li> </ul>
<b>Installations-aufwand</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Längenanpassung, Verbindung von Rohrabschnitten, Montage von Krümmern und Rohrabzweigern, Befestigung an Trägern und Durchdringung von Wänden sind ähnlich aufwendig und flexibel wie mit konventionellen nicht isolierten Stahl-rohren.</li> </ul>

Tab. 5 Zusammenfassung der Anforderungen an VSI-Warmwasserrohre

## 2 Neuinstallation von VSI-Leitungen

### 2.1 Konstruktiver Aufbau von VSI-Rohren

#### 2.1.1 Gesamtaufbau

##### 2.1.1.1 Möglichkeit 1: Wasserrohr ist VSI-Innenrohr, Vakuum ist durchgehend

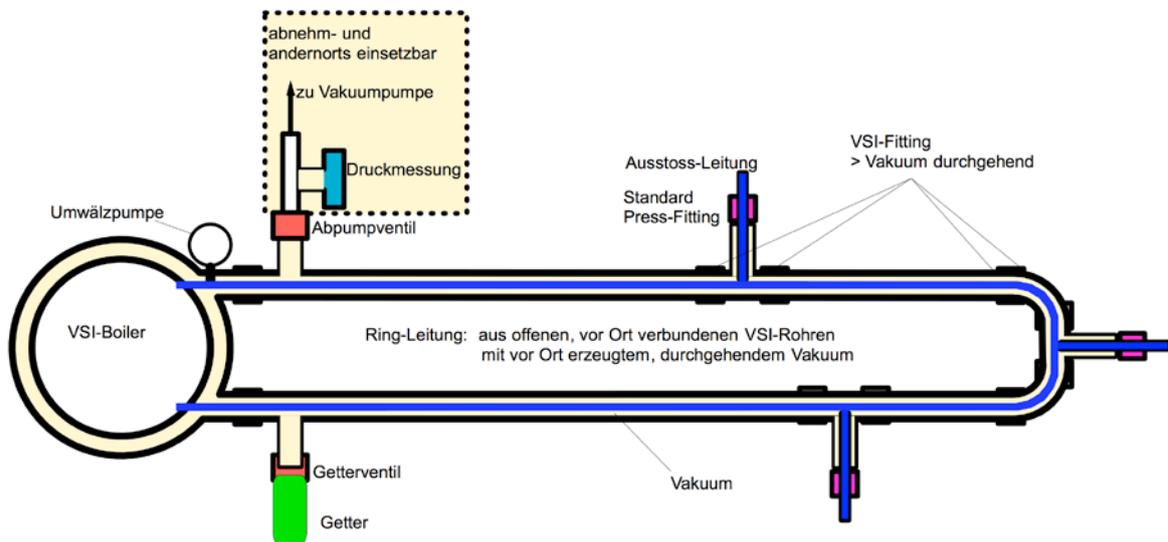


Fig. 5 Prinzipskizze einer warmgehaltenen Ringleitung mit durchgehendem Vakuumspace

Fig. 5 zeigt die Prinzipskizze einer warmgehaltenen Ringleitung mit durchgehendem Vakuumspace. Zusätzlich ist ein Vakuumspace um den Boiler dargestellt, der durchgehend in den Spalt um die VSI-Rohre übergeht. Nach unseren Berechnungen und Testaufbauten in früheren Arbeiten (BfE-Projekt "Hocheffiziente Isolation von Haushaltsgeräten – Zylindrische Anwendungen", Schlussbericht 30. Juni 2012 sowie BfE-Projekt "Anwendungen und Potenziale von Vakuum Spalt Isolation", Schlussbericht 30. Juli 2013) sind mit einem VSI-Boiler Energieeinsparungen in derselben Größenordnung wie mit VSI-Warmwasserleitungen erzielbar. Wir werden im Folgenden aber nicht näher auf VSI-Boiler und deren Anschluss an VSI-Leitungen eingehen.

Damit die angesprochene, erste Möglichkeit des Gesamtaufbaus eines VSI-Leitungssystems realisiert werden kann, müssen folgende Aufgaben gelöst sein:

- Verfügbarkeit einer Standard-Länge von auf das Vakuum vorbereiteten, an den Enden offenen Doppelrohren in den Standard-Durchmessern, mit minimal wärmeleitenden Abstützungen zwischen den Rohren
- Verfügbarkeit von auf das Vakuum vorbereiteten, an den Enden offenen doppelwandigen Rohrkrümmern und -abzweignern in den Standard-Durchmessern, mit minimal wärmeleitenden Abstützungen zwischen den Wänden
- Verfahren und Werkzeuge zum Ablängen dieser Doppelrohre
- Verfahren und Werkzeuge sowie allenfalls Hilfsstücke zur vakuumdichten Verbindung sowohl der inneren als auch der äusseren Rohre vor Ort
- Verfahren und Werkzeuge zur Prüfung der Dichtheit der inneren, wasserführenden sowie des äusseren Rohrstranges
- Verfahren und Werkzeuge zur Evakuierung des erzeugten Doppelrohr-Systems
- Verfahren und Werkzeuge zur Anbringung und Aktivierung eines Getters für das Gesamtsystem

Wie diese Aufgaben gelöst werden können, wird in den folgenden Abschnitten besprochen.

Bei Lösung dieser Aufgaben ergeben sich folgende Vorteile:

- Keine Wärmeverluste an Stößen zwischen den Rohren, Rohrkrümmern und Abzweigern und damit Erzeugung des thermisch optimalen Systems
- Problemlose Anpassbarkeit vor Ort an lokale Gegebenheiten durch freie Ablängbarkeit der VSI-Rohre
- Es muss nur eine einzige Standard Länge der VSI-Rohre zur Verfügung stehen
- Einfach-Prüfung des Vakuums über das gesamte Leitungssystem jederzeit möglich durch Bestimmung des Temperaturunterschieds zwischen dem Wasser und der Temperatur an einer einzigen Stelle der Aussenhülle
- Jederzeit genaue Messbarkeit des Vakuums durch – zeitlich begrenzte – Montage eines Druckmessers am Absaugventil
- Jederzeit Verbesserungsmöglichkeit des Vakuums durch – zeitlich begrenzte – Montage einer Vakuumpumpe am Absaugventil
- Jederzeit Ersatz eines allenfalls verbrauchten Getters

Folgende mögliche Nachteile dieser ersten Möglichkeit müssen vermieden werden:

- Die Erstellung der gasdichten Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten kann vor Ort schwierig und aufwendig sein
- Die Prüfung der Dichtheit kann aufwendig sein
- Die Evakuierung vor Ort kann allenfalls zu teuer sein

#### 2.1.1.2 Möglichkeit 2: Wasserrohr ist VSI-Innenrohr, Vakuum ist segmentiert, 2 Fälle

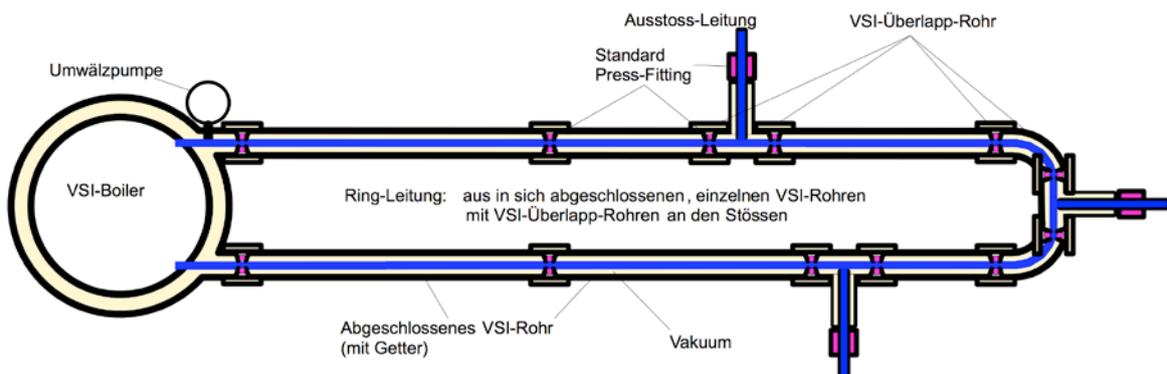


Fig. 6 Prinzipskizze einer warmgehaltenen Ringleitung mit segmentiertem Vakuumpspalt

Fig. 6 zeigt die Prinzipskizze einer warmgehaltenen Ringleitung mit segmentiertem Vakuumpspalt, welche an einen ebenfalls mit Vakuum Spalt Isolation (VSI) versehenen Boiler angeschlossen ist. Hergestellt wird ein solches Leitungssystem durch Zusammenfügen von werkseitig gefertigten VSI-Rohren mit beidseitig abgeschlossenem, evakuiertem Vakuumpspalt.

Damit diese zweite Möglichkeit des Gesamtaufbaus eines VSI-Leitungssystems realisiert werden kann, müssen folgende Aufgaben gelöst sein:

- Fall1: Verfügbarkeit von werkseitig evakuierten VSI-Rohren in den Standard-Durchmessern, mit minimal wärmeleitenden Abstützungen zwischen den Wänden  
oder  
Fall 2: Verfügbarkeit einer Standard-Länge von auf das Vakuum vorbereiteten, an den Enden offenen Doppelrohren in den Standard-Durchmessern, die vom Installateur in seiner Werkstatt auf die gewünschte Länge gebracht, verschlossen und evakuiert werden.
- Im Falle 1: VSI-Rohre so aufgebaut, dass sie ohne Verlust des Vakuums gemäss örtlichen Erfordernissen abgelängt werden können  
oder

sehr rasche Verfügbarkeit von entsprechenden, werkseitig gefertigten VSI-Rohren mit kundenspezifischen Längen

- In beiden Fällen: Nach Möglichkeit Realisierung von wenig wärmeleitenden Verbindungen an den Enden der inneren und äusseren VSI-Rohre
- In beiden Fällen: Verfügbarkeit von werkseitig evakuierten VSI-Überlapp-Rohren in einem entsprechenden Sortiment von Durchmessern
- In beiden Fällen: Verfügbarkeit von werkseitig evakuierten VSI-Rohrkrümmern und -abzweigern in den Standard-Durchmessern, mit minimal wärmeleitenden Abstützungen zwischen den Wänden, wobei diese Bauteile so gestaltet sein müssen, dass eine genügende Überlappung mit den VSI-Überlapp-Rohren gewährleistet ist
- In beiden Fällen: Einbringung und Dimensionierung eines über die ganze Länge vorhandenen Getters (Ablängbarkeit!) in den Spalt jedes Rohres, der die "Lebensdauer" des Vakuums über mindestens 50 Jahre garantiert.
- In beiden Fällen: Gestaltung der über den Vakuumspace hinausragenden Enden der inneren Rohre, an denen ja kein Vakuum mehr herrscht, so, dass diese beispielsweise mit Standard-Pressfittings verbunden werden können

Wie diese Aufgaben gelöst werden können, wird auch bezüglich dieser Möglichkeit in den folgenden Abschnitten besprochen.

Bei Lösung dieser Aufgaben ergeben sich folgende Vorteile dieser zweiten Möglichkeit:

- Der Installateur muss sich im Fall 1 nicht und im Fall 2 nur in seiner entsprechend ausgerüsteten Werkstatt um das Vakuum kümmern
- Die Verbindung der VSI-Rohre, -krümmer und -abzweiger kann – nach vorherigem Aufschieben der VSI-Überlapp-Rohre - mit den heute üblichen Mitteln und Werkzeugen geschehen

Nachteile dieser zweiten Möglichkeit können sein:

- Die Herstellung der VSI-Komponenten ist relativ aufwendig
- Die Stösse sind trotz Überlapp-Rohren thermische Schwachstellen, welche die Energieeffizienz deutlich verschlechtern
- Die Realisierung einer Überlappung an Krümmern und Abzweigern erfordert relativ lange gerade Enden dieser Bauteile, was zu Schwierigkeiten bei der Installation vor Ort führen kann
- Im Fall 1: es sind relativ aufwendige Werkzeuge zur Ablängung der VSI-Rohre ohne Vakuumverlust notwendig  
oder  
es ist eine sehr aufwendige, teure Organisation zur Sicherstellung einer werkseitigen "Sofort-Verfügbarkeit" von VSI-Rohren mit kundenspezifischer Länge notwendig
- Eine Einfach-Prüfung des Vakuums ist zwar jederzeit möglich durch die Bestimmung des Temperaturunterschieds zwischen dem Wasser und einer Stelle der Aussenhülle, muss aber für jede einzelne VSI-Komponente durchgeführt werden
- Die genaue Messbarkeit des Vakuums ist nicht, oder nur mit sehr grossem Zusatzaufwand möglich
- Die Verbesserung des Vakuums ist nicht, oder nur mit sehr grossem Zusatzaufwand möglich
- Der Ersatz eines allenfalls verbrauchten Getters ist nicht, oder nur mit sehr grossem Zusatzaufwand möglich

### 2.1.1.3 Möglichkeit 3: Wasserrohr ist unabhängig, Isolation mit VSI-Hüllrohren

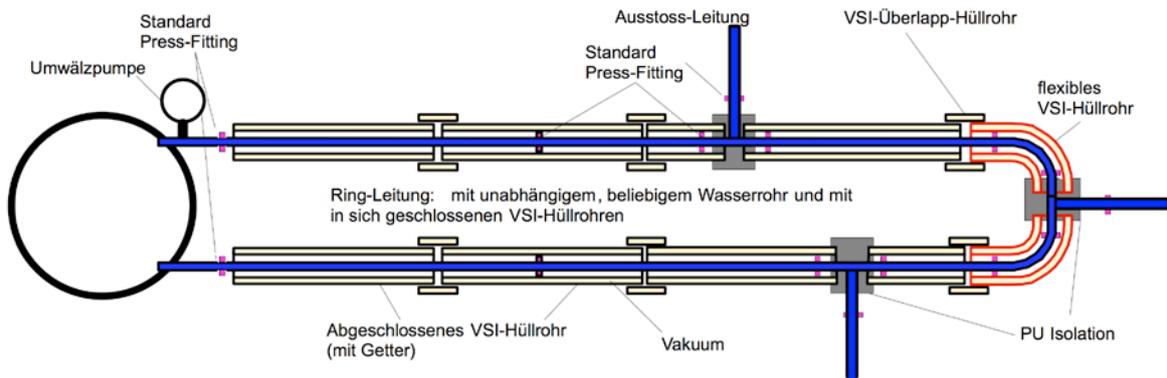


Fig. 7 Prinzipskizze einer warmgehaltenen Ringleitung mit VSI Hüllrohren

Fig. 7 zeigt die Prinzipskizze einer warmgehaltenen Ringleitung mit VSI-Hüllrohren. Eine derartig mit Vakuum isolierte Leitung besteht aus einer unabhängigen, konventionell aus beliebigen Rohren aufgebauten Wasserleitung, über welche Doppelrohre mit an beiden Enden verschlossenem Vakuumpspalt geschoben sind. Der Innendurchmesser der Hüllrohre ist so gross, dass dieselben auch über die - die Wasserrohre verbindenden - Fittings hinweg geschoben werden können.

Es ist offensichtlich, dass bei der Installation einer solchen Leitung die VSI-Hüllrohre über die Wasserrohre geschoben werden müssen, bevor dieselben vollständig untereinander verbunden werden. Pro gerade Strecke der Wasserleitung muss ein unverbundener Stoss vorhanden sein, an welchem die VSI Hüllrohre in geeigneter Reihenfolge über die Wasserrohre geschoben werden können. Erst danach dürfen die Wasserrohre an diesen Stössen verbunden werden.

Wir sind der Meinung, dass Hüllrohre eine ernst zu nehmende Möglichkeit zur Realisierung einer nachträglichen Isolation von bereits bestehenden Warmwasserleitungen darstellen. Dazu muss die bestehende Leitung an einigen wenigen Stellen aufgetrennt und nach dem Aufschieben der Hüllrohre mit Standard Fittings wieder verbunden werden.

Obwohl die Verwendung von VSI-Hüllrohren – der völlig freien Auswahl der Materialien der eigentlichen Warmwasserleitung wegen – auch für die Neuinstallation von VSI-Leitungen interessant sein könnte, werden wir deshalb diese Möglichkeit zur Realisierung von VSI-Warmwasserleitungen erst im Kapitel 3 "VSI Retrofit" ausführlich besprechen.

## 2.1.2 Materialien

### 2.1.2.1 Mögliche Materialien für VSI-Rohre mit Wasserrohr = VSI-Innenrohr

Für die wasserführenden **VSI-Innenrohre** kommen prinzipiell nur die in Tab. 3 (Abschnitt 1.1.1.2 Marktsituation) aufgeführten Rohrmaterialien in Frage. Wir haben uns bei der Betrachtung dieser Tabelle bereits auf die beiden Rohrtypen "Edelstahl" und "PE-X" beschränkt.

Für das VSI-Innenrohr existieren 2 zusätzliche Forderungen:

- Die Rohre müssen "absolut" gasdicht sein
- Die Rohre müssen zur Vakuumseite hin so wenig wie möglich ausgasen

Da PE im Vakuum sehr stark ausgast, wird die Summe dieser beiden Forderungen a priori nur von Edelstahl erfüllt, weshalb wir uns im Rahmen der vorliegenden Untersuchung auf diese Materialgruppe beschränken. Im Besonderen konzentrieren wir uns auf den – für Warmwasserrohre oft verwendeten – austenitischen Stahl 1.4521, was aber nicht bedeutet, dass keine allenfalls preisgünstigeren Stähle mit ähnlich guten Eigenschaften existieren.

Von den Anforderungen des Vakuums her wäre auch das, in Form von Rohren relativ preiswerte, Material Aluminium von grossem Interesse. Es scheint aber keinerlei Erfahrungen bezüglich der Beeinflussung von Trinkwasser durch Aluminiumrohre zu geben. Längerfristig könnte es aber sinnvoll sein, die entsprechenden Werte zu erarbeiten und – bei positiven Resultaten – über den Einsatz dieses Materials für VSI-Innenrohre nachzudenken.

Für die **VSI-Aussenrohre**, die ja lediglich Vakuum und Luft ausgesetzt sind, kommen alle Rohrarten in Frage, welche die zwei "Vakuum-Forderungen" erfüllen:

- Die Rohre müssen "absolut" gasdicht sein
- Die Rohre müssen zur Vakuumseite hin so wenig wie möglich ausgasen

Damit öffnet sich theoretisch ein relativ breiter Fächer denkbarer Rohrmaterialien, der von hoch oder schwach legierten Edelstählen über aluminisierte, verzinkte oder unbeschichtete C-Stähle, Kupfer, Aluminium bis hin zu Glas reicht.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konzentrieren wir uns für das VSI-Aussenrohr einerseits auf austenitische Stähle, insbesondere auf den relativ preiswerten 1.4301 sowie auf 1.4521 von denen bekannt ist, dass tiefe Ausgasraten realisierbar sind. Andererseits betrachten wir auch VSI-Aussenrohre aus Aluminium und C-Stahl näher.

### 2.1.2.2 Evaluation Ausgasen

Die Beherrschung des Ausgasens der die Vakuumhülle bildenden Materialien ist absolut entscheidend für die "Lebensdauer" eines VSI tauglichen Unterdruckes von  $< 5 \cdot 10^{-4}$  hPa (=mbar). Eine grössere Ausgasrate [hPa\*L / (cm<sup>2</sup>\*sec)] bedingt den Einbau einer grösseren Getterkapazität [hPa\*L] in den Vakuumpalt damit ein gewünschter Unterdruck von beispielsweise  $1 \cdot 10^{-5}$  hPa erhalten bleibt. Damit entstehen auch entsprechend grössere Kosten und allenfalls ein höherer Platzbedarf.

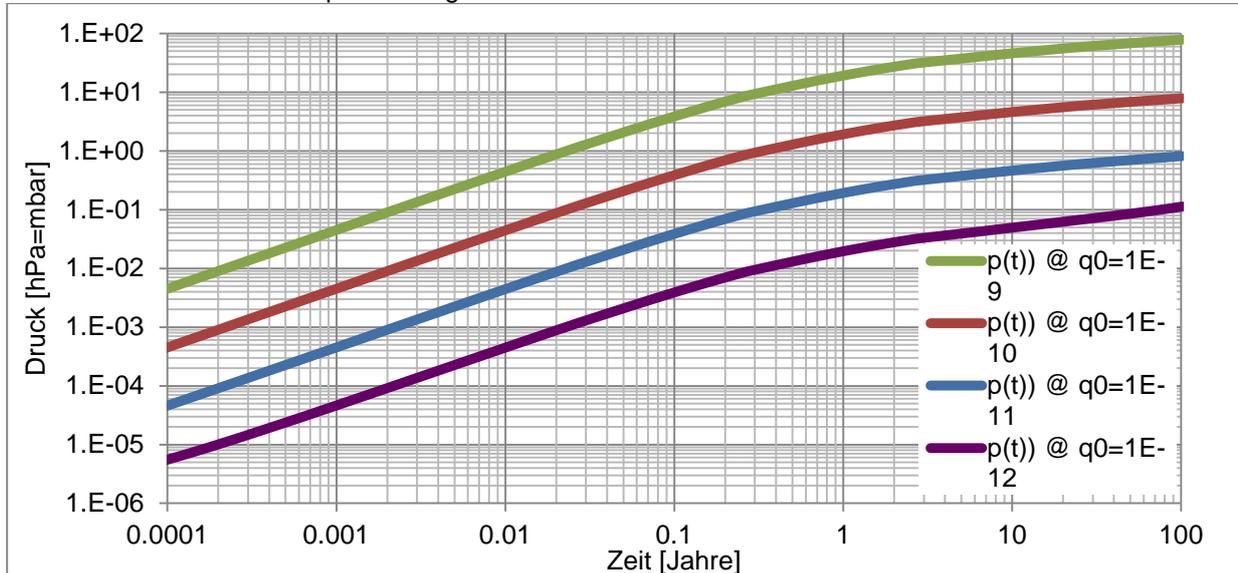


Fig. 8 durch Ausgasen bedingte Druckzunahme [hPa] bei verschiedenen Ausgasraten

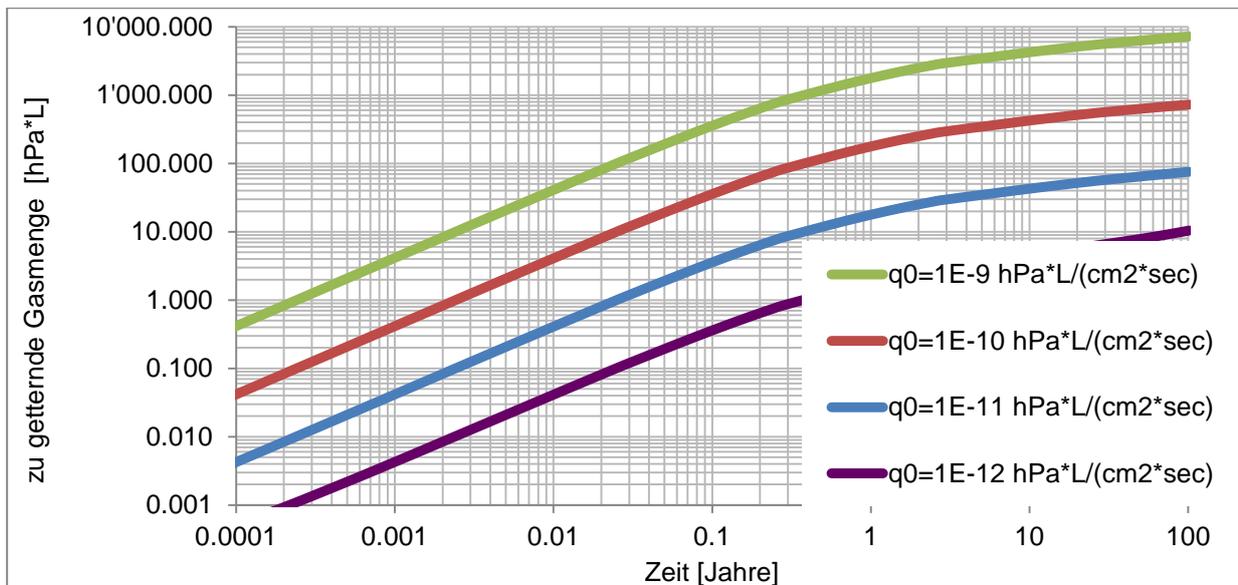


Fig. 9 durch Ausgasen bedingtes zu Gettervolumen [hPa\*L] bei verschiedenen Ausgasraten

Fig. 8 zeigt den theoretischen Verlauf der Druckzunahme, Fig. 9 die zu getternden Gasmenge bei unterschiedlichen Ausgasraten  $q_0$  und Anfangsdruck  $1 \cdot 10^{-6}$  hPa zum Zeitpunkt 0 im Vakuumspalt eines 50 m langen VSI-Rohres mit Nennweite 25 mm. Zur Berechnung der Kurven wurde angenommen, dass die Ausgasrate  $q$  für metallische Wände im Verlauf der Zeit nach einem  $(1/t)$ -Gesetz ( $q=q_0 \cdot t_0/t$ ;  $t_0=3600$  sec) abnimmt. Vergleicht man unterschiedliche Modelle für die zeitliche Abnahme der Ausgasrate, entspricht diese Annahme in etwa dem schlechtesten anzunehmenden Fall.

Die Druckverläufe von Fig. 8 zeigen, dass ohne Getter auch bei einer kleinen Ausgasrate von beispielsweise  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec) schon nach ca. 4 Tagen (0.01 Jahre) der Druck-Grenzwert von  $5 \cdot 10^{-4}$  hPa durch Ausgasen überschritten wird, oberhalb dessen das Vakuum für VSI nicht mehr gut genug ist. Bei höheren Ausgasraten tritt dies entsprechend bereits nach wenigen Stunden ein. Theoretisch wäre es möglich die Ausgasrate durch sehr aufwendige Bake-Out Verfahren auf  $1 \cdot 10^{-15}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec) zu senken, womit theoretisch der genannte Grenz-Druck erst nach ca. 100 Jahren überschritten würde. Derartige Verfahren werden zwar beispielsweise für die grossen Beschleuniger (z.B. LHC des CERN) angewendet, sind aber für unsere Zielsetzung viel zu teuer. Wir müssen davon ausgehen, dass Ausgasraten von  $\leq 1 \cdot 10^{-11}$  bis  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec) mit einfachen, preiswerten Mitteln erreichbar sind. Damit ist klar, ein wirksamer Getter zur Aufnahme der durch Ausgasen entstehenden Gase ist unverzichtbar und es geht nur um Art und Menge desselben.

Die Kurven von Fig. 9 verdeutlichen, wie wichtig das Erreichen einer Anfangs-Ausgasrate  $q_0$  von  $< 10^{-10}$  [hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec)] ist, werden sonst doch Getterkapazitäten von gegen 1000 [hPa\*L] oder grösser notwendig, was in der Regel relativ grosse Gettermengen (einige 10 g) und damit mit einiger Wahrscheinlichkeit zu hohe Kosten bedeutet.

In der entsprechenden Literatur findet man von der Aussage, dass Getterraten von  $10^{-11}$  bis  $10^{-12}$  [hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec)] problemlos erreichbar seien, bis zur Angabe von  $10^{-7}$  [hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec)], alles. Um hier (für uns) Klarheit zu schaffen, haben wir uns entschlossen, mit den uns interessierenden Materialien, entsprechende Messungen durchzuführen.

Unsere erste Idee war, diese Messungen von Institutionen im ETH- und Fachhochschul-Bereich durchführen zu lassen, welche sich viel mit Vakuum beschäftigen. Nachdem wir aber nur Absagen erhalten haben, mussten wir uns selbst behelfen.

Nach – mit erheblichem Zeitaufwand – durchgeführten Literaturstudien, Entwurfs-Zyklen und Vorversuchen haben wir den in Fig. 10 und Fig. 11 gezeigten, extrem einfachen Messaufbau für diese Aufgabe definiert.

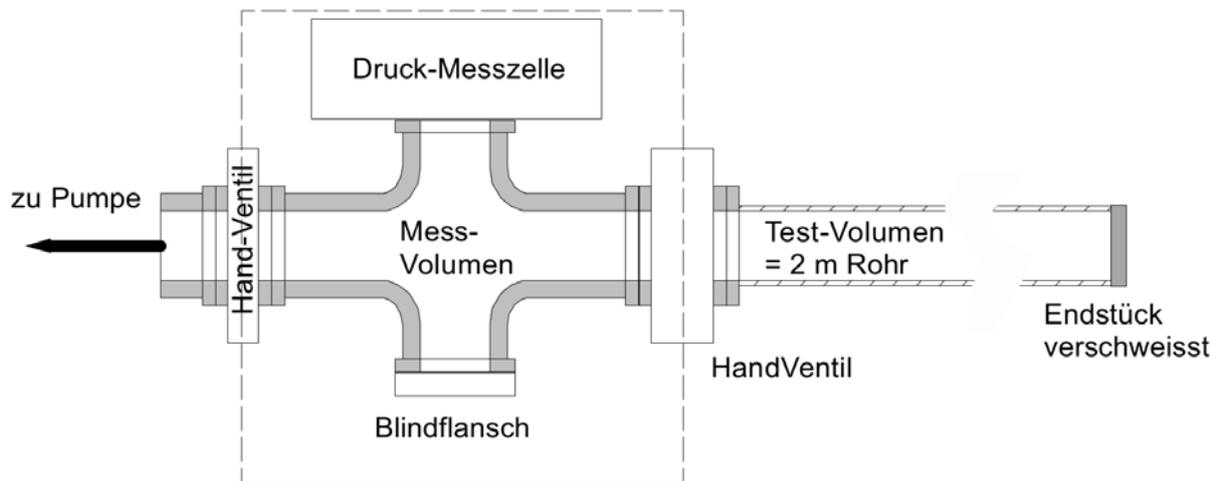


Fig. 10 Skizze Messaufbau "Ausgasen Rohr"

Die diesem Aufbau zu Grunde liegenden Überlegungen sind:

- Der unten beschriebene Messablauf sichert eine lange Beobachtungsdauer, was zwar den Nachteil eines relativ grossen Zeitaufwandes, aber den Vorteil einer grossen Zuverlässigkeit der Messung bringt.
- Aufgrund der dort vorhandenen Dichtungen aus organischem Material ist davon auszugehen, dass im Bereich des Mess-Volumens mit angeschlossener Messzelle wesentlich grössere Ausgasraten vorhanden sind als im Test-Volumen. Aus diesem Grunde muss das Mess-Volumen, bzw. die innere Oberfläche desselben, wesentlich kleiner sein als die innere Oberfläche des Test-Volumens. Dies sichert – bei dem unten beschriebenen Messablauf – eine möglichst kleine Verfälschung des Messergebnisses.
- Dies ist realisiert mit einem Testrohr mit innerer Oberfläche von  $\text{Ø}25 \times 2000$  mm und einem Messvolumen von total ca.  $\text{Ø}25 \times 100$  mm.
- Die Leckraten bei den Ventil-Anschlüssen sind durch Verwendung von KF-Flanschen mit Aluminium Dichtringen oder von CF-Flanschen so klein, dass sie – bei dem unten beschriebenen Messablauf – vernachlässigbar sind.
- Die so erreichte Messgenauigkeit, welche vor allem sehr stark von der Genauigkeit der eingesetzten Kalt-Kathoden Druckmesszelle beeinflusst ist, liegt nach unseren Abschätzungen ca. bei  $\pm 50\%$ , was für unsere Zwecke bei weitem genügend gut ist.

Der das Messergebnis massgeblich beeinflussende Messablauf ist:

- Mit beiden Hand-Ventilen in geöffnetem Zustand wird die gesamte Vorrichtung auf  $< 10^{-5}$  hPa abgepumpt
- Das zu testende Rohr (Test-Volumen) wird auf eine definierte Bake-Out Temperatur aufgeheizt und bei dieser Temperatur während 24 h weiterhin abgepumpt
- Unter ständigem Abpumpen wird das Test-Volumen auf die Testtemperatur von ca.  $20^\circ\text{C}$  abgekühlt und der dann herrschende Druck (=Anfangsdruck des Test-Volumens) aufgezeichnet
- Danach wird das Hand-Ventil zwischen Mess- und Test-Volumen geschlossen. Das Messvolumen wird weiterhin ständig abgepumpt während die innere Oberfläche des Test-Volumens während 24 h ausgast
- Ab nun wird der Druckverlauf aufgezeichnet
- Das Ventil zur Pumpe wird geschlossen und anschliessend dasjenige zwischen Mess- und Test-Volumen geöffnet
- Aus dem aufgezeichneten Druckverlauf kann mit hoher Genauigkeit auf den Enddruck – vor Öffnen des Ventils – im Test-Bereich geschlossen werden
- Der Quotient aus der Druckdifferenz des Test-Volumens und der Ausgasdauer führt zu der gesuchten Ausgasrate des Test-Volumens, welche der oben erwähnten Anfangs-Ausgasrate  $q_0$  entspricht.



Fig. 11 Foto Messaufbau "Ausgasen Rohr"

Auf die geschilderte Weise wurden mit Röhren aus den 3 Materialien Edelstahl (1.4521), C-Stahl (1.0034) und Aluminium Ausgasversuche durchgeführt. Es wurden jeweils 1 bis 2 unterschiedliche Röhre desselben Materials gemessen und die einzelnen Messungen wurden jeweils dreimal wiederholt. Tab. 6 zeigt eine kurze Zusammenfassung der Resultate.

Rohrdimension immer: Innendurchmesser $\varnothing_i=25$ mm, Länge innen $L_i=2000$ mm				
Material Testrohr	Bake-Out Dauer	Bake-Out Temperatur	Ausgasdauer	Ausgasrate gemessen
	h		h	$\text{hPa}\cdot\text{L}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$
Edelstahl 1.4521	24	hoch	ca. 24	$1\cdot 10^{-12}$
Edelstahl 1.4521	24	Raumtemp.	ca. 24	$5.3\cdot 10^{-12}$
C-Stahl 1.0034	24	hoch	ca. 24	$4\cdot 10^{-9}$
C-Stahl 1.0034	24	Raumtemp.	ca. 24	$4\cdot 10^{-9}$
Aluminium EN AW 6082 T6 (3.2315)	24	hoch	ca. 24	$1\cdot 10^{-12}$
Aluminium EN AW 6082 T6 (3.2315)	24	Raumtemp.	ca. 24	$4\cdot 10^{-11}$

Tab. 6 gemessene Ausgasraten unterschiedlicher Röhre

Es ist deutlich erkennbar, dass die Edelstahl-Röhre bereits nach einem 24 stündigen Ausgasen bei Raumtemperatur eine geringe Ausgasrate von ca.  $5\cdot 10^{-12}$   $\text{hPa}\cdot\text{L}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$  aufweisen. Nach dem von uns gewählten 24 stündigen Bake-Out bei hoher Temperatur sinkt diese im Mittel auf ca.  $1\cdot 10^{-12}$   $\text{hPa}\cdot\text{L}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ . Dies bedeutet theoretisch (siehe Fig. 9), dass für ein 50 m langes VSI-Rohr mit Nennweite 25 mm, bei welchen Innen- und Aussenrohr aus Edelstahl bestehen, eine Getterkapazität von lediglich ca. 10  $\text{hPa}\cdot\text{L}$  notwendig ist um den gewünschten Unterdruck von beispielsweise  $1\cdot 10^{-5}$  hPa während 100 Jahren aufrecht zu erhalten.

Ähnlich gut sind Aluminium-Rohre, bei welchen nach 24 stündigem Bake-Out bei hoher Temperatur der von uns gemessene Mittelwert ca.  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*s) beträgt, was ebenfalls bedeutet, dass eine Getterkapazität von ca. 10 hPa\*L benötigt würde.

Getter mit Kapazitäten bis 1000 hPa\*L sind in kleinsten Stückzahlen für deutlich weniger als € 100 am Markt erhältlich, so dass dem Einsatz von Edelstahl oder Edelstahl-Aluminium VSI-Rohren von dieser Seite her nichts im Wege steht.

Schlecht sieht es – zumindest momentan – für den Einsatz von sehr preiswerten C-Stahl-Rohren aus. Die von uns gemessenen Ausgasraten von ca.  $4 \cdot 10^{-9}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*s) würden Getterkapazitäten von

> 40'000 hPa\*L benötigen, was aus Kostengründen nicht realistisch ist. Wir gehen aber davon aus, dass mit anderen preiswerten Vorbehandlungen allenfalls doch Ausgasraten  $< 1 \cdot 10^{-10}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*s) erreichbar und damit, auch für C-Stahl, Getterkapazitäten von < 1000 hPa\*L notwendig wären. Wir können dieser Möglichkeit aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter nachgehen.

### 2.1.2.3 Evaluation Gasdichtigkeit

Die für unseren Zweck in Frage kommenden Rohre aus Edelstahl, C-Stahl, Aluminium oder PE-Aluminium besitzen eine – für unsern Fall – vernachlässigbare Permeation von Gasen jeglicher Art, müssen also in dieser Hinsicht nicht evaluiert werden.

Ebenfalls sind korrekt ausgeführte Verschweissungen sowie Hart- oder Weich-Lötungen erwiesenermassen genügend dicht für Hochvakuum und benötigen keine Evaluation, sondern die Auswahl der bekannten geeigneten Verfahren.

Bezüglich der, zur Herstellung von VSI-Leitungs-Systemen, allenfalls ebenfalls interessanten Verklebungen, haben unsere Untersuchungen in einer früheren Arbeit (Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte – Bauelemente für Vakuumpanels, Schlussbericht September 2013, Bundesamt für Energie BFE) gezeigt, dass auch solche Verbindungen für unsere Zwecke eine genügend gute Dichtheit aufweisen können. Dies muss aber für den Fall von VSI-Rohren noch bewiesen werden.

Was bleibt, ist die Dichtheit, bzw. die Leckage von Bauelementen wie Verbindungsflanschen (Fittings) und Ventilen, die gemäss den beiden von uns betrachteten prinzipiellen Aufbaumöglichkeiten 1 und 2 (Fig. 5 und Fig. 6) allenfalls zum Einsatz kommen könnten.

Derartige Bauelemente am Markt weisen Leckraten zwischen  $1 \cdot 10^{-9}$  bis  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa\*L/sec auf und wir gehen davon aus, dass sehr preiswerte Bauelemente mit derartigen Leckraten auch für den Masseneinsatz konstruiert und gefertigt werden können.

Was bedeuten Leckraten in dieser Grössenordnung im Vergleich zu den oben ausführlich besprochenen Ausgasraten? Wir rechnen hierfür die Leckraten in virtuelle Ausgasraten um, wofür die Leckrate offensichtlich durch die innere Oberfläche [cm<sup>2</sup>] des Vakuumpaltes dividiert werden muss. Für unser Beispiel eines 50 m langen VSI-Rohres mit Nenndurchmesser 25 mm (Aussenrohr Ø ca. 52 mm) ergibt sich eine innere Oberfläche des Vakuumpaltes von ca. 132'000 cm<sup>2</sup> und damit entspricht eine Leckrate von  $1 \cdot 10^{-9}$  bis  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa\*L/sec einer virtuellen Ausgasrate von  $< 1 \cdot 10^{-14}$  bis  $< 1 \cdot 10^{-17}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*s). Dies bedeutet, dass Leckraten in der genannten Grössenordnung gegenüber dem Ausgasen vernachlässigbar sind.

Diese erste grobe Abschätzung weist darauf hin, dass die Summe der Leckraten auch noch dann toleriert werden kann, wenn 100 solche Flansche in ein DN25 VSI-Leitung eingebaut würden. Die entsprechende totale virtuelle Ausgasrate wären dann  $< 1 \cdot 10^{-12}$  bis  $< 1 \cdot 10^{-15}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*s), womit im schlimmsten Fall durch die Leckage dieser 100 Flansche die Druckzunahme durch Ausgasen verdoppelt würde.

Für eine exaktere Aussage muss allerdings die zeitliche Abnahme des Ausgasens der VSI-Wände berücksichtigt werden. Die Resultate einer entsprechenden Berechnung sind Fig. 12 zu entnehmen, in welcher – unter Annahme einer anfänglichen Ausgasrate von  $1 \cdot 10^{-11}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*s) und unterschiedlichen Leckraten - die zu getternden Gasmengen im Vakuumpalt eines 50 m langen DN25 VSI-Rohres dargestellt sind.

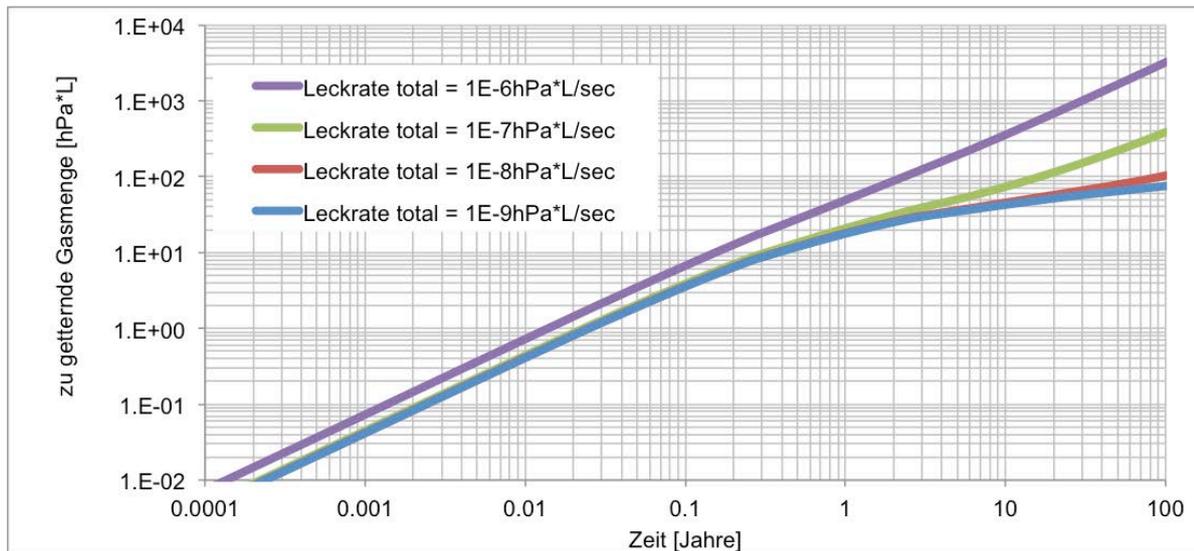


Fig. 12 durch Ausgasen von  $1 \cdot 10^{-11}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*s) und durch gleichzeitige Leckage bedingte zu getternde Gasmenge [hPa\*L] bei verschiedenen totalen Leckraten in einer 50 m langen DN25 VSI-Leitung

Die blaue Kurve in Fig. 12 setzt eine Leckstelle mit Leckrate total =  $1 \cdot 10^{-9}$  hPa\*L/sec voraus und ist nicht zu unterscheiden von der entsprechenden blauen Kurve in Fig. 9, welche alleine die Druckzunahme durch Ausgasen beschreibt. Auch bei 10 derartigen Leckstellen (totale Leckrate =  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa\*L/sec) ist die benötigte Getterkapazität nur unwesentlich höher. Bei 100 Leckstellen (totale Leckrate =  $1 \cdot 10^{-7}$  hPa\*L/sec) steigt die benötigte Getterkapazität um ca. einen Faktor 5, was immer noch problemlos ist. Erst bei ca. 1000 solcher Leckstellen (totale Leckrate =  $1 \cdot 10^{-6}$  hPa\*L/sec) würde die Angelegenheit problematisch.

Wir können also festhalten, dass beim Einbau von bis zu 100 – jeweils eine Leckrate von  $1 \cdot 10^{-9}$  hPa\*L/sec aufweisenden - Fittings oder Ventilen in eine VSI-Leitung, die Summe der an diesen Bauteilen auftretenden Leckage ohne weiteres von dem, aufgrund von Ausgasen, ohnehin notwendigen Getter beherrschbar ist.

#### 2.1.2.4 Strahlungs-Emissionsgrade

Die Wärmestrahlung zwischen den Wänden des Vakuumpalts, in unserem Falle also zwischen innerem und äußerem Rohr spielt eine entscheidende Rolle für den gesamten Wärmedurchgang.

In der Regel werden zum Zwecke der Strahlungsminderung eine oder mehrere thermisch schwach gekoppelte Aluminiumfolien in den Vakuumpalt eingebracht. Hierfür liegen zuverlässige Messwerte vor die zeigen, dass der Emissionsgrad derartiger Folien zwischen 0.03 und 0.045 liegt. Damit sind wir sicher, dass auf diese Weise der Wärmedurchgang durch Strahlung im gewünschten Masse reduziert werden kann.

Aus Kostengründen könnte es aber wünschenswert sein, auf derartige zusätzliche Bauelemente zu verzichten. Nach einigen Messungen hat sich aber gezeigt, dass die benötigten niedrigen Emissionsgrade von Rohrwänden nur dann erreicht werden können, wenn die entsprechenden Flächen von Aluminiumrohren nachpoliert werden. Die Emissionsgrade von polierten Stahlrohren sind deutlich zu hoch.

### 2.1.3 Aufbau der Rohrhohlwände

Für den Aufbau der VSI-Rohrhohlwände müssen eine Reihe von Problemstellungen berücksichtigt werden, welche in den folgenden Abschnitten besprochen werden.

#### 2.1.3.1 Abstütungen Innen-Aussenrohr

Der Vakuumpalt zwischen Innen- und Aussenrohr eines VSI-Rohres muss mit Hilfe geeigneter Stützkörper in jedem Fall so gross gehalten werden, dass das Aussenrohr die auf dem Innenrohr befestigten Folien zur Strahlungsminderung keinesfalls berührt.

Die in Tab. 7 und Tab. 8 (siehe Abschnitt 2.1.3.2 Wandstärken) gezeigten Abstände dieser Stützkörper und die Grösse des Vakuumpalts sind so gewählt, dass diese Forderung immer erfüllt ist.

Die Stützkörper müssen - im Gegensatz zu den Distanzhaltern zwischen den Grenzwänden eines ebenen VSI-Panels - nicht in der Lage sein, die durch den Luftdruck ausgeübten Kräfte zu übernehmen. Dies ist durch Form und Wandstärke sowohl des Innen- als auch des Aussenrohrs zu gewährleisten.

Sie müssen aber einer Reihe anderer Anforderungen genügen. Die Stützkörper müssen:

- auf einfache Weise herstellbar und sehr preiswert sein
- eine durch das Gewicht der Rohre und des Wassers hervorgerufene Verformung aufweisen, die gegenüber der theoretischen Weite des Vakuumpalts kleiner als 10% ist.
- Stossbelastungen (Fallen eines VSI-Rohres aus einigen Metern Höhe) so widerstehen, dass nach dem Stoss die ursprüngliche relative Lage zwischen Innen- und Aussenrohr erhalten ist
- die durch Wärmeunterschiede bedingte Dilatation zwischen Innen- und Aussenrohr ohne Beeinträchtigung ihrer Stützfunktion zulassen
- so wenig wie möglich ausgasen
- so wenig wie möglich Wärme vom Innen- zum Aussenrohr leiten

Es ist gelungen einen Stützkörper zu entwickeln und zu erproben, der alle diese Forderungen erfüllt. Beispielsweise liegt die Verformung der Stützkörper unter den herrschenden Belastungen in der Grössenordnung von 1 mm. Weiter können die Körper sowohl Stossbelastungen in beliebiger Grösse als auch die Dilatation übernehmen. Zudem gasen sie nicht stärker aus als die den Vakuumpalt bildenden metallischen Rohre. Da wir diese Entwicklung als schützenswertes Know-How betrachten, beschreiben wir den Aufbau dieses Körpers hier nicht. Wir zeigen in Fig. 13 jedoch die berechneten, auf einen Meter Rohrlänge bezogenen, Wärmedurchgangskoeffizienten durch die Summe der Stützkörper.

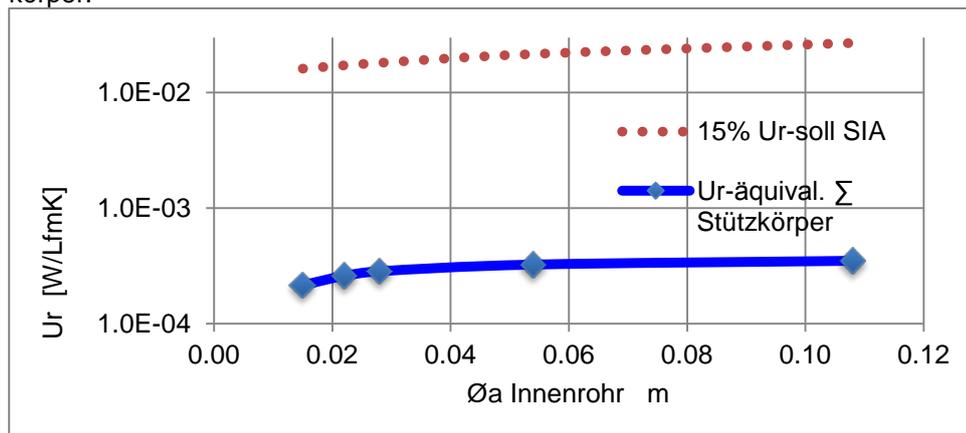


Fig. 13 Totaler Wärmedurchgangskoeffizient  $U_r$  [W/LfmK] der Stützkörper bei Abstand 1.5 m

Das äquivalente  $U_r$  durch die Summe der Stützkörper liegt zwischen  $2 \cdot 10^{-4}$  und  $3.5 \cdot 10^{-4}$  W/LfmK. Wenn man sich vor Augen führt, dass unsere extreme Anforderung (15%  $U_r$ -soll SIA) an das gesamte  $U_r$  eines VSI-Rohres (siehe Fig. 4) zwischen  $1.5 \cdot 10^{-2}$  und  $3 \cdot 10^{-2}$  W/LfmK liegt, sieht man, dass diese Werte hervorragend sind. Sie liegen in der Grössenordnung von 1% der angestrebten Extremforderung und sind damit in erster Näherung vernachlässigbar.

### 2.1.3.2 Wandstärken

Für die wasserführenden VSI-**Innenrohre** ist klar, dass sie auch in den Wandstärken der Norm genügen müssen. Tab. 7 zeigt die heute üblichen Rohrwandstärken von Installationsrohren aus Stahl, welche allen Anforderungen bezüglich des Wasserdruckes genügen. Zusätzlich sind die, sich in verschiedenen Kommentaren zur Norm findenden "üblichen" Rohrschellenabstände zur Aufhängung der Normrohre angegeben.

Rohr-Ø aus- sen $D_a$ [mm]	15	18	22	28	35	42	54	64	76.1	88.9	108
Rohrwand- stärke [mm]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2	2	2
Rohrschellen- abstände [m]	2.25	2.75	3	3.5	3.75	4.25	4.75	5.5	6.1	6.7	7.5

Tab. 7 Übliche Wandstärken und Rohrschellenabstände von Installationsrohren aus Stahl

Diese von der Norm verlangten Wandstärken der Innenrohre sind so gross, dass sie allen Anforderungen bezüglich Luftdruck und Durchbiegung per se genügen. Wir konzentrieren uns deshalb auf die Aussenrohre.

#### Die VSI-**Aussenrohre**:

- müssen dem von aussen auf sie wirkenden Luftdruck ( $0.1 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $100'000 \text{ N/m}^2$ ) standhalten ohne zu beulen. Dies ist mit den in Tab. 8 gewählten Wandstärken der Aussenrohre nach unseren Berechnungen bezüglich Beulen gewährleistet.
- dürfen sich unter dem Gesamtgewicht von Innen- und Aussenrohr nur so wenig durchbiegen, dass die radiale Verschiebung zwischen Innen- und Aussenrohr im schlimmsten Fall so klein ist, dass im verbleibenden Spalt noch genügend Raum für die strahlungsmindernden Folien bleibt. Dies ist sicher der Fall, wenn die verbleibende Spaltweite grösser als 10 mm ist. Tab. 8 zeigt die berechneten Abmessungen entsprechender VSI-Rohre.

Øa-Innenrohr	15	18	22	28	35	42	54	64	76.1	88.9	108
<b>Stärke Innenrohr (Norm)</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>						
VSI Spalt gewählt	13	13	14	14	14	15	15	17	18	19	20
Øa-Aussenrohr	41.7	44.7	50.8	56.8	64.0	73.2	85.4	99.4	113.9	128.9	150.4
<b>Stärke Aussenrohr berechnet (kein Beulen)</b>	<b>0.35</b>	<b>0.35</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>	<b>1</b>	<b>1.2</b>
Abstand Rohrschellen = Stützkörperabstand gewählt	2100	2200	2600	2800	3200	3400	3800	4300	4700	5200	5800
Durchbiegung Innenrohr	0.7	0.6	0.9	0.8	1.0	0.9	1.0	3.2	3.8	4.4	5.4
Durchbiegung Aussenrohr	0.3	0.3	0.5	0.7	1.0	1.0	1.2	1.8	1.8	2.2	2.6
worst case radiale Verschiebung Innen-Aussenrohr	1.0	1.0	1.4	1.5	2.0	1.9	2.3	5.0	5.6	6.7	8.0
Verformung Stützkörper	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
<b>Spaltweite verbleibend</b>	<b>10.5</b>	<b>10.5</b>	<b>11.1</b>	<b>11.0</b>	<b>10.5</b>	<b>11.6</b>	<b>11.2</b>	<b>10.5</b>	<b>10.9</b>	<b>10.8</b>	<b>10.5</b>

Tab. 8 Beispiel der notwendige Abmessungen und der Durchbiegungen unter Eigengewicht eines Stahl-Stahl VSI-Rohrs (alle Masse in mm)

Zur Berechnung des schlimmsten Falles der radialen Verschiebung zwischen Innen- und Aussenrohr wurde angenommen, die Stützkörper lägen genau mittig zwischen den Rohrschellen an welchen das VSI-Rohr aufgehängt ist. In diesem Falle ist die radiale Verschiebung am schlimmsten Punkt – dem Ort der Rohrschellen – die Summe aus der gesamten Durchbiegung des Aussenrohrs plus der Durchbiegung des Innenrohrs plus der Verformung der Stützkörper (=1.5 mm). Die Durchbiegung des Innenrohrs ergibt sich dabei durch die Linienlast aus Eigen- und Wassergewicht. Die Durchbiegung des Aussenrohrs ergibt sich aus der Linienlast des Eigengewichts und der Einzellast des gesamten Gewichts des Innenrohrs.

Die mit den Werten der Tab. 8 auf diese Weise berechneten verbleibenden Spaltweiten am schlechtesten Punkt liegen zwischen 10 und 11 mm und sind somit genügend gross. Auch die Durchbiegungen des Aussenrohrs sind mit weniger als 1 mm bei den Rohren mit kleinem Durchmesser und weniger als 3 mm bei grossen Durchmessern genügend klein. Um dies zu erreichen wurden die Rohrschellen- und mit diesen die Stützkörper-Abstände - kleiner gewählt als die der Norm entsprechenden (vergleiche Tab. 7 und Tab. 8).

Eine zusätzliche, wesentliche Aussage von Tab. 8 ist, dass zum Einhalten der genannten kleinen Durchbiegungen kleine Wandstärken der Stahl VSI-Aussenrohre von 0.35 bzw. 1.2 mm genügen. Dies ist nicht nur wesentlich für das Gesamtgewicht, sondern wirkt sich auch auf den Preis von VSI-Rohren entsprechend positiv aus.

### 2.1.3.3 Aufhängung gesamtes VSI-Rohr

Die Aufhängung der VSI-Rohre soll nach Möglichkeit mit den, beispielsweise mit Schaumstoffeinlagen versehenen, handelsüblichen Rohrschellen für Norm-Wasserrohre geschehen. Diese Rohrschellen müssen das Aussenrohr des VSI-Rohres in maximalen Abständen umfassen, welche der Zeile "Abstand Rohrschellen gewählt" in Tab. 8 entsprechen. Die in Tab. 8 gezeigten Aussendurchmesser der VSI-Rohre liegen nicht weit von diesen Normdurchmessern, so dass es - allenfalls unter Einsatz zusätzlicher weicher Halbschalen - möglich scheint Norm-Rohrschellen zu verwenden.

### 2.1.3.4 Dilatation

Tab. 9 zeigt die Abschätzung der grössten anzunehmenden Dilatation zwischen dem Innen- und dem Aussenrohr eines VSI-Warmwasserrohres bei verschiedenen Material Kombinationen.

Material		Ausdehnungskoeff.		Temperatur			Dilatation [mm / m]
Innenrohr	Aussenrohr	Innenrohr	Aussenrohr	bei Montage °C	Innenrohr °C	Aussenrohr °C	
Austenit	Austenit	1.80E-05	1.80E-05	20	95	0	1.17
Austenit	C-Stahl	1.80E-05	9.00E-06	20	95	0	1.53
Austenit	Aluminium	1.80E-05	2.30E-05	20	95	0	1.81

Tab. 9 grösste anzunehmende Dilation zwischen Innen- und Aussenrohr eines VSI-Warmwasserrohres

Das Innenrohr ist immer austenitischer Stahl, während beim Aussenrohr die 3 Möglichkeiten austenitischer Stahl, C-Stahl und Aluminium betrachtet werden. Die worst-case Annahme ist eine Montage des VSI-Rohres bei 20°C mit anschliessender Erwärmung des Innenrohrs auf 95°C und Abkühlung des Aussenrohrs auf 0°C. Es ergeben sich Dilatationen von 1 bis 1.8 mm / m. Wenn man weiter annimmt, die grösste Rohrlänge zwischen Elementen, welche die Dilatation aufnehmen können, sei 6 m, müssen dort bis zu knapp 11 mm Längenunterschied zwischen Innen- und Aussenrohr aufgefangen werden.

Dies ist eine nicht zu vernachlässigende Aufgabe.

Wir gehen bei der ersten im Abschnitt "2.1.1 Gesamtaufbau" gezeigten Möglichkeit "**durchgehender Vakuumpalt**" davon aus, dass einzelne VSI-Rohrabschnitte mittels Fittings miteinander verbunden

werden. Damit ist es der Ansatz der Wahl, diese Fittings so zu gestalten, dass sie die Dilatation übernehmen können. Fig. 14 zeigt eine entsprechende Skizze.

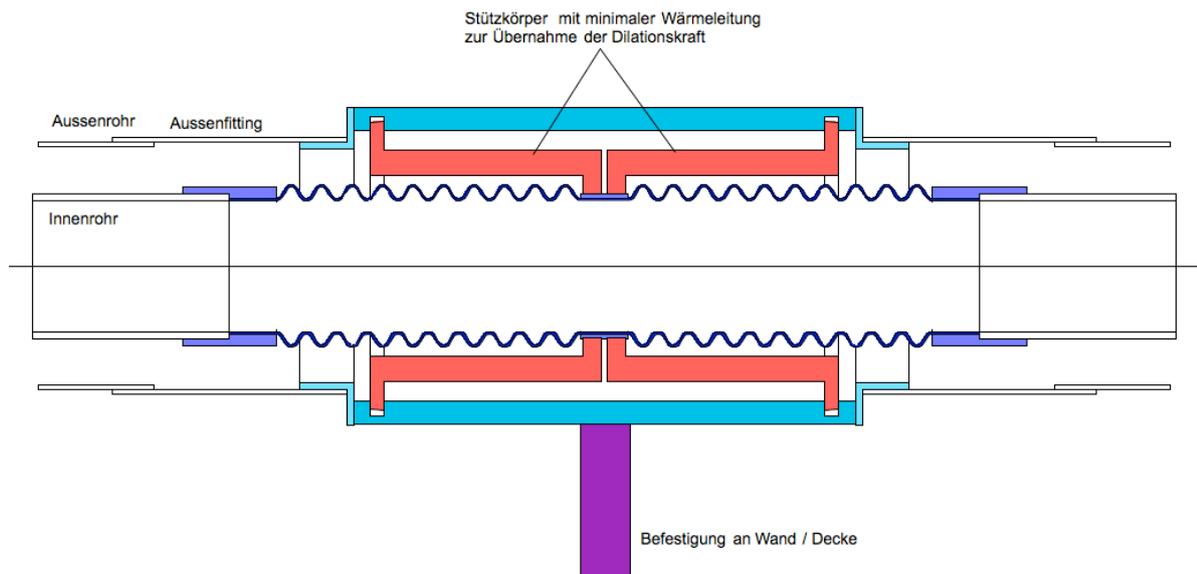


Fig. 14 Mögliche Form von die Dilatation übernehmenden Fittings

Es ist klar, dass derartige Fittings grosse Dilatationswege der heissen Innenrohre übernehmen können, ohne dass sich die Aussenrohre bewegen. Dies kann bei der Installation ein deutlicher Vorteil gegenüber konventionell isolierten Warmwasserrohren sein, weil auf den Einbau von Dilationselementen gegenüber Wänden und Decken verzichtet werden kann. Natürlich sind auch andere Bauweisen denkbar, auf die wir aber an dieser Stelle nicht eingehen. Offensichtlich ist auch, dass es sich bei Fig. 14 nur um eine grobe Skizze handelt, bei welcher beispielsweise nicht klar wird, auf welche Weise die Fittings gasdicht mit dem Innen- bzw. Aussenrohr verbunden werden. Auf diese Problematik werden wir in Abschnitt 2.1.5 eingehen.

Bei der zweiten bzw. dritten im Abschnitt "2.1.1 Gesamtaufbau" gezeigten Möglichkeit "**segmentierter Vakuumpalt**" bzw. "**VSI-Hüllrohre**" muss jeweils der halbe Dilatationsweg an den beiden Enden des Vakuumpalts - also dort wo Innen- und Aussenrohr gasdicht miteinander verbunden sind - übernommen werden. Dies verteuert die Herstellung derartiger Rohre merklich.

### 2.1.3.5 Endverschluss

Als Endverschluss bezeichnen wir eine vakuumdichte Verbindung zwischen Innen- und Aussenrohr eines VSI-Rohres.

Bei der ersten Realisierungs-Möglichkeit einer VSI-Warmwasserleitung mit **durchgehendem Vakuumpalt** (2.1.1.1, Fig. 5) sind Endverschlüsse des Vakuumpalts lediglich an den Übergängen zu nicht isolierten Rohren notwendig. Dies ist der Fall bei den Anschlüssen an den Boiler und die Ausstoss-Leitungen.

Da dies relativ wenige Orte sind, ist es eine einfache Möglichkeit Innen- und Aussenrohr an diesen Stellen miteinander zu verschweissen. Dieser Einfach-Aufbau kann durch ein, die Verbindungsstelle überlagerndes - beispielsweise 20 cm langes Stück konventionellen Dämmstoffes - thermisch erheblich verbessert werden.

Eine Minimierung des unerwünschten Wärmeübergangs bei den Endverschlüssen ist mit einem in Fig. 15 skizzierten Ansatz realisierbar, der im Falle einer VSI-Warmwasserleitung mit **durchgehendem Vakuumpalt**, einem werkseitig gefertigten End-Fitting entspricht.

Der – mit dunklem Blau gekennzeichnete – äussere Teil des skizzierten Endfittings besteht aus zwei konzentrischen Stahlrohrteilen welche mit einem, wenig wärmeleitenden, Stützmaterial (grau) in Position gehalten werden und mit einer Folie (rot) vakuumdicht verbunden sind. Das innere der beiden Stahlrohrteile ist mit dem inneren VSI-Rohr beispielsweise verschweisst. Das rechte Ende des inneren VSI-Rohres entspricht beispielsweise dem Ende eines marktüblichen Pressfittings. Das genannte Stützmaterial (grau) kann beispielsweise ein ringförmiges Element aus gepresster pyrogener

Kieselsäure sein. Die Folie kann ein ringförmiges Element aus 10 bis 20  $\mu\text{m}$  dicker Stahlfolie oder eine andersartige dichte Folie sein. Die vakuumdichte Verbindung zwischen den beiden blau gezeichneten Stahlteilen und der Folie kann beispielsweise mit Verkleben oder Verlöten geschehen.

Bei geeignetem Aufbau kann auf diese Weise ein äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient  $U_r$  über Folie und Stützmaterial von lediglich  $0.02 \text{ W/LfmK}$  realisiert werden, wobei die massgebende Länge der mittlere Umfang der ringförmigen Folie ist. Da bei der direkten Verschweissung von einem  $1 \text{ mm}$  starken Aussenrohr mit dem Innenrohr ein Wärmeübergang von ca.  $1.5 \text{ W/LfmK}$  resultiert, ist offensichtlich dass ein Fig. 15 entsprechender Aufbau eine Verbesserung um ca. den Faktor 75 ergeben würde.

Ob sich der deutlich grössere Aufwand allerdings "rechnet" muss in Zukunft noch abgeschätzt werden.

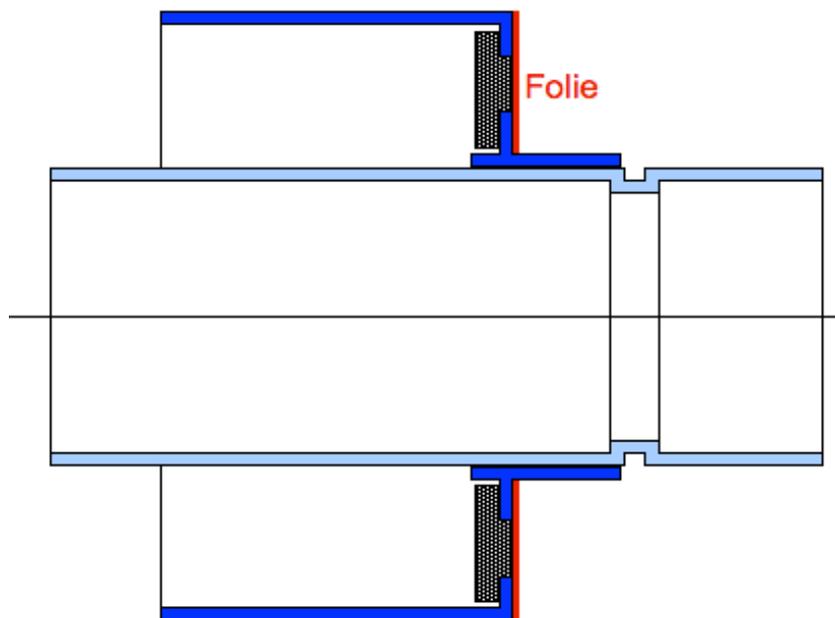


Fig. 15 Skizze Endverschluss mit minimiertem Wärmeübergang

Es ist offensichtlich, dass bei der zweiten Realisierungsmöglichkeit einer VSI-Warmwasserleitung mit **segmentiertem Vakuumpalt** (2.1.1.2, Fig. 6) Endverschlüsse des Vakuumpalts je zweimal an allen Segmentübergängen auftreten. Daher spielt der Wärmeübergang bei diesen Endverschlüssen eine entscheidende Rolle und die Verwendung einer Lösung, welche der in Fig. 15 skizzierten entspricht, ist naheliegend.

Weiter ist klar, dass bei einem segmentierten Vakuumpalt an den offenen Rohrstücken zwischen den Endverschlüssen der VSI-Spalte grosse Wärmemengen direkt an die Umgebung abgegeben würden, wenn dort nicht ein überlappendes zusätzliches Isolationselement vorhanden wäre.

Wir werden auf diese beiden Punkte im nächsten Abschnitt ausführlich eingehen.

#### 2.1.4 Übergang zum nächsten Rohr mit minimiertem Wärmeverlust

Im Falle einer VSI-Warmwasserleitung mit **segmentiertem Vakuumpalt** (2.1.1.2, Fig. 6) treten Endverschlüsse des Vakuumpalts je zweimal an allen Segmentübergängen auf. Zusätzlich verläuft das, heisse Wasser führende, innere Rohr zwischen den beiden VSI-Segmenten (vorerst) ohne thermische Isolation. Dadurch entstehen an diesen Übergängen derart grosse Wärmeverluste, dass das gesamthaft resultierende  $U_r$  [ $\text{W/LfmK}$ ] nicht wesentlich besser und unter Umständen schlechter ist, als der von der Norm (SIA 385/1) geforderte Sollwert (siehe Fig. 1). Fig. 16 zeigt den Vergleich der SIA-Sollwerte mit einer segmentierten VSI-Leitung mit nicht isoliertem Übergang von Segment zu Segment. Dabei wurde angenommen, dass ein solcher Übergang im Mittel jeden 2ten Meter stattfindet und die nicht isolierte heisse Strecke  $0.25 \text{ m}$  lang sei.

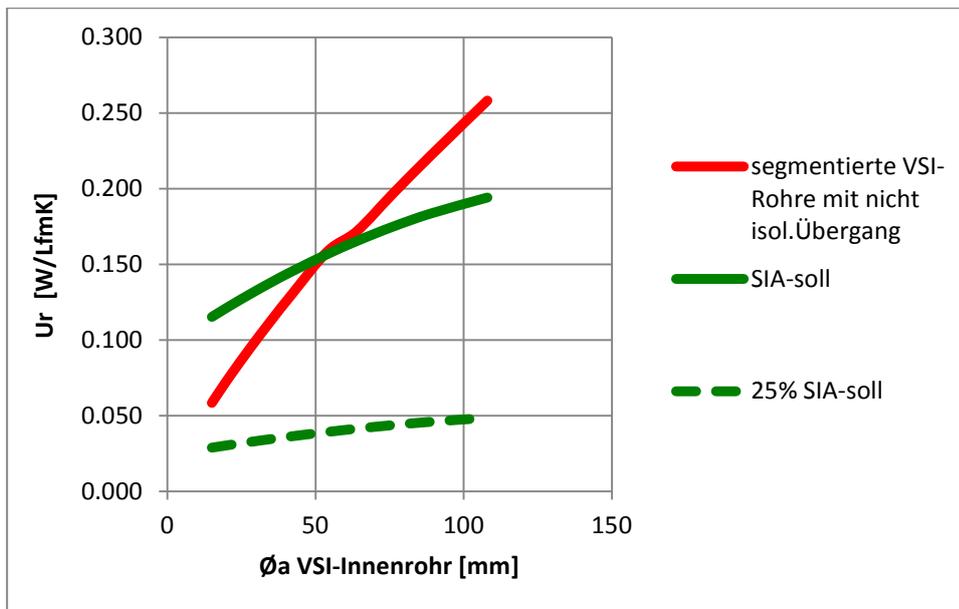


Fig. 16 geschätztes, äquivalentes  $U_r$  [W/LfmK] einer segmentierten VSI-Leitung ohne VSI-Überlappungsstücke

Fig. 16 macht deutlich, dass eine solche Lösung absolut unbefriedigend ist.

Um dies zu verbessern ist es zwingend notwendig, eine diese thermische Schwachstelle überdeckende zusätzliche Isolationshülle einzuführen. Diese darf nicht nur die nicht isolierte Strecke zwischen den Segmenten überdecken, sondern muss auch noch einen Teil der VSI-Isolation überlappen.

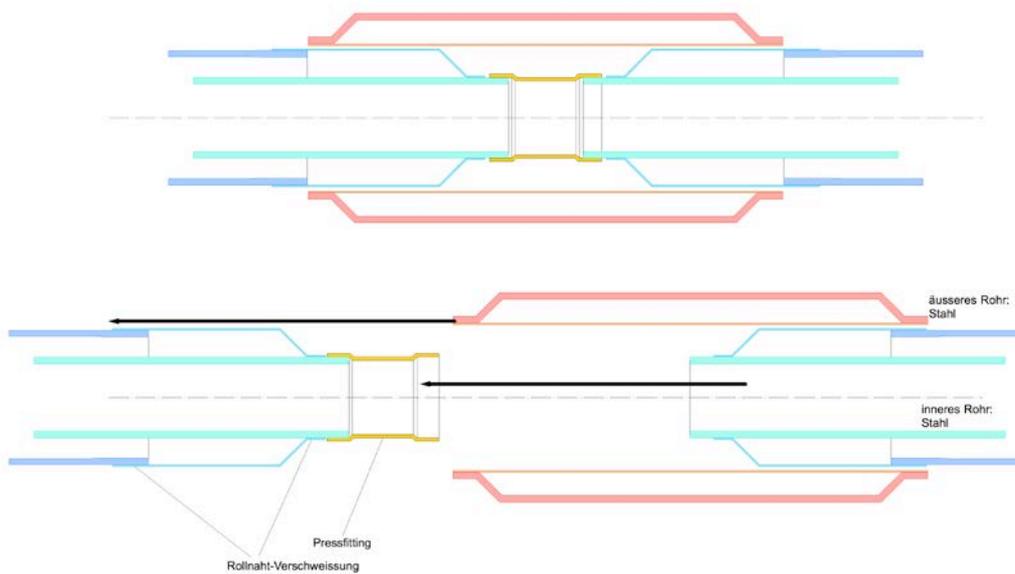


Fig. 17 segmentierte VSI-Leitung mit Überlappungsstück und handelsüblichem Pressfitting

Fig. 17 zeigt die Skizze eines entsprechenden Ansatzes, oben in fertig montiertem Zustand, unten in einem Zustand, wo ein Standard Pressfitting bereits auf dem linken VSI-Rohr verpresst, die restlichen Komponenten aber noch nicht montiert sind. Ausgehend von diesem Zustand wird zunächst das rechte VSI-Rohr in das Pressfitting eingeschoben und verpresst. Danach wird das rot dargestellte VSI-Überlappstück in Endposition geschoben. Das Standard Pressfitting ist beispielsweise 10 cm lang, so dass ein nicht isolierter Abstand von ca. 15 cm Länge zwischen den VSI Segmenten entsteht. Die beidseitige Überlappung sollte je mindestens 10 cm betragen, was eine totale Länge des VSI-Überlappungsstückes von mindestens 35 cm ergibt. Das Aussen- bzw. Innenrohr des VSI-

Überlappstück hat beispielsweise 1 mm bzw. 0.2 mm Wandstärke. Bei den skizzierten VSI-Rohren sind die entsprechenden Wandstärken im Endbereich beispielsweise aussen 0.5 mm und innen 1.5 mm (=Normwert).

Die rote Kurve von Fig. 18 zeigt die mittels analytischer Methode abgeschätzten Gesamt Ur [W/LfmK] die sich für eine lange VSI-Rohrleitung mit unterschiedlichen Innenrohr-Durchmessern ergeben, wenn man annimmt, dass im Mittel jeweils nach 2 m ein der obigen Lösung entsprechender Übergang mit Überlappung vorhanden sei.

Die deutliche Reduktion von Ur im Bereich  $\varnothing a = 60$  [mm] stammt daher, dass in den Berechnungen angenommen wurde bis dorthin sei eine strahlungsmindernde Aluminiumfolie im Vakuumpalt vorhanden und bei grösseren Durchmessern seien es 2 Folien.

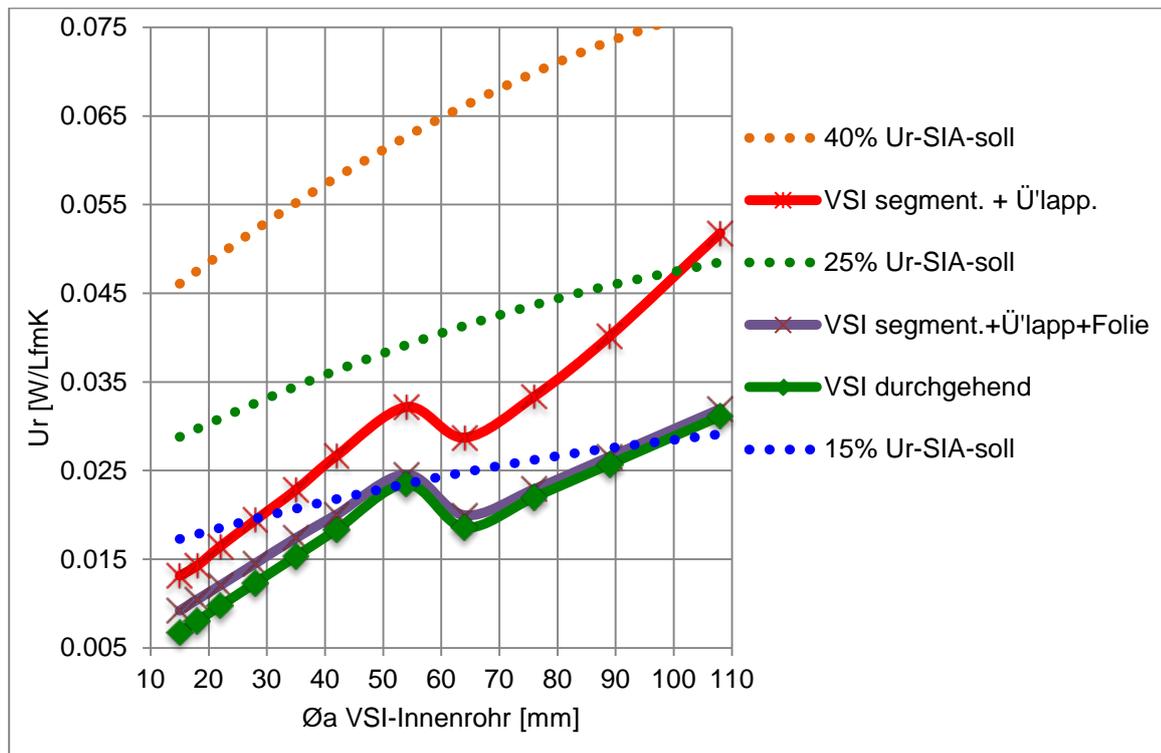


Fig. 18 Gesamt-Ur [W/LfmK] verschieden aufgebauter langer VSI-Leitungen

Zum Vergleich zeigt Fig. 18 (grüne Kurve) zusätzlich das entsprechend abgeschätzte, mit durchgehendem Vakuumpalt erreichbare Gesamt-Ur.

Es ist deutlich erkennbar, dass die Wärmeverluste der segmentierten VSI-Rohre auf diese Weise ca. 150% derjenigen einer Leitung mit durchgehendem Vakuumpalt betragen.

Interessant ist auch, dass mit durchgehendem Vakuumpalt unsere extreme Zielsetzung ( $Ur \leq 15\%$  der SIA-Sollwerte) deutlich unterschritten werden kann, während eine segmentierte VSI-Rohrleitung sich im Bereich der als gut bezeichnete Forderung ( $Ur \leq 25\%$ -des SIA-Sollwerte) bewegt.

Die Situation kann für segmentierte VSI-Rohrleitungen dadurch verbessert werden, dass man den Überlappungs-Ansatz mit dem in Fig. 15 skizzierten Folienübergang an den Enden des VSI-Spaltes kombiniert.

Auf diese Weise erhält man die in Fig. 18 violett gezeichnete Kurve. Damit ist klar, dass mit einem entsprechend höheren Fertigungsaufwand theoretisch eine, thermisch dem durchgehenden Vakuumpalt gleichkommende, Lösung für segmentierte VSI-Leitungen machbar ist. Zwingend dafür ist, dass Längenanpassungen der VSI-Rohrsegmente - werkseitig oder in der Werkstatt des Installateurs - so geschehen, dass auch an den neu entstehenden Enden des VSI-Spaltes der Folienübergang vorhanden ist.

Eine Längenanpassung vor Ort ist aus unserer Sicht nur so machbar, dass dabei eine direkte Verbindung zwischen Aussen- und Innenrohr entsteht (siehe Fig. 20). Wenn man aber davon ausgeht, dass eine Längenanpassung bei höchstens der Hälfte der verwendeten Rohre notwendig ist und dass bei den entsprechenden Übergängen jeweils nur auf einer Seite die viel Wärme leitende direkte Verbindung vorhanden ist, wird sich auch in diesen Fällen ein Gesamt-Ur einstellen, welches in der Nähe der gezeigten violetten Kurve liegt.

## 2.1.5 Verbindung von VSI-Rohr zu VSI-Rohr

Für die Verbindung der wasserführenden Innenrohre von **segmentierten VSI-Rohrleitungen** steht fest, dass diese mit heute üblichen am Markt erhältlichen Fittings zu erfolgen hat. Die oben besprochene Fig. 17 hat diesen Ansatz am Beispiel Pressfittings bereits verdeutlicht.

Dies ist für die Möglichkeit mit **durchgehendem Vakuumspalt** nicht möglich: Die am Markt erhältlichen Fittings sind zwar sogar für Gasleitungen erhältlich und in dieser Ausführung natürlich auch "gasdicht", weisen aber eine – für den Einsatzbereich dieser Fittings sehr gute – Leckrate von ca.  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar\*L/sec auf. Wie bei der Besprechung von Fig. 12 gezeigt, reicht dies bei Weitem nicht für die Ansprüche von Hochvakuum.

Es müssen also neue Ansätze zur Verbindung der in diesem Falle an beiden Enden offenen doppelwandigen VSI-Rohre entwickelt werden. Da dies den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde, gehen wir im Folgenden nur ansatzweise darauf ein.

Zu diesem Zwecke muss zunächst das prinzipielle Vorgehen zur Erstellung einer VSI-Rohrleitung mit durchgehendem Vakuumspalt erklärt werden:

Die offenen VSI-Rohre werden vom Hersteller auf das Vakuum vorbereitet geliefert. Dies bedeutet vor allem, dass Aussen- und Innenrohr vakuumseitig absolut sauber und vor allem so vorbereitet sind, dass ihre Ausgasrate  $\leq 1 \cdot 10^{-11}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec) ist. Damit dieser Zustand auch nach längerer Lagerzeit (z.B. einige Monate) noch vorhanden ist, kann der Vakuumspalt werkseitig mit einem Schutzgas (z.B. N<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub>) gefüllt und dann mit einer Plastik-Kappe verschlossen sein.

Zunächst erfolgt dann die Erstellung des Leitungssystems wie heute durch den (kleinen) Installateur:

- Längenanpassung der VSI-Rohre ähnlich einfach wie heute bei Stahlrohren (sauberer Schnitt durch Aussen- und Innenrohr ist genügend gut).
- Positionierung von VSI-Rohrkrümmern und VSI-Rohrabzweigern wie heute.
- Aufhängung des VSI-Leitungssystems mit den heute üblichen Rohrschellen.
- Vakuumdichte Verbindung der inneren Rohrabschnitte, Krümmer und Abzweiger mittels Spezialfittings und kostengünstigem Werkzeug mit ähnlich kleinem Arbeits-Aufwand wie heute mit Press-Fittings.
- Dichtheitsprüfung der inneren Leitung (z.B. mittels Wasserdruck).
- Vakuumdichte Verbindung der äusseren Rohrabschnitte, Krümmer und Abzweiger mittels Spezialfittings und kostengünstigem Werkzeug mit ähnlich kleinem Arbeits-Aufwand wie heute mit Press-Fittings.
- Resultat ist ein funktionsfähiges Leitungssystem mit schwacher thermischer Isolation.

Danach erfolgt die Erstellung des Vakuums durch den Installateur oder einen Spezialisten zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt:

- Abpumpen des Vakuumspalts auf  $\leq 1 \cdot 10^{-5}$  hPa (=mbar) beispielsweise mit einem sehr preiswerten, kleinen Turbomolekular-Pumpstand. Die Pumpzeit ist theoretisch immer  $\leq 8$  h (siehe Fig. 24). Zu empfehlen sind aber, wegen einer weiteren Verbesserung der Ausgasraten, 24 h.
- Schliessen des Abpumpventils und Abbau der Pumpe und des Drucksensors.
- Öffnen des Getter-Ventils und allenfalls aktivieren des Getters durch kurzes Beheizen mit Heissluft. Der Getter erhält dann diesen Unterdruck während mindestens 50 Jahren aufrecht.
- Resultat nach einigen Stunden ist ein funktionsfähiges Leitungssystem mit sehr guter thermischer Isolation.

Damit, wie oben beschrieben, zunächst alle Innenrohre miteinander verbunden und die Dichtheit der inneren Rohrleitung geprüft werden kann, muss der Übergangsbereich ähnlich aussehen wie in Fig. 19 gezeigt. Die Aussenrohre müssen deutlich kürzer als die Innenrohre und die dementsprechend deutlich längeren Aussenfittings müssen gegen das Aussenrohr verschiebbar sein.

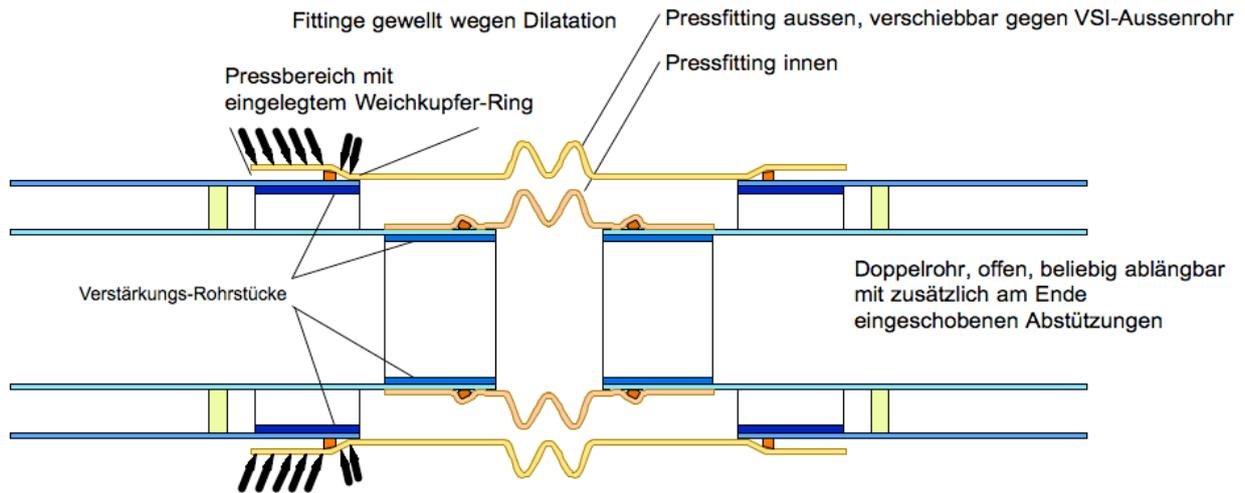


Fig. 19 Mögliches Fitting für eine VSI-Leitung mit durchgehendem Vakuumspalt

In Fig. 19 gehen wir davon aus, dass die vakuumdichte Verbindung mittels – zu entwickelnden – Pressfittings erfolgt. Die Fittings sind so gestaltet, dass sie an geeigneter Stelle einen Weichkupfer-ring aufnehmen können, welcher durch die Verpressung des Fitting so stark deformiert wird, dass das Kupfer in einen konischen Spaltabschnitt einfließt und diesen damit vakuumdicht verschliesst. Fig. 19 skizziert dies am äusseren Rohr in nicht verpresstem und am inneren Rohr in verpresstem Zustand.

Das Vorgehen kann folgendermassen sein:

- Um die Presskräfte aufnehmen zu können, ist es notwendig, dass, zumindest bei dem relativ dünnwandigen Aussenrohr, zunächst ein Verstärkungs-Rohrstück eingeschoben und allenfalls soweit aufgeweitet wird, dass es aussen satt anliegt.
- Danach wird das Aussenfitting auf eines der beiden Aussenrohre so weit aufgeschoben, dass das der Bereich zwischen den Aussenrohren frei zugänglich ist. Dort verbleibt das Aussenfitting bis auf weiteres.
- Die VSI-Rohre werden zusammen mit dem Innenfitting in Position gebracht und das Innenfitting wird mit den Innenrohren verpresst.
- Nachdem diese 3 Schritte an allen Übergängen erfolgt sind wird, die Dichtheit des, wasserführenden, inneren Rohrsystems geprüft.
- Danach werden die Aussenfittings in Position geschoben und verpresst.

#### 2.1.6 Ablängbare VSI-Rohre

Im Falle einer VSI-Leitung mit **durchgehendem Vakuumspalt** kann ein Ablängen der doppelwandigen, an beiden Enden offenen VSI-Rohre im Sinne eines "Orbital-Sägens" geschehen, also beispielsweise so, dass das auf einer geeigneten Führung aufliegende Rohr im Prinzip unter dem Sägeblatt einer, sich auf dem Rohr abstützenden, Handkreissäge rotiert. Dies kann, mit einer kleinen Modifikation, auch bei einem VSI-Rohr, bei welchem Innen- und Aussenrohr beispielsweise nur in 2 m Abständen gegeneinander abgestützt sind, funktionieren. Folgendes Vorgehen ist möglich:

- Das Aussenrohr wird wie geschildert getrennt, ohne dabei das Innenrohr zu verletzen
- Die Restseite des Aussenrohrs wird zur Seite geschoben
- Das Innenrohr wird gegen das Aussenrohr im frei gewordenen Vakuumspalt abgestützt
- Das Innenrohr wird getrennt

Im Falle einer VSI-Leitung mit **segmentiertem, beidseitig verschlossenem Vakuumspalt** können die gewünschten Rohrlängen natürlich werkseitig oder in der Werkstatt des Installateurs erzeugt, verschlossen und evakuiert werden, was aber unter Umständen relativ unflexibel ist.

Deshalb ist es interessant, sich eine Lösung zu überlegen, mit welcher ein verschlossenes und evakuiertes VSI-Rohr – an möglichst vielen Orten - so abgelängt werden kann, dass das vorhandene Hochvakuum dabei nicht schlechter wird.

Offensichtlich kann dies nur funktionieren, wenn das Aussen- und/oder Innenrohr ringförmig so umgeformt wird, dass sich die beiden den Vakuumpalt bildenden Rohre ringförmig berühren und - beispielsweise mittels Verschweissen oder Verpressen - vakuumdicht miteinander verbunden werden können.

Weil sonst keine dichte Verschweissung oder Verpressung stattfinden kann, ist klar, dass in dem entsprechenden ringförmigen Bereich keine zusätzlichen Materialien, d.h. keine Stützkörper oder strahlungsmindernden Folien vorhanden sein dürfen.

Dies bedeutet, dass die angesprochene ringförmig Umformung nur an vordefinierten Stellen stattfinden kann, an welchen sicher keine störenden zusätzlichen Materialien im Vakuumpalt vorhanden sind.

Es ist wünschenswert, dass der Abstand dieser vordefinierten Stellen so klein ist, dass die, auf diese Weise möglichen, Abweichungen von der eigentlich gewünschten Rohrlänge, durch ein anpassbares Zwischenstück und das Überlappungsstück ausgeglichen werden können.

Zudem ist klar, dass die notwendige Verformung nicht zu stark sein darf. Dies bedeutet, dass die Veränderung des Rohrdurchmessers bei der ringförmigen Verformung nur einige wenige mm betragen darf.

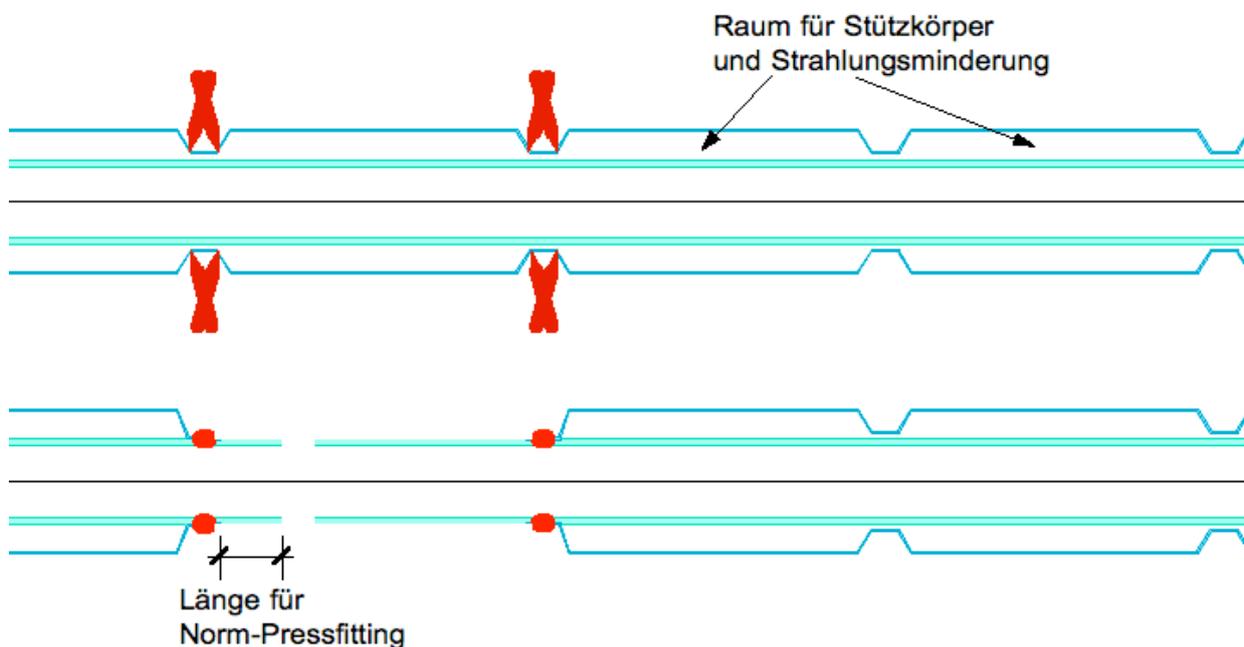


Fig. 20 Ohne Vakuumverlust ablängbares, verschlossenes und evakuiertes VSI-Rohr

Fig. 20 zeigt einen gangbaren Ansatz.

- Das Aussenrohr des evakuierte VSI-Rohres hat in regelmässigen (z.B. 5 cm) Abständen radiale beispielsweise 5 mm breite Verengungen mit konischen Flanken, so dass an diesen Stellen der Spalt zwischen Aussen- und Innenrohr z.B. nur noch ca. 3 mm beträgt. Im Bereich dieser Verengung sind keine zusätzlichen Materialien im Vakuumpalt.
- Die beiden rechts und links von der gewünschten Rohrlänge liegenden Verengungen werden mit Hilfe eines ringförmig einwirkenden Werkzeugs so umgeformt, dass das Aussenrohr hart am Innenrohr anliegt. Dabei werden die konischen Flanken der Verengung lediglich in die Senkrechte gebogen, während der Boden der Verengung gedehnt wird.
- An beiden Stellen werden Aussen- und Innenrohr beispielsweise verschweisst oder mit einen zusätzlich von aussen über die Verengung geschnappten Pressring verpresst.
- Das Stück des Aussenrohrs zwischen diesen Verbindungen wird geöffnet und entfernt
- das Innenrohr wird so zwischen den beiden Verschweissungen getrennt, dass es exakt die gewünschte Länge hat.

Dies ist nur dann nicht exakt möglich, wenn die gewünschte Länge in den Bereich einer Verengung fällt. In diesem Fall muss das VSI-Rohr entsprechend kürzer geschnitten werden und das freie Innenrohr mit einem in der Länge anpassbaren Zwischenstück auf die gewünschte Länge gebracht werden. Ein solches Zwischenstück kann beispielsweise auf einer Seite einem Norm-Pressfitting entsprechen und auf der anderen Seite einem beispielsweise 10 cm langen ablängbaren Rohr. Damit dadurch keine nicht isolierten Stellen in der fertigen

segmentierten Rohr-Leitung entstehen, müssen entsprechend längere Überlappungsstücke zur Verfügung stehen.

### 2.1.7 Strahlungsminderung

In einer bereits zitierten, früheren Arbeit (Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte – Bauelemente für Vakuumpanels, Schlussbericht September 2013, Bundesamt für Energie BFE) hat Helbling Technik eine Möglichkeit zur Strahlungsminderung entwickelt, bei welcher eine dünne, z.B. 10 µm starke Aluminiumfolie auf einem Träger aufgebracht ist und diese Kombination in den Vakuumspalt eingebracht wird. Dass möglichst wenige Lagen derartig gestützter Aluminiumfolie notwendig sind, um den Wärmetransport durch Strahlung um einen bestimmten Faktor zu mindern, ist entscheidend, dass der genannte Träger möglichst wenig Wärme leitet. Es ist Helbling Technik gelungen einen, preiswerten Träger zu finden, der es mittels einer einzigen Aluminiumlage erlaubt, die Wärmestrahlung auf ca. ein Zehntel zu reduzieren.

Es ist selbstverständlich, dass dieses Prinzip für die zu entwickelnden VSI-Rohre angewendet werden soll. Fig. 21 zeigt die Prinzipskizze eines naheliegenden Ansatzes, der auch die Erzeugung mehrerer Lagen von Aluminiumfolie auf einfache Weise ermöglicht.

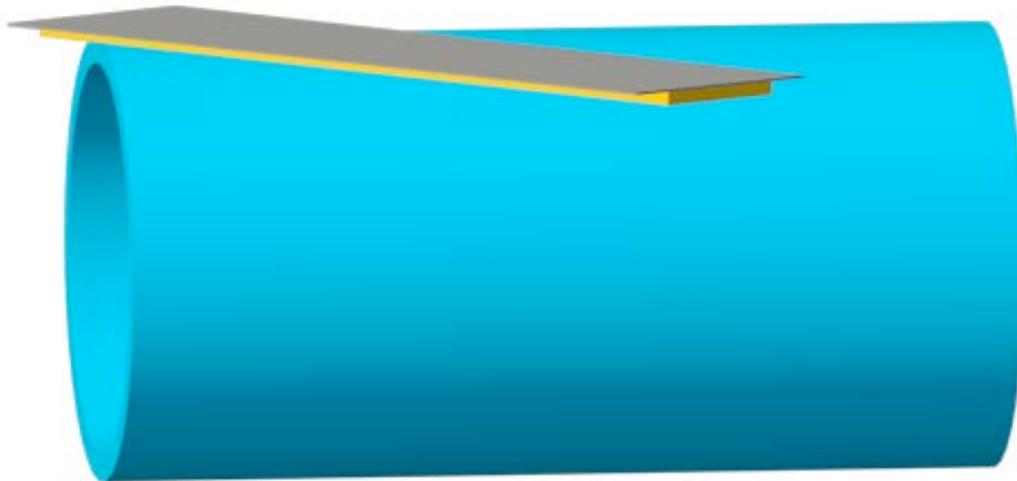


Fig. 21 Bandförmiger Aluminiumfolie-Träger Verbund zur Umwindung des inneren VSI-Rohres

Ein bandförmiger Verbund aus Aluminiumfolie und dem biegeschlaffen Trägermaterial umwindet Helix artig das Rohr. Die Aluminiumfolie des beispielsweise 5 cm breiten Verbundes steht beidseitig beispielsweise 1 cm über das Trägerband hinaus und die Ganghöhe der Umwindung ist so gewählt, dass sich das Aluminium aufeinanderfolgende Gänge beispielsweise um 5 mm überlagern.

### 2.1.8 Getter

Wir haben im Abschnitt 2.1.2.2 "Evaluation Ausgasen" klar gemacht, dass die Einbringung eines Getters in den Vakuumspalt der VSI-Rohre unabdingbar notwendig ist.

Ein Getter ist ein Material wie beispielsweise Zeolithe und bestimmte Metalloxyde, das in der Lage, ist Gase wie beispielsweise H<sub>2</sub>O-Dampf, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> usw. chemisch oder physikalisch zu binden und in diesem Sinne wie eine ständig arbeitende Vakuumpumpe wirkt, welche den Vakuum-Unterdruck auf dem gewünschten Niveau hält.

Wir gehen davon aus, dass mit vernünftigem Aufwand ein totaler, sich aus Leckage und Ausgasen zusammensetzender, Gaseintrag von  $\leq 1 \cdot 10^{-11}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec) erreichbar ist. Dies bedeutet, dass beispielsweise bei einer 50 m langen VSI-Leitung mit Nennweite 25 mm (DN25) unter Berücksichtigung der notwendigen Sicherheit eine totale Getterkapazität von 500 bis 1000 hPa\*L notwendig ist, um den gewünschten Unterdruck während 100 Jahren aufrecht zu erhalten.

Weil die Segmente sonst nicht mehr an "beliebigen" Stellen (siehe Fig. 20) abgelängt werden können, muss diese Getterkapazität bei einer **segmentierten VSI-Leitung** über die gesamte Länge der einzelnen Segmente verteilt sein. Es ist zu befürchten, dass dies sehr aufwendig ist.

Im Falle des **durchgehenden Vakuumspalts** ist es, wie in der Prinzipskizze für den durchgehenden Vakuumspalt (Fig. 5) angedeutet, theoretisch möglich, den Getter an einem einzigen Ort zu konzentrieren.

Bis zu welcher totalen Leitungslänge dies machbar ist, bzw. ab welcher Länge zusätzliche Getter anderen Orten notwendig sind, hängt vom Verhältnis des durch das Ausgasen erzeugten Druckanstiegs zu dem durch das Gettern erzeugten Druckabfall ab. Der Druckabfall ist wesentlich beeinflusst von der Getterraten [L/sec] oder von der, Leitwert [L/sec] genannten, Gasmenge welche ein VSI-Spalt mit bestimmter Querschnittsfläche und Länge maximal passieren lässt.

Bei langen Rohren ist dieser Leitwert in der Regel deutlich kleiner als die Getterraten und somit bestimmend. Fig. 22 zeigt die Druckverläufe von drei VSI-Leitungen mit DN25 und den Längen 50, 100 und 200 m. Dabei wurde jeweils angenommen, der gesamte Getter befindet sich an einem Rohrende.

Zur Abschätzung dieser Kurven wurde von einem bestimmten, am Markt erhältlichen Getter, einem Anfangsdruck von  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar (=hPa) und einer Anfangs-Ausgasrate von  $1 \cdot 10^{-11}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec) ausgegangen. In Fig. 22 ist deutlich erkennbar, dass bei dem 50 m langen VSI-Rohr von Anfang an mehr Gas gegettert als ausgegast wird. Beim 100 m langen Rohr stellt sich in den ersten Stunden ein geringer Druckanstieg auf ca.  $3 \cdot 10^{-5}$  mbar und danach ein langsamer Druckabfall ein. Beim 200 m langen Rohr steigt der Druck wegen dem dann sehr kleinen Leitwert des Rohres – zumindest in dem vom Getter weit entfernten Rohrteil - kontinuierlich an und überschreitet die Grenze von  $1 \cdot 10^{-4}$  mbar.

Als Schlussfolgerung kann man festhalten, dass bei der angenommenen Konstellation ein einzelner Getter beispielsweise am Übergang zum Boiler ausreicht um eine 100m lange Leitung dauerhaft auf dem gewünschten Unterdruck zu halten.

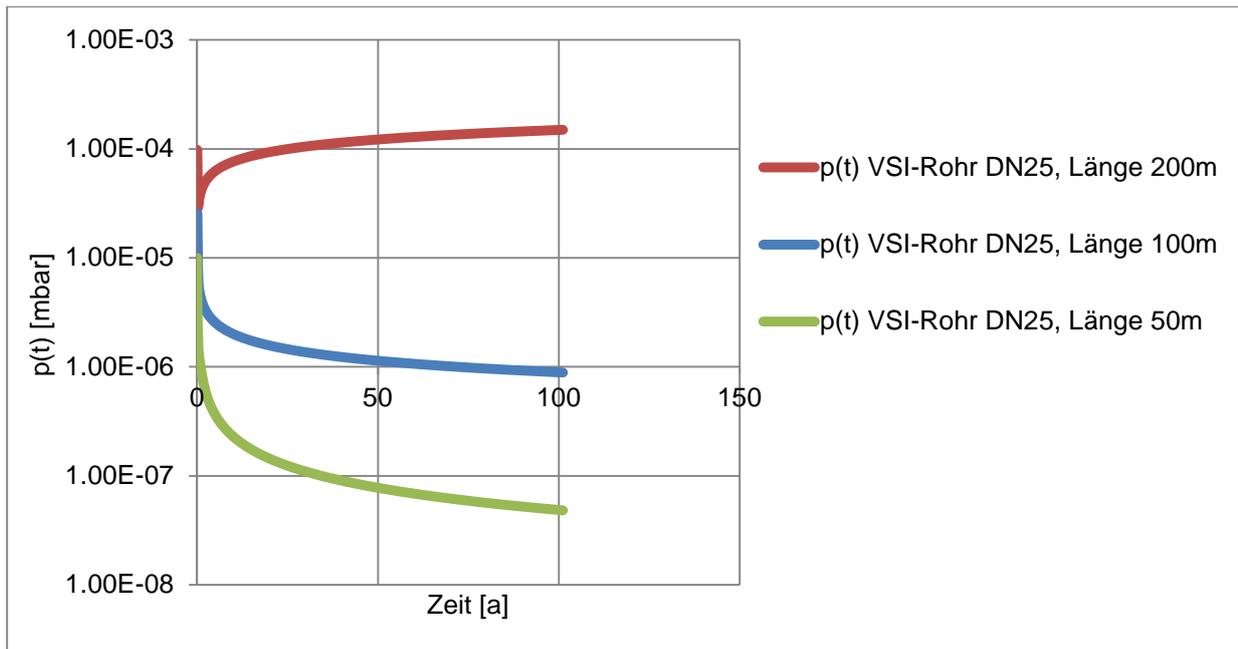


Fig. 22 Durch Ausgasen und Gettern bestimmte Druckverläufe langer VSI-Rohre mit DN25

In der Prinzipskizze für den durchgehenden Vakuumspalt (Fig. 5) ist weiter angedeutet, dass eine entsprechende Getter-Einheit mittels eines Ventils an die VSI-Leitung angeschlossen ist. Dies ist – aus unserer Sicht – nicht als technische Notwendigkeit, sondern wegen des sicheren Gefühls, den ein auswechselbarer Getter erzeugt, wünschenswert.

Im folgenden Abschnitt beschäftigen wir uns mit möglichen derartigen Ventilen.

## 2.1.9 Absaugöffnungen

Der überall verschlossene Vakuumpalt muss über eine geeignete verschliessbare Absaugöffnung evakuiert werden.

Im Falle **segmentierter VSI-Leitungen** muss eine solche Öffnung für jedes einzelne, in sich verschlossene, VSI-Rohr vorhanden sein. Um dadurch den Preis der Rohre nicht in die Höhe zu treiben, muss die verschliessbare Öffnung sehr einfach aufgebaut sein. Dies bedeutet, nach unserem momentanen Stand der Überlegungen, dass der Vorgang ein einmaliges, nicht wieder öffnbares Verschliessen sein muss und beispielsweise im Sinne von Verquetschen und/oder Verlöten eines dünnen Absaugstutzens erfolgen kann.

Im Falle von **VSI-Leitungen mit durchgehendem Vakuumpalt** muss, bei Leitungen bis 100 m Länge (siehe Abschnitt 2.1.10), nur eine einzige Absaugöffnung sowie ein entsprechendes Getterventil vorhanden sein. Diese kann deshalb in Form eines mehrfach öffnen- und verschliessbaren Ventils aufgebaut sein.

Natürlich muss ein solches Ventil nicht nur sehr preiswert sein, sondern es sollte auch eine geringe Leckrate  $< 1 \cdot 10^{-10}$  hPa\*L/sec aufweisen.

Ventile mit derartigen Leckraten sind am Markt vorhanden. Sie sind aber für unsere Zwecke viel zu gut, weil sie darauf ausgelegt sind, mindestens 1000 Verschliess-Öffnungs-Zyklen zu erlauben. Deshalb sind sie auch zu teuer.

Ein für unsere Zwecke geeignetes Ventil muss im Prinzip lediglich 2 bis maximal 10 Verschliess-Zyklen überstehen und kann deshalb wesentlich einfacher und billiger aufgebaut sein. Fig. 23 zeigt die Skizze eines denkbaren Ansatzes.

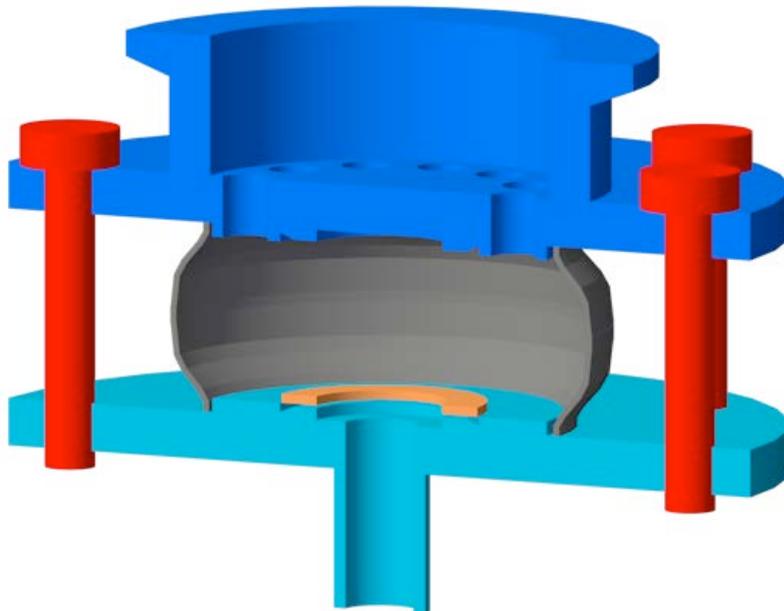


Fig. 23 Prinzipskizze eines kostengünstigen Ganzmetall-Ventils

Das Ventil besteht im Prinzip aus zwei nachträglich weiter bearbeiteten Standard CF-Blindflanschen. Der untere Blindflansch ist mittig durchbohrt und mit einem zur VSI-Leitung führenden Rohr verschweisst. Auf seiner oberen Seite – d.h. auf der Ventil-Innenseite – ist er so bearbeitet, dass ein flexibles Hüllelement (Balg) befestigt werden kann.

Der obere Blindflansch ist entlang eines konzentrisch um die CF-Dichtungsgeometrie verlaufenden Kreises mit Durchgangsöffnungen versehen. Ausserhalb derselben ist gegen oben ein Rohrstutzen angeschweisst, der an seinem Ende mit einem KF-Flansch zur Ankoppelung eines zur Pumpe führenden Absaugschlauches versehen ist.

In verschlossenem Zustand hat das Ventil über die Dichtungsgeometrie und den vorhandenen metallischen Dichtungsring die Dichtheit eines CF-Flansches und erfüllt damit unsere Forderung.

In geöffnetem Zustand fliesst die abzusaugende Luft durch die Bohrung im unteren Flansch in das flexible Hüllelement und dann durch die Durchgangsöffnungen im oberen Flansch zu dem Absaugschlauch.

Wir haben ein prinzipiell ähnlich konstruiertes Ventil gebaut und haben eine Leckrate von ca.  $5 \cdot 10^{-11}$  hPa\*L/sec reproduzieren können, womit das Ventil genügend gut ist.

### 2.1.10 Pump-Leistung und Zeit

Das Abpumpen von z.B. 6 m langen, verschlossenen VSI-Rohren für **segmentierte VSI-Leitungen** ist kein Problem und kann mit einem geeigneten Turbomolekular-Pumpstand innerhalb weniger Minuten hinunter auf ca.  $1 \cdot 10^{-6}$  hPa geschehen, wobei allenfalls viele VSI-Rohre gleichzeitig evakuiert werden können. Da der Preis eines entsprechenden Pumpstandes in diesem Fall über sehr viele Rohre abgeschrieben werden kann und deshalb nicht vorrangig ist, gehen wir nicht weiter auf diesen Fall ein.

Anders ist die Situation im Falle von VSI-Leitungen mit **durchgehendem Vakuumpalt**. Hier erfolgt die Evakuierung der gesamten Leitung nachdem diese im Gebäude installiert ist und sollte, wenn immer möglich, vom Installateur selbst durchgeführt werden können. Es geht also darum, den kostengünstigsten Pumpstand zu finden, mit welchem ein Unterdruck von mindesten  $1 \cdot 10^{-4}$ , besser  $1 \cdot 10^{-5}$  hPa (=mbar) erreicht werden kann.

Am Markt sind kleinste Turbomolekular-Pumpstände für einige 1000 CHF erhältlich. Das Pumpvermögen eines solchen Standes ist in jedem Fall  $> 40$  L/sec und die erreichbaren Enddrücke sind immer  $< 1 \cdot 10^{-5}$  hPa. Die Frage ist, ob ein solcher Stand für unsere Zwecke genügt.

Fig. 24 zeigt den Druckverlauf der sich unter Berücksichtigung des Ausgasens an einem Rohrende ergeben würde, wenn ein 100 m langes VSI-Rohr mit Nenndurchmesser 25 mm, am andern Rohrende mit einem solchen Pumpstand evakuiert würde. Der Vakuumpalt eines solchen Rohres hat (bei Molekularströmung) einen Leitwert von ca. 0.09 L/sec, womit das sehr viel höhere Pumpvermögen von untergeordneter Bedeutung ist.

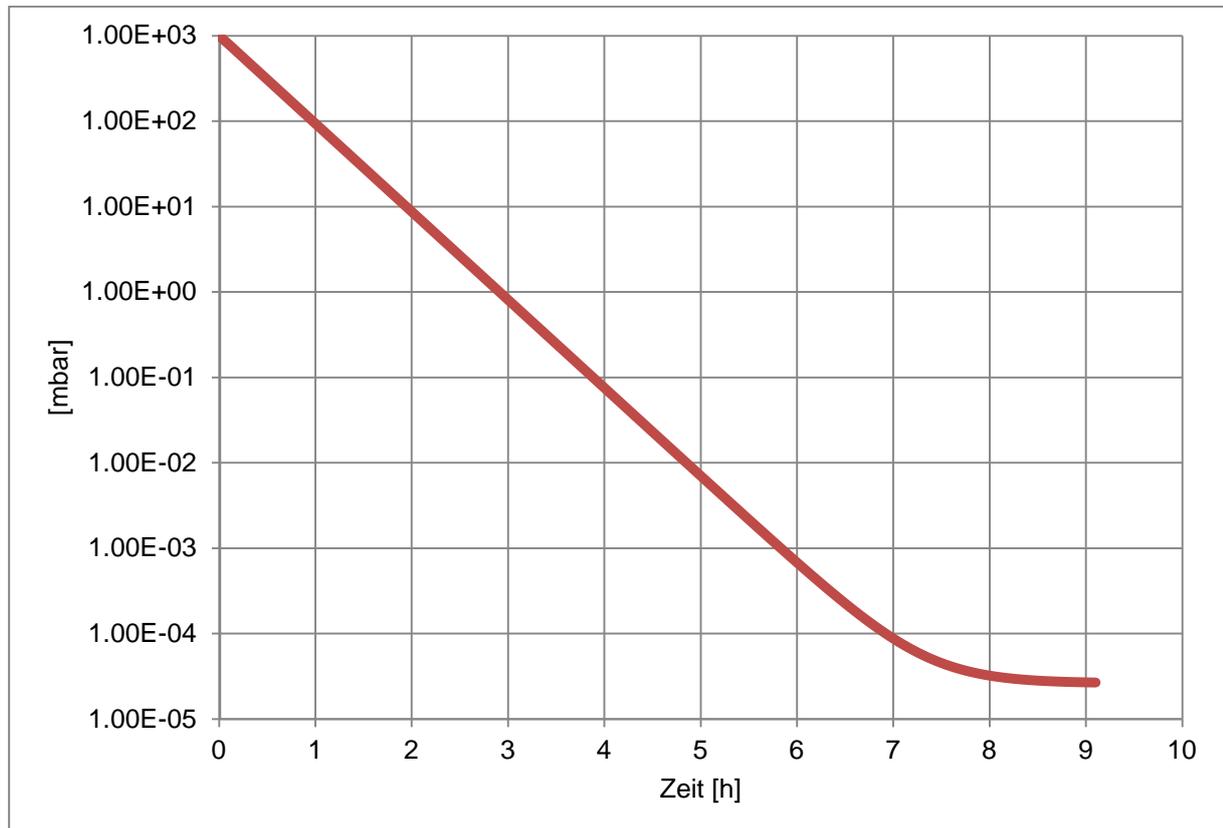


Fig. 24 Druckverlauf beim Evakuieren am Ende eines 100 m langen VSI-Rohres mit DN25

Die Kurve in Fig. 24 wurde unter Berücksichtigung einer hohen Ausgasrate von  $1 \cdot 10^{-11}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec) berechnet. Es ist sichtbar, dass ein genügend guter Unterdruck von ca.  $4 \cdot 10^{-5}$  hPa innerhalb von 8 Stunden erreicht ist. Bei der – durchaus realistischen – Annahme einer Ausgasrate von  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec) würde in derselben Zeitspanne ein Unterdruck von ca.  $4 \cdot 10^{-6}$  hPa erreicht. Damit ist klar, dass ein solcher Klein-Pumpstand für unsere Zwecke genügt.

### 2.1.11 Aufbau von VSI-Rohrkrümmern

Der Aufbau von VSI-Rohrkrümmern ist, wie in Fig. 25 ersichtlich, relativ einfach zu bewerkstelligen. Im Wesentlichen handelt es sich um zwei konzentrisch angeordnete, gebogene Rohre mit demselben Viertelkreis als Mittellinie. Die beiden Bauteile können einzeln gebogen, allenfalls an den Enden aufgeweitet und dann in einander geschoben werden. Sie werden durch die weiter oben diskutierten Stützkörper gegen einander in Position gehalten.

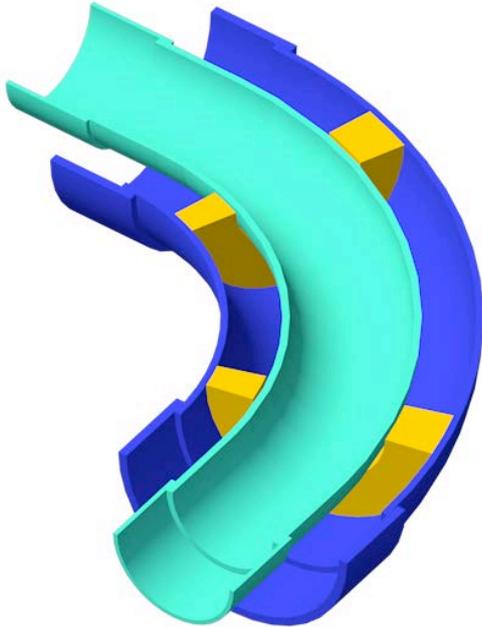


Fig. 25 Schnitt durch einen denkbaren VSI-Rohrkrümmer Aufbau

### 2.1.12 Aufbau von VSI-Rohrabzweigern

Fig. 26 zeigt die Prinzipskizze eines VSI-Abzweigers zu einer nicht isolierten Ausstossleitung, der im Wesentlichen im Innern aus einem Standard Abzweiger besteht, dem ein Aussenrohr übergestülpt ist, welches mit dem Abzweigerrohr des Innenstückes verschweisst ist.

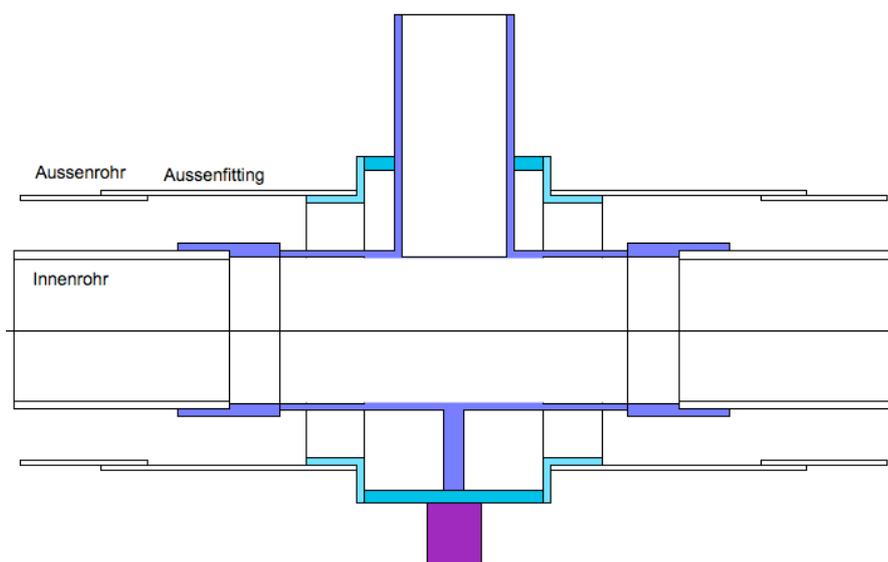


Fig. 26 VSI-Abzweiger zu Ausstossleitung zwischen VSI-Rohren

Unsere analytischen Abschätzungen (Tab. 10) zeigen zunächst einmal, dass ein solcher, relativ einfach und kostengünstig realisierbarer Aufbau thermisch zwar eine Verschlechterung gegenüber einer VSI-Leitung ohne Abzweiger bringt, dass diese aber tragbar ist.

	Abzweiger konventionell			VSI-Abzweiger		
über H <sub>2</sub> O zu Ausstossleitung	0.008	W/K	16.0%	0.008	W/K	11.1%
über Wand Abzweigerrohr	0.023	W/K	46.2%	0.061	W/K	85.4%
über Länge Abzweiger	0.019	W/K	37.8%	0.002	W/K	3.5%
Wärmeverlust pro Abzweiger	0.049	W/K	100.0%	0.071	W/K	100.0%
äq. Ur Leitung ohne Abzweiger	0.124	W/LfmK	100%	0.017	W/LfmK	13%
äq. Ur Leitung mit 1 Abzweiger/10m	0.129	W/LfmK	100%	0.024	W/LfmK	18%
Anteil $\Sigma$ Abzweiger	3.8%			30.0%		

Tab. 10 Wärmeverlust über Abzweiger konventionell isoliert bzw. mit VSI

Bei einer konventionell mit 40 mm PU isolierten DN25 Warmwasserleitung tritt eine Verschlechterung des äquivalenten Ur von 0.124 W/LfmK auf 0.129 W/LfmK ein, wenn alle 10 m ein ebenfalls mit 40 mm PU isolierter Abzweiger eingebaut wird.

Bei einer VSI-Leitung mit durchgehendem Vakuumspalt steigt Ur-äquivalent von 0.017 W/LfmK auf 0.024 W/LfmK, was ca. 13% bzw. 18% der entsprechenden konventionell gedämmten Leitung entspricht. Diese relativ grosse prozentuale Zunahme macht deutlich, dass es bei der Auslegung von VSI-Ringleitungen besonders wichtig ist, darauf zu achten, dass möglichst wenige Abzweiger verwendet werden müssen. Dies ist beispielsweise möglich, indem – wie in Fig. 1 angedeutet – pro Abzweiger über einen geeigneten Verteiler mehrere Ausstossleitungen angeschlossen werden.

Tab. 10 zeigt einen weiteren interessanten Zusammenhang. Der Wärmeverlust über die im Abzweigerrohr vorhandene stehende Wassersäule beträgt lediglich 10% bis 20% der gesamten Wärmeverluste über den Abzweiger. Dies macht weiterführende Massnahmen zweitrangig, mit welchen dieser Verlust über die Wassersäule – beispielsweise durch Verwendung eines aufwendigen, automatisch bei Öffnung des entsprechenden Wasserhahns betätigten, isolierten Schliessers – minimiert werden könnte.

## 2.2 Experimentelle Erprobung verschiedener Bauelemente

### 2.2.1 Rohre

Die Evaluation der Rohre kann sich auf die sehr aufwendige Bestimmung der Ausgasraten verschiedener Rohrmaterialien beschränken. Die entsprechenden Resultate liefern "automatisch" auch die Bestätigung der Dichtheit der Rohre.

Der entsprechende Messaufbau, das Vorgehen und die Resultate dieser Untersuchung wurden in Abschnitt 2.1.2.2 und Tabelle 6 ausführlich dargestellt und bestätigen, dass Edelstahlrohre und Aluminiumrohre in jeder Hinsicht genügend gut sind.

### 2.2.2 Stützkörper

Die experimentelle Erprobung der in Abschnitt 2.1.3.1 besprochenen Stützkörper hat sich auf folgendes beschränkt:

- Bestimmung der Deformation unter einer Belastung welche dem Eigengewicht des inneren, mit Wasser gefüllten Rohres entspricht. Es wurde bestätigt, dass diese Deformation in jedem Fall – wie berechnet - in der Grössenordnung von wenigen mm liegt.
- Bestimmung der Stossfestigkeit der Stützkörper. Es wurde bestätigt, dass die Stützkörper bei grossen Stosslasten aus beliebigen Richtungen vor Erreichen der Elastizitätsgrenze in sich selbst in Anschlag gehen und dem entsprechend, elastisch in ihre Ausgangslage zurückkehren.

Die thermische Tauglichkeit der Stützkörper wurde einerseits berechnet (Fig. 13) und andererseits indirekt durch die weiter unten (Abschnitt 2.4) durchgeführte thermische Messung eines, Stützkörper enthaltenden, Testrohres bestätigt.

### 2.2.3 Strahlungsminderung

Die thermische Tauglichkeit der zur Strahlungsminderung eingesetzten Aluminiumfolie auf einem wenig Wärme leitenden Träger wurde ebenfalls indirekt durch die weiter unten (Abschnitt 2.4) durchgeführte thermische Messung eines, diese Strahlungsminderung enthaltenden, Testrohres bestätigt.

### 2.2.4 VSI-Fittings

Fig. 27 zeigt das Foto zweier für eine Testverklebung vorbereiteter Rohre, welche am Ende mit einem Element mit Aussenkonus bzw. mit Innenkonus verschweisst sind. Nachdem der Aussenkonus homogen mit Klebstoff beschichtet ist, wird durch ineinanderschieben der beiden Konen der geforderte kleine Klebspalt sichergestellt.

Die Leckage der verklebten Rohre wurde mit einem Testaufbau gemessen, der demjenigen zur Messung des Ausgasens (Fig. 10 und Fig. 11) entspricht.

Das momentane Resultat ist, dass mit ca.  $1 \cdot 10^{-7}$  mbar\*L/sec keine genügend kleine Leckrate bewiesen werden konnte. Dies ist deutlich mehr, als die aus Abschnitt 2.1.2.3 ableitbaren, zulässigen höchstens  $1 \cdot 10^{-8}$  mbar\*L/sec.



Fig. 27 Foto Testaufbau VSI-Klebefitting

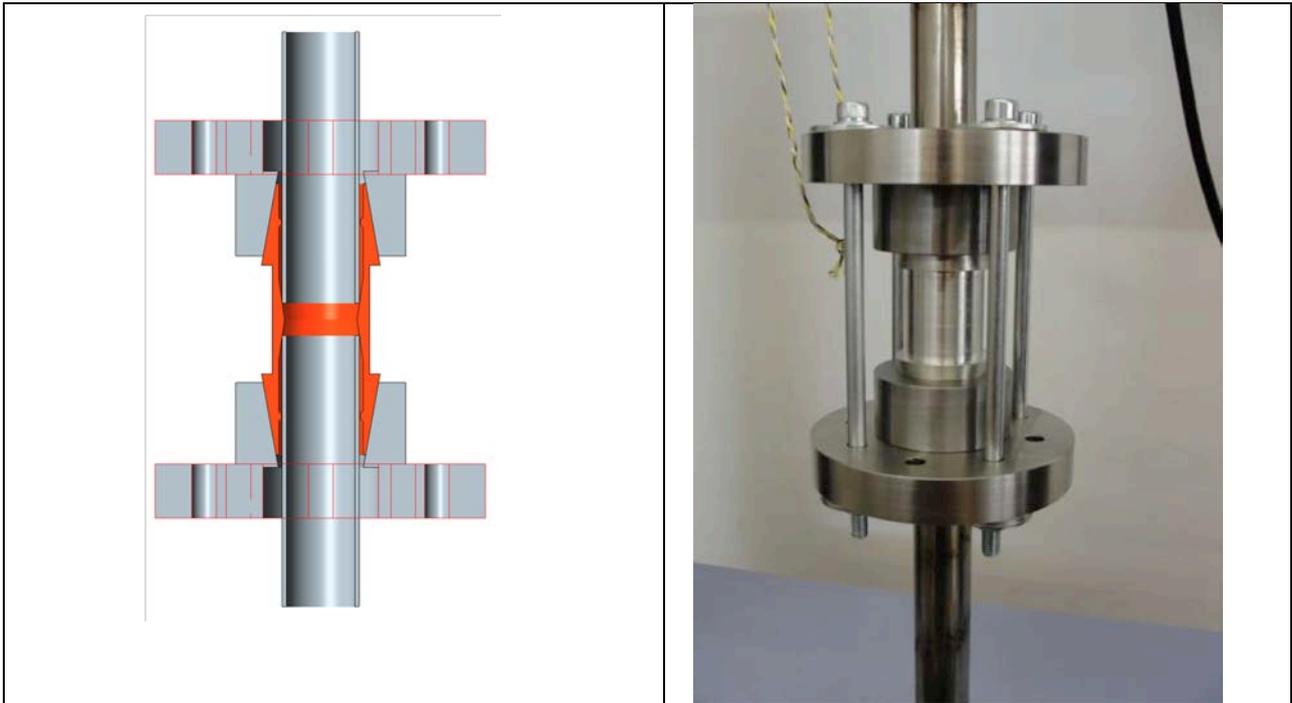


Fig. 28 Schnitt und Foto Testaufbau VSI-Pressfitting

Fig. 28 zeigt den Testaufbau eines VSI-Pressfittings. Der eigentliche, rot gezeichnete Dichtungsteil ist ein an beiden Enden auf der Aussenseite konisches Rohr aus Weich-Aluminium. Auf der Innenseite hat dieses Rohr innerhalb der beiden Kone jeweils eine ringförmige Schneide, welche an den eingeschobenen Wasserrohren anliegt. Der restliche Aufbau aus Stahl dient dazu, eine durch Schrauben erzeugte Zugkraft in Längsrichtung der Rohre in die benötigte radial wirkende Presskraft umzuwandeln.

Die Leckage der verpressten Rohre wurde auch hier mit einem Testaufbau gemessen, der demjenigen zur Messung des Ausgasens (Fig. 10 und Fig. 11) entspricht. Dabei wurde ein Rohr mit 1m Länge und Innendurchmesser 25 mm verwendet. Dieser Aufbau wurde 24 Stunden bei 170°C ausgegast. Danach wurde der Druckanstieg innerhalb eines Monats gemessen.

Das Resultat für die Summe von Ausgasen und Leckage ist  $2 \cdot 10^{-9}$  mbar\*L/sec, womit das Ziel aus Abschnitt 2.1.2.3 ableitbare, Ziel einer Leckrate von  $1 \cdot 10^{-9}$  mbar\*L/sec bis allerhöchstens  $1 \cdot 10^{-8}$  mbar\*L/sec erreicht ist.

Umgerechnet auf eine virtuelle totale Ausgasrate (inklusive Leckage) sind  $2 \cdot 10^{-9}$  mbar\*L/sec sehr gute  $2.5 \cdot 10^{-12}$  mbar\*L/(cm<sup>2</sup>\*sec) und dies bei einer Rohrleitung die im Mittel eine Pressverbindung pro Meter aufweist.

Damit ist die Machbarkeit genügend dichter Pressverbindungen bewiesen und in den nächsten Projektschritten geht es darum diese kostengünstig zu realisieren.

## 2.3 Rechnerische Evaluation von VSI-Leitungsvarianten

Die Resultate der durchgeführten Berechnungen werden an den entsprechenden Stellen weiter oben bzw. weiter unten in diesem Bericht dargestellt. Hier werden diese im Sinne von Verweisen auf die entsprechenden Figuren bzw. Tabellen zusammengestellt.

### 2.3.1 vakuumtechnische Berechnungen

- Fig. 8 durch Ausgasen bedingte Druckzunahme [hPa] bei verschiedenen Ausgasraten
- Fig. 9 zu getternde Gasmenge [hPa\*L] bei verschiedenen Ausgasraten
- Fig. 12 durch Ausgasen von  $1 \cdot 10^{-11}$  hPa\*L/(cm<sup>2</sup>\*s) und durch gleichzeitige Leckage bedingte zu getternde Gasmenge [hPa\*L] bei verschiedenen totalen Leckraten
- Fig. 22 Durch Ausgasen und Gettern bestimmte Druckverläufe langer VSI-Rohre mit DN25
- Fig. 24 Druckverlauf beim Evakuieren eines 100 m langen VSI-Rohres mit DN25

### 2.3.2 thermische Werte und Berechnungen

- Tab. 1 nach SIA 385/1 Mindestdämmstärken für Rohrleitungen in [mm]
- Tab. 2 nach SIA 385/1 zulässige Wärmedurchgangs-Koeffizienten  $U_r$  [W/Lfm\*K]
- Fig. 13 Totaler Wärmedurchgangskoeffizient  $U_r$  [W/LfmK] der die relative Lage von Innen- zu Aussenrohr sicherstellenden, neu entwickelten Stützkörper bei Abstand 1.5 m
- Fig. 16 geschätztes, äquivalentes  $U_r$  [W/LfmK] einer segmentierten VSI-Leitung ohne VSI-Überlappungsstücke
- Fig. 18 Gesamt- $U_r$  [W/LfmK] verschieden aufgebauter langer VSI-Leitungen
- Tab. 10 Wärmeverlust über Abzweiger konventionell isoliert bzw. mit VSI
- Tab. 11 Messwerte und daraus berechnete  $U_r$ -Werte am 2 m langen Testrohr
- Fig. 34  $U_r$ -Hüllrohr im Vergleich mit dem  $U_r$  einer VSI mit durchgehendem Vakuumspalt

### 2.3.3 mechanische Werte und Berechnungen

- Tab. 7 Übliche Wandstärken und Rohrschellenabstände von Installationsrohren aus Stahl
- Tab. 8 Beispiel der notwendige Abmessungen und der Durchbiegungen unter Eigengewicht eines Stahl-Stahl VSI-Rohrs
- Tab. 9 grösste anzunehmende Dilatation zwischen Innen- und Aussenrohr eines VSI-Warmwasserrohres

## 2.4 Messtechnische Evaluation einer VSI-Leitungsvariante

Es wurde ein VSI-Testrohr aufgebaut, mit dessen Hilfe die berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten verifiziert werden können. Das hierzu angewendete Prinzip ist in Fig. 29 sichtbar, ein Foto der Aussenansicht des Aufbaus findet sich in Fig. 30.

Das aus Stahl 1.4521 bestehende innere Rohr hat Nennweite 25 mm (Aussendurchmesser 28 mm) und eine Länge von 2000 mm. Im Inneren dieses - später nicht evakuierten - Rohrs befindet sich ein über die gesamte Länge laufendes Heizelement mit welchem es auf die gewünschte - natürlich exakt gemessene - Temperatur gebracht werden kann. An einem Ende ist das Innenrohr mit einem Blindflansch verschlossen, am anderen Ende mit einem Flansch mit den elektrischen Durchführungen, die notwendig sind, um das Heizelement mit Strom zu versorgen. Insgesamt ist das Innenrohr auf diese Weise völlig vakuumdicht verschlossen und das unter Umständen stark ausgasende Heizelement stört das Vakuum im Vakuumspalt nicht.

Auf der Aussenseite des Innenrohrs sind die zur Minderung der Wärmestrahlung notwendigen Aluminiumfolien auf einem wenig wärmeleitenden Träger entsprechend Abschnitt 2.1.7 angebracht. Der Abstand zwischen Innen- und Aussenrohr wird durch 2 Stützkörper sichergestellt, welche entsprechend Abschnitt 2.1.3.1 aufgebaut sind.

Das aus Aluminium bestehende Aussenrohr hat einen Aussendurchmesser von 60 mm. An einem Ende ist es mit einem Flansch verschlossen, welcher die Ankoppelung eines zur Pumpe führenden

Schlauches erlaubt. Am anderen Ende ist es mit einem Flansch verschlossen, der die elektrischen Durchführungen hat, die notwendig sind um das Heizelement und das, aussen mittig am Innenrohr befestigte Thermoelement zur Messung der Temperatur mit Strom zu versorgen. Die notwendigen elektrischen Leitungen sind Helix artig gewunden. Durch die damit erzielte grosse Leitungslänge wird der störende Wärmetransport vom Innen- zum Aussenrohr so weit minimiert, dass er in erster Näherung vernachlässigbar ist.

Auf diese Weise ist ein Vakuumpalt realisiert, der mit grosser Genauigkeit demjenigen eines unendlich langen VSI-Rohrs entspricht und damit demjenigen einer VSI-Leitung mit durchgehendem Vakuumpalt.

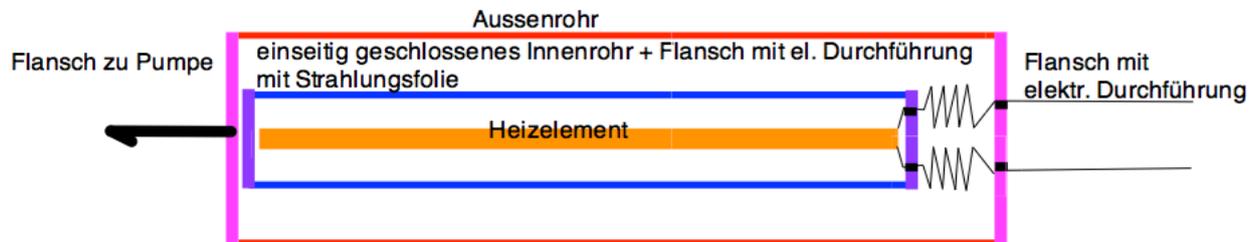


Fig. 29 Prinzipskizze des Messaufbaus für den Wärmedurchgangskoeffizienten eines VSI-Rohres



Fig. 30 Aufbau zur Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten eines VSI-Rohres

Zur wechselseitigen Kontrolle der Messresultate und der entsprechenden Berechnungen wurde das Testrohr bei den 3 Drücken 1000 hPa,  $1.3 \cdot 10^{-4}$  hPa und  $1.6 \cdot 10^{-6}$  hPa im Vakuumpalt vermessen. Weil die elektrische Isolation der im Spalt vorhandenen elektrischen Leitungen relativ stark ausgasen, war es notwendig während der gesamten Messdauer ständig zu pumpen um den Unterdruck bei diesen Werten zu halten.

Das Innenrohr wurde geregelt so beheizt, dass sich eine stabile Temperatur von ca.  $60^\circ\text{C}$  einstellte. Die hierfür notwendige Heizleistung und die exakten Temperaturen des Innen- bzw. Aussenrohrs wurden jeweils aussen mittig gemessen.

Die Zulässigkeit der Beschränkung auf diese beiden Temperaturmesspunkte wurde verifiziert, indem mit einer anderen Temperaturmesssonde von Hand die Temperaturen entlang dem gesamten Aussenrohr gemessen wurden. Dabei ergaben sich an sämtlichen Messpunkten nur marginale Abweichungen von der mittig gemessenen Temperatur. Damit zur Berechnung der Ur-Werte des Testrohrs der Wärmeübergang zur Umgebung mit berücksichtigt werden konnte, wurde zusätzlich jeweils die Umgebungstemperatur bestimmt.

Tab. 11 zeigt die gemessenen Werte und die daraus abgeleiteten Werte für Ur im Vergleich mit den entsprechenden berechneten Ur-Werten.

Druck mbar	T innen °C	T ausen °C	T Um- geb. °C	Heiz- leistung W	Ur_mess nicht korr. W/LfmK	korr. mit Überg. zu Um- geb. W/LfmK	Korr. Strahl. Front W/LfmK	Ur_mess korrigiert W/LfmK	Ur_ berechn. W/LfmK
<b>1000</b>	58	20	15	15.71	<b>0.197</b>	0.1735	0.0036	<b>0.1699</b>	<b>0.1635</b>
<b>1.30E-04</b>	60.8	19	18.4	1.71	<b>0.0195</b>	0.0190	0.0036	<b>0.0155</b>	<b>0.0154</b>
<b>1.60E-06</b>	59.9	19.2	18.5	1.44	<b>0.0168</b>	0.0165	0.0034	<b>0.0131</b>	<b>0.0132</b>

Tab. 11 Messwerte und daraus berechnete Ur-Werte am 2 m langen Testrohr

Aus den gemessenen Temperaturen und Heizleistungen wurde zunächst der nicht korrigierte, äquivalente Wärmedurchgangskoeffizient "Ur\_mess nicht korr." (blau) berechnet. Diese Werte wurden rechnerisch korrigiert, indem der Wärmeübergang zur Umgebung sowie die Wärmestrahlung an den beiden Rohrenden berücksichtigt wurden. Die dazu notwendigen Koeffizienten wurden anhand der Messung bei 1000 mbar so bestimmt, dass der berechnete und der korrigierte gemessene Wert ungefähr übereinstimmen. Das Resultat dieser Korrektur der Messwerte "Ur-mess korrigiert" (rot) stimmt für alle 3 Restdrücke im Vakuumspalt sehr genau mit den von uns analytisch abgeschätzten Ur-Werten "Ur\_berechn." (grün) überein.

Dies ist vor allem die Bestätigung, dass eine Warmwasserleitung mit VSI mit durchgehendem Vakuumspalt die erwarteten hervorragenden Energie-Einsparungen bringt.

Die Resultate bestätigen aber auch, dass die von uns abgeschätzten – direkt messtechnisch sehr schwierig verifizierbaren – Wärmeverluste durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung über die Stützkörper zwischen Innen- und Aussenrohr der Realität entsprechen. Insbesondere liegt damit auch eine (weitere) Bestätigung vor, dass der Träger der strahlungsmindernden Aluminiumfolie so hervorragend funktioniert wie von uns abgeschätzt (siehe Abschnitt 2.1.7).

### 3 VSI-Retrofit

Die nachträgliche Ausstattung von bereits fest installierten Warmwasser-Rohren mit Vakuum Spalt Isolation (VSI) ist eine Aufgabe, welche technisch sicher machbar ist. Dies aber so zu realisieren, dass es dem Kostenvergleich mit einer ebenfalls nachträglich installierten normgerechten, traditionellen Isolation standhält, ist auf den ersten Blick eine fast unlösbare Herausforderung.

#### 3.1 Retrofit mit durchgehendem Vakuumspalt, ohne Aufschneiden der vorhandenen Rohre

Der erste von uns angedachte Ansatz geht davon aus, dass eine Retrofit VSI-Leitung entstehen soll, welche einen durchgehendem, nachträglich evakuierbaren Vakuumspalt aufweist, wobei die Durchführung des Retrofits so erfolgen soll, dass die vorhandenen alten Wasserrohre nicht aufgetrennt werden müssen.

##### 3.1.1 Zusätzliche Anforderungen

Gegenüber einer neu erstellten VSI-Leitung stellen sich folgende zusätzliche Anforderungen bei dieser Art eines VSI-Retrofits:

- Die vorhandenen Leitungen müssen nachträglich von mindestens einer, dieselben in einem definierten Abstand konzentrisch umschliessenden, zusätzlichen, vakuumdichten und wenig ausgasenden Schicht umgeben werden, welche in der Lage ist, dem Luftdruck standzuhalten. Dies bedeutet dass diese äussere Schicht zunächst um die vorhandene Leitung geformt und dann dicht verschlossen werden können muss. Im Weiteren nennen wir diese zusätzliche Schicht "Retrofit-Aussenrohr".
- Das Retrofit-Aussenrohr muss so gestaltet sein, dass es einen durchgehenden Vakuumspalt auch um vorhandene Fittings und Abzweiger bildet.
- Bevor das Retrofit-Aussenrohr angebracht werden darf, müssen die notwendigen Stützkörper, welche das Retrofit-Aussenrohr gegen die vorhandene Leitung abstützen, angebracht werden. Diese Stützkörper müssen natürlich so geformt sein, dass sie von der Seite her über die vorhandene Leitung gebracht werden können. Dies macht die Verwendung der in Abschnitt 2.1.3.1 angesprochenen Stützkörper, welche in Längsrichtung auf das Innere Rohr aufgeschoben werden müssen, unmöglich.
- Bevor die Stützkörper angebracht werden dürfen, müssen die vorhandenen Rohre, Fittings und Abzweiger vakuumtauglich gemacht werden. Dies bedeutet, die Ausgasrate und der Strahlungskoeffizient der vorhanden Rohre muss – allenfalls durch Anbringen einer zusätzlichen Schicht - soweit reduziert werden, dass sie den Anforderungen eines wenig wärmeleitenden, langlebigen Vakuumspaltes genügen.
- Das Retrofit-Aussenrohr muss zumindest an einer Stelle mit einem Abpump- sowie einem Getter-Ventil versehen werden können.
- Die Evakuierung des entstandenen Vakuumspaltes kann vor Ort und nachträglich geschehen.

##### 3.1.2 Aufbau Möglichkeiten

###### 3.1.2.1 Retrofit-Aussenrohr

Fig. 31 zeigt die Skizze des denkbaren Retrofit-Aussenrohrs. Obwohl sich der Ansatz völlig unüblicher Methoden bedient, scheint er uns momentan innerhalb der diskutierten Möglichkeiten derjenige zu sein, welche aus Kostengründen am wahrscheinlichsten Retrofit VSI-Leitungen ermöglichen könnte.

Das Retrofit-Aussenrohr besteht aus zwei identischen, 180° gegeneinander gedrehten, langen Halbschalen. Diese sind so geformt, dass sie, entlang zweier seitlichen Nähte, einander überlappend ineinander einrasten. An den Nahtstellen weisen die Halbschalen ebene Flächen auf, welche mit einem selbstklebenden, z.B. 2 cm breiten Aluminiumband verklebt werden können. Von einem sol-

chen Aufbau kann auf Grund unserer Arbeiten in einem früheren Projekt (Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte – Bauelemente für Vakuumpanels, Schlussbericht September 2013, Bundesamt für Energie BFE) erhofft werden dass er genügend vakuumdicht ist.

Natürlich muss dazu das selbstklebende Aluminiumband völlig faltenfrei aufgebracht werden und mit einer Klebstoffschicht versehen sein, welche sehr dünn (z.B. 40 – 50 µm) und in sich völlig homogen ist. Zusätzlich muss es eine genügend hohe Temperaturfestigkeit aufweisen.

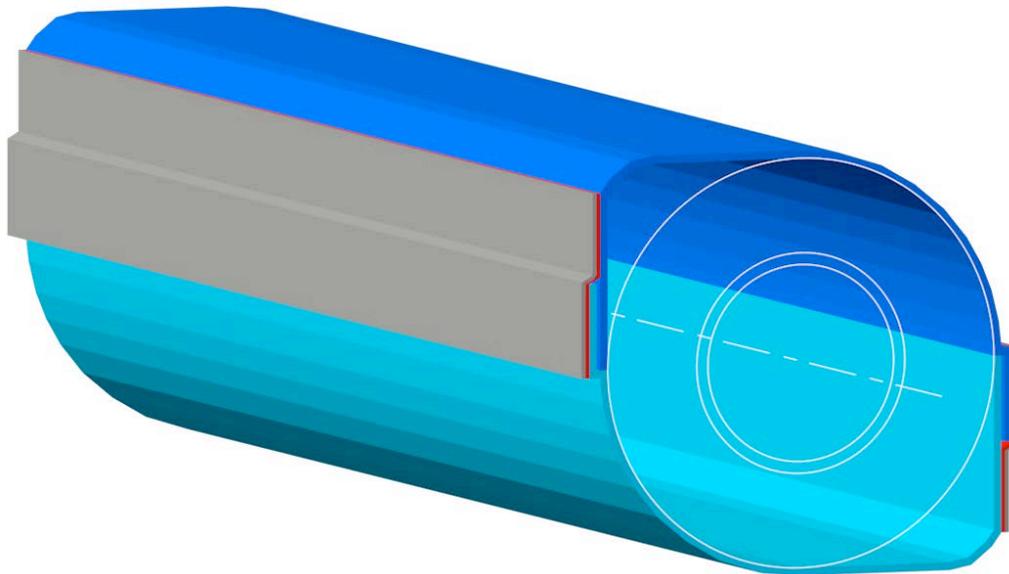


Fig. 31 Skizze eines denkbaren Retrofit-Aussenrohrs

Von Vorteil wäre, wenn die gezeigten Halbschalen – eines geringen Strahlungskoeffizienten wegen – aus einem, mindestens vakuumseitig, hochglänzenden Aluminiumblech geformt sind.

Es ist offensichtlich, dass eine Längenanpassung geschehen kann, indem die beiden entsprechenden Halbschalen vor dem Zusammenbau entsprechend gekürzt werden.

In Längsrichtung können derartig zusammengesetzte Rohre vakuumdicht mittels entsprechend geformten, identisch aufgebauten kurzen Fittings, welche in radialer Richtung um Wandstärke kleiner (oder grösser) sind. Diese Fittings können dann in die beiden zu verbindenden Rohre eingeschoben und die entstehenden Spalte in Umfangsrichtung theoretisch ebenfalls mit selbstklebendem Aluminiumband verschlossen werden.

Ob ein derartiger Aufbau eines Retrofit-Aussenrohres – nach erwiesener technischer Tauglichkeit – am Markt auf Akzeptanz stossen würde, würde in hohem Masse davon abhängen, ob dem Installateur ein preisgünstiges Werkzeug zur Verfügung gestellt werden kann, das die Verklebungen sauber reproduzierbar durchführt. Dies wäre die Aufgabe weiterer Entwicklungen.

Selbstverständlich wäre es vorstellbar, dass die genannten Verbindungen statt mit verklebtem Aluminiumband mittels Schweißen ausgeführt würden. Dies wäre aber vermutlich mit einem deutlich höheren Aufwand verbunden.

### 3.1.2.2 vorhandene Leitung vakuumtauglich machen

Selbst wenn die vorhandene alte Rohrleitung vollständig aus Edelstahl, verzinktem C-Stahl oder Kupfer Bauteilen bestehen würde, wäre es äusserst schwierig diese, eigentlich für Vakuum taugliche, Materialien nachträglich auf eine genügend geringe Ausgasrate zu bringen. Dazu müssten die vorhandenen, fest installierten Rohre beispielsweise mit einer evakuierbaren Arbeitshülle umgeben und einem bake-out bei hohen Temperaturen unterzogen werden. Dies scheint uns aus wirtschaftlichen Gründen unmöglich.

Völlig unmöglich ist es, mit den heute häufig verwendeten Kunststoffrohren auf die notwendigen tiefen Ausgasraten zu kommen, liegen diese doch um viele Zehnerpotenzen zu hoch.

Was – aus unserer momentanen Sicht - als einzig möglicher Ansatz bleibt, ist die Umhüllung der alten Rohrleitung mit einer – über alle Fittings durchlaufenden – vakuumdichten Schicht mit genügend kleinem Ausgasen.

Eine erste Möglichkeit wäre, dass diese Schicht im Wesentlichen identisch aufgebaut ist wie das geschilderte Retrofit-Aussenrohr. Dabei muss allerdings durch entsprechend modifizierte Formgebung darauf geachtet werden, dass der dann von innen wirkende Druck die Verklebungen nicht ablösen kann.

Ein derartiges Retrofit-Innenrohr muss einen inneren Durchmesser aufweisen der den grössten Durchmesser der in der alten Leitung vorhandenen Fittings umschliesst. Es muss deshalb mit offenen, ringförmigen Hilfskörpern gegen die alte Leitung abgestützt werden, was aber kein prinzipielles Problem ist.

Vorteilhaft wäre in diesem Falle, wenn auch das Retrofit-Innenrohr – eines geringen Strahlungskoeffizienten wegen - aus einem, mindestens vakuumseitig, hochglänzenden Aluminiumblech geformt ist.

Es ist eine zweite, vom Ansatz her deutlich kostengünstiger Möglichkeit denkbar. Die vorhandene Rohrleitung kann, nach gründlicher Reinigung und Entfettung, Helix artig mit einem geeignet aufgebauten, selbstklebenden Aluminiumband umwunden werden. Dies muss erstens so geschehen, dass sich die einzelnen Windungen deutlich überlagern, also beispielsweise um 25 mm bei Verwendung eines 50 mm breiten Bandes. Zweitens muss es so geschehen, dass eine durchgehende, an den Nähten faltenfreie Aluminiumlage um das gesamte alte Leitungssystem entsteht.

Dies ist natürlich im Bereich von Fittings und Abzweigern nicht ganz einfach. Erste schnelle Versuche haben aber gezeigt, dass sich geeignete Aluminiumbänder in diesen Bereichen so umformen lassen, dass sie die unterschiedlichen Durchmesser sauber überdecken und vor allem an den Übergängen zur nächsten Umwindung faltenfrei sind.

Preislich wäre eine solche Lösung von höchstem Interesse. Setzt man die Marktpreise von geeigneten selbstklebenden Aluminiumbändern ein, kommt man für das Band auf Kosten pro Laufmeter Rohr von CHF 0.5 bei Rohr-Ø 18 mm bis CHF 2 bei Rohr-Ø 90 mm.

Ob ein derartiger Aufbau einer vakuumtauglichen Schicht auf den alten Rohren – nach erwiesener technischer Tauglichkeit - am Markt auf Akzeptanz stossen würde, würde auch in diesem Falle in hohem Masse davon abhängen, ob dem Installateur ein preisgünstiges Werkzeug zur Verfügung gestellt werden kann, das die Verklebungen sauber reproduzierbar durchführt. Dies wäre die Aufgabe weiterer Entwicklungen.

### 3.1.2.3 Erstes Resultat und Konsequenz daraus

Einige rasche Versuche haben ergeben, dass das Verschliessen der Nähte mit selbstklebendem Aluminiumband nicht ohne weiteres die notwendigen geringen Leckraten bringt.

Um dies - allenfalls – zu erreichen, wäre die aufwendige Entwicklung entsprechender Werkzeuge und Verfahren notwendig.

Dieses Resultat hat nicht dazu geführt, dass wir den skizzierten Ansatz endgültig als nicht tauglich aufgegeben haben.

Wir haben uns aber entschlossen dem schon in Abschnitt 2.1.1.3 "VSI-Hüllrohre" skizzierten, technisch auf jeden Fall machbaren, Ansatz Priorität einzuräumen.

## 3.2 Retrofit mit über die alten Rohre geschobenen VSI-Hüllrohren

### 3.2.1 prinzipielle Überlegungen

Wir wiederholen und erweitern die in Abschnitt 2.1.1.3 skizzierten Prinzipien.

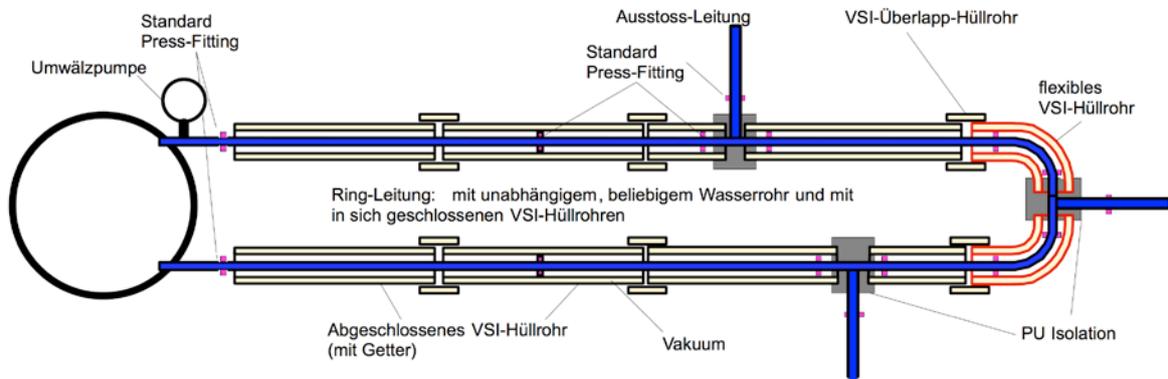


Fig. 32 Prinzipskizze einer warmgehaltenen Ringleitung mit VSI Hüllrohren

Fig. 32 zeigt die Prinzipskizze einer warmgehaltenen Ringleitung mit VSI-Hüllrohren. Eine derartig mit Vakuum isolierte Leitung besteht aus einer unabhängigen, konventionell aus beliebigen Rohren aufgebauten Wasserleitung, über welche Doppelrohre mit an beiden Enden verschlossenem Vakuumspalt geschoben sind.

Der Innendurchmesser der Hüllrohre ist so gross, dass dieselben auch über die - die Wasserrohre verbindenden - Fittings hinweg geschoben werden können.

Es ist offensichtlich, dass beim Retrofit einer bestehenden Leitung die VSI-Hüllrohre über die Wasserrohre geschoben werden müssen, nachdem die bestehende Leitung an einigen wenigen Stellen aufgetrennt wurde.

Nach dem Aufschieben der Hüllrohre kann dann die bestehende alte Leitung mit Standard Fittings wieder verbunden werden.

Damit ein Auftrennen der bestehenden Leitung an möglichst wenigen Stellen stattfinden muss ist es wünschenswert, dass – allenfalls neben Hüllrohren mit starrer Hülle – flexible Hüllrohre zur Verfügung stehen, mit welchen ein VSI-Hüllrohr auch um Krümmungen der bestehenden Leitung geführt werden kann.

Offensichtlich ist, dass im Zuge des Überschiebens der Hüllrohre die alten, an die bestehenden Rohre angepassten Rohrschellen durch solche ersetzt werden müssen, welche die Hüllrohre umfassen. Dazu muss auch gewährleistet sein, dass die Hüllrohre das Gewicht der alten bestehenden Leitung tragen können ohne zu stark zu deformieren. Zu diesem Zwecke müssen die neuen Rohrschellen allenfalls an geeigneten anderen Stellen der Leitung angebracht werden.

Offensichtlich ist auch, dass an den Stössen zwischen den einzelnen Hüllrohren – entsprechend Abschnitt 2.1.4 - jeweils ein überlappendes Vakuumspalt realisiert werden muss, weil sonst die Wärmeverluste über die Rohrenden viel zu gross würden.

### 3.2.2 möglicher Aufbau eines Hüllrohrs

Fig. 33 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Hüllrohrs mit welchem die obigen Überlegungen erfüllt werden können.

Die alte vorhandene Leitung mit Fittings ist orange bzw. rot dargestellt. Die skizzierten Hüllrohre sind als an beiden Enden verschlossene Rohre mit gegenläufigen Stufenenden dargestellt. Dies bedeutet, dass der äussere Durchmesser des ersten Rohrendes um wenige mm kleiner ist, als der innere Durchmesser des zweiten Rohrendes. Der Vakuumspalt des mittleren Hüllrohrabschnitts ist so gross (z.B. 20 mm) dass auch an den beiden Stufenenden ein genügend grosser Vakuumspalt (jeweils z.B. 9 mm) resultiert.

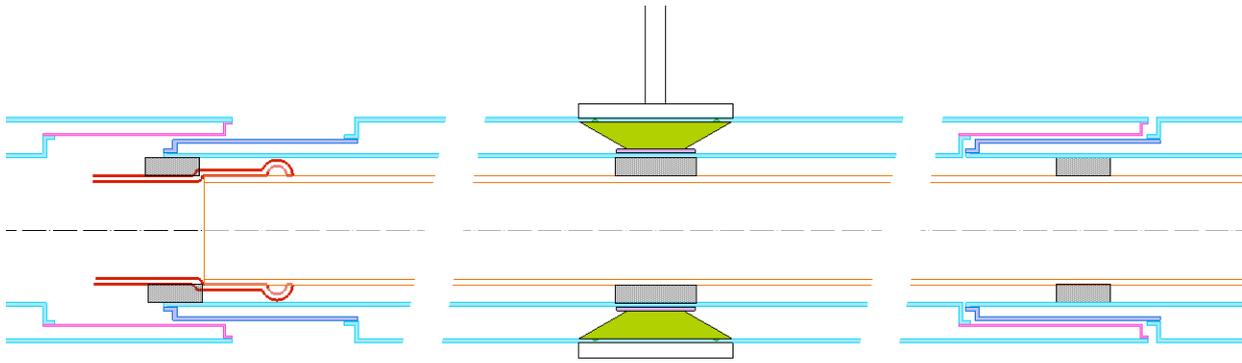


Fig. 33 Aufbauprinzip eines VSI-Hüllrohrs

Mit einem derartigen Aufbau kann offensichtlich eine Überlappung der Vakuumpalte aufeinander folgender Hüllrohre realisiert werden, was die notwendige thermische Verbesserung mit sich bringt. Wenn die Stufenenden lang genug ausgebildet sind – also jeweils z.B. 300 mm lang – und wenn mindestens z.B. 100 mm Überlappungslänge notwendig ist um die gewünschte minimale thermische Verbesserung zu erhalten, können die Stufenenden dazu verwendet werden einen Längenausgleich der gesamten Hüllrohr-Folge zu gewährleisten. Pro Stoss steht dann nämlich z.B.  $\pm 100$  mm Ausgleichslänge zur Verfügung.

Eine wesentliche thermische Verbesserung ist möglich, wenn, wie in Fig. 33 skizziert, die Wandstärken im Bereich der Stufenenden an den entsprechenden Durchmessern so klein wie möglich – also z.B. 0.1 mm stark – gestaltet werden.

Mittig im Hüllrohr ist ein Stützkörper (grün) skizziert, der prinzipiell den in Abschnitt 2.1.3.1 besprochenen entspricht. Damit kombiniert er eine äusserst geringe Wärmeleitung von Innenrohr zum Aussenrohr mit einer genügenden mechanischen Festigkeit, um das Gewicht der alten bestehenden Wasserleitung zu tragen. Zur Übertragung des Gewichtes des alten Wasserrohrs auf das Hüllrohr ist ein weiterer Stützkörper, z.B. aus PU-Schaum (grau) vorhanden. Und exakt an dieser Stelle des Hüllrohrs befindet sich eine neue Rohrschelle, welche die mit VSI-Hüllrohren versehene Leitung mit der Wand oder der Decke ihrer Umgebung verbindet.

Wenn das Hüllrohr - im Gegensatz zu Fig. 33 - im mittleren Teil als sehr flexibles Doppel-Wellrohr gestaltet ist, ist auch der Wunsch nach einer Biegsamkeit erfüllt, die es einerseits erlaubt das Hüllrohr um Krümmungen der alten Leitung herum zu führen und andererseits das Überschieben langer Hüllrohre über die lokal aufgetrennte alte Leitung ermöglicht.

Es ist klar, damit die Hüllrohr-Folge an die bestehenden Längen der einzelnen, durch Abzweiger, Wanddurchstössen und komplizierten Krümmer-Folgen gegebenen – Abschnitte der alten Wasserleitung angepasst werden kann, müssen Hüllrohre unterschiedlicher Länge zur Verfügung stehen.

Hüllrohr-Längen m	mittlerer Anteil	
0.25	5.00%	mittlere Länge 2.4125
0.5	20.00%	
1	20.00%	
2	20.00%	
4	20.00%	
6	15.00%	

Tab. 12 angenommene Verteilung der Hüllrohrängen

Nach Analyse einer kleinen Anzahl von bestehenden Warmwasserleitungen in Einfamilienhäusern gehen wir im Moment davon aus, dass es für einen vernünftigen Abdeckungsgrad genügt, im Mittel die in Tab. 12 gezeigten prozentualen Anteile von Hüllrohrängen zur Verfügung zu stellen.

Daraus resultiert eine mittlere Hüllrohränge von 2412.5 mm.

Diese Annahmen müssen in einer zukünftigen Arbeit natürlich mit einer ausführlichen Analyse verifiziert und allenfalls korrigiert werden. Wir haben sie aber dazu verwendet, im folgenden Abschnitt die rechnerische Abschätzung des mit VSI-Hüllrohren erreichbaren Wärmedurchgangskoeffizienten  $Ur_{\text{Hüllrohr}}$  zu berechnen.

### 3.2.3 rechnerische Abschätzung des Wärmedurchgangskoeffizienten Ur-Hüllrohr

Tab. 13 zeigt die Dimensionen der VSI-Hüllrohre welche wir für die rechnerische Abschätzung von Ur-Hüllrohr angenommen haben

Øa Wasserrohr mm	mittlere Länge der Hüllrohre m	mittlere Überlapp-Länge L (±50%) m	Øi-Hüllrohr m	VSI Spalt dicker Bereich m	Øa- innerer Ülap-ber. m	s innerer Ülap-ber. m	Øi- äusserer Ülap-ber. m	s äusserer Ülap-ber. m
15	2.4125	0.11	0.025	0.0195	0.0435	0.00035	0.0455	0.0001
18	2.4125	0.12	0.028	0.0195	0.0465	0.00035	0.0485	0.0001
22	2.4125	0.13	0.032	0.021	0.052	0.0004	0.054	0.0001
28	2.4125	0.15	0.038	0.021	0.058	0.00045	0.06	0.0001
35	2.4125	0.17	0.045	0.021	0.065	0.0005	0.067	0.0001
42	2.4125	0.19	0.052	0.0225	0.0735	0.0006	0.0755	0.0001
54	2.4125	0.22	0.064	0.0225	0.0855	0.0007	0.0875	0.0001

Tab. 13 angenommene VSI-Hüllrohr Dimensionen

Mit diesen Annahmen lassen sich die in Fig. 34 blau gezeigten Werte berechnen. Zu Vergleichszwecken sind die in Fig. 18 berechneten und in Abschnitt 2.4 messtechnisch verifizierten Werte für eine VSI mit durchgehendem Vakuumpalt grün dargestellt.

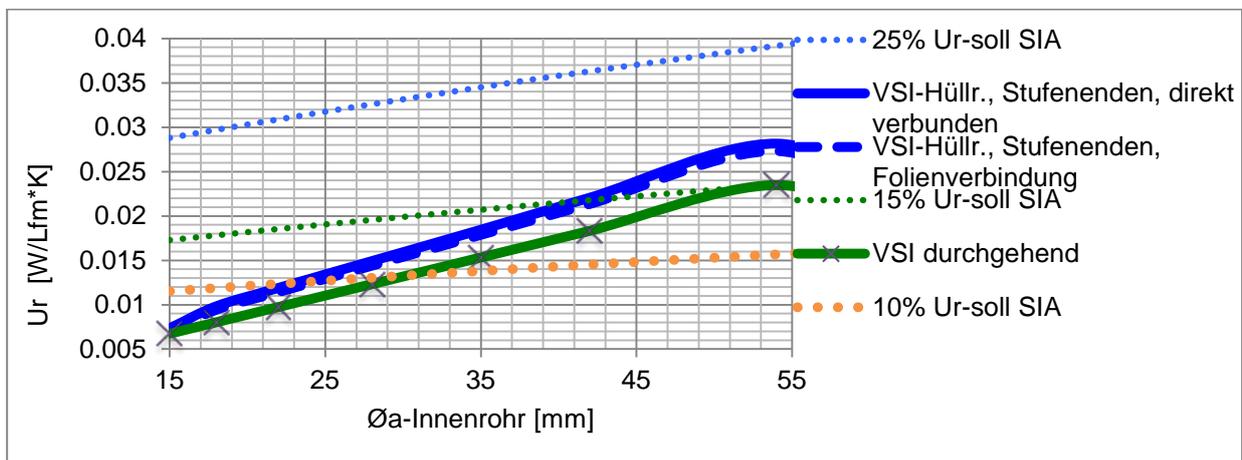


Fig. 34 Ur-Hüllrohr im Vergleich mit dem Ur einer VSI mit durchgehendem Vakuumpalt

Blau mit durchgezogener Linie sind die  $U_r$  eines Hüllrohraufbaus dargestellt, welcher demjenigen der Skizze in Fig. 33 entspricht und bei welchem Innen- und Aussenrohr an den Enden direkt miteinander verbunden sind.

Blau mit gestrichelter Linie sind die  $U_r$  eines Hüllrohraufbaus dargestellt, bei welchem Innen- und Aussenrohr an den Enden über einen Folien-Endverschluss gemäss Fig. 15 miteinander verbunden sind.

Die Verbesserung durch die sehr viel aufwendigere Lösung mit Folien-Endverschluss nur klein ist, ist ein derartiger Aufbau wirtschaftlich nicht vertretbar.

Wie zu erwarten sind die Wärmedurchgangskoeffizienten der Warmwasserleitung mit VSI-Hüllrohren bei beiden besprochenen Aufbauarten grösser als diejenigen einer VSI-Leitung mit durchgehendem Vakuumpalt. Da sie sich aber - abhängig von Rohrdurchmesser - immer noch im Bereich zwischen 10% und 20% des  $U_r$  einer normgerecht konventionell gedämmten Leitung bewegen, ist die gut ausgeführte Wärmedämmung mit VSI-Hüllrohren als sehr gut zu bezeichnen und stellt damit eine Lösung der Aufgabe VSI-Retrofit dar, die wärmetechnisch valabel ist.

Ob VSI-Hüllrohre auch das Potenzial besitzen, wirtschaftlich Sinn zu machen, versuchen wir im folgenden Abschnitt mit abzuschätzen.

## 4 Kosten und Potenzial VSI-Leitungen

### 4.1 mögliche Fertigung von offenen VSI Rohren und Fertigungskosten

Zur Durchführung einer Kosten-Nutzen Abschätzung muss man zunächst den – groben – Entwurf einer Fertigungsstrasse für VSI-Rohre entwickeln.

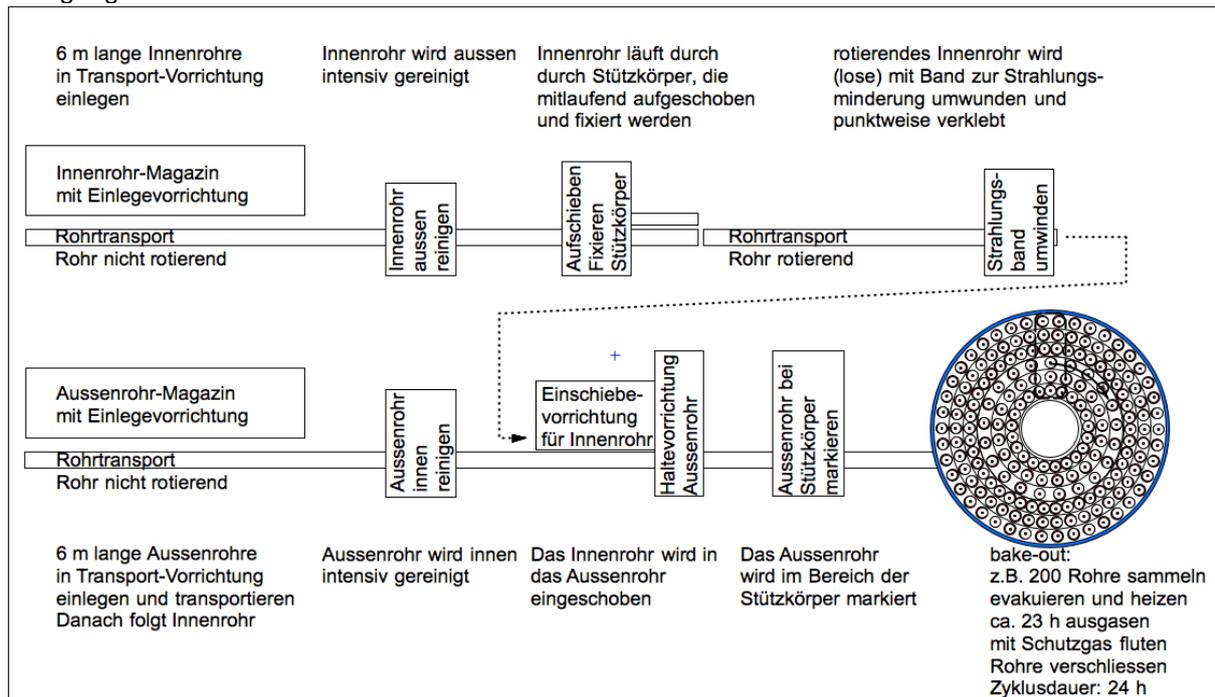


Fig. 35 mögliche Fertigungsstrasse für VSI-Rohre

Fig. 35 zeigt eine mögliche Fertigungsstrasse für beidseitig offene VSI-Rohre, welche bei der Installation zu einer VSI-Leitung mit durchgehendem Vakuumpspalt zusammen gefügt werden können. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Auf der Anlage können 6 m lange VSI-Rohre mit den im Hausbau üblichen Nenndurchmessern – also beispielsweise von DN15 bis DN54 – in beliebiger Folge hergestellt werden
- Während einer Schicht (8h) werden – prozentual auf die unterschiedlichen Durchmesser verteilt – voll automatisch 200 VSI-Rohre gefertigt, was eine Taktzeit von 2.4 min pro Rohr und eine Gesamtlänge von ca. 300 km Rohr pro Jahr ergibt.
- Diese Rohre werden in einem entsprechenden bake-out Ofen gesammelt und dort unter Vakuum und Beheizung ca. 23 h ausgegast
- Die Bedienung der gesamten Anlage inklusive bake-out kann von 2 Arbeitskräften sichergestellt werden
- Die gesamte Anlage kann für ca. 2 Millionen CHF erstellt werden
- Die Amortisationszeit beträgt 5 Jahre
- Die Wartungskosten summieren sich innerhalb dieser Zeit auf 50% der Anlagekosten, also auf ca. 1 Million CHF
- **Unter Berücksichtigung der Energiekosten belaufen sich die Fertigungskosten damit auf ca. CHF 3.85 pro Laufmeter VSI-Rohr**

### 4.2 Kostenschätzungen für neu installierte VSI-Leitungen mit durchgehendem Vakuumpspalt

Sämtlichen folgenden Kostenschätzungen beziehen sich auf eine Ringleitung mit 30 m Länge.

#### 4.2.1 Abschätzung der Kosten, der zur Herstellung von VSI-Rohren nötigen Materialien

Für die Abschätzung der Materialkosten waren wir auf Analogie-Schlüsse angewiesen:

- Den Preis – gegenüber den weiter oben besprochenen Rohren optimierter - dünnwandiger Rohre haben wir ausgehend vom Preis der bei Grosshändler erhältlichen, relativ dickwandigen

gen Rohre, den üblichen Margen von Herstellern und Grosshändlern, den geschätzten Herstellkosten und den bekannten Kosten für Bandstahl bzw. Bandaluminium geschätzt.

- Kosten für Fittings, Ventile und Getter haben wir geschätzt
- Die voraussichtlichen Kosten der Stützkörper konnten wir von ähnlichen, am Markt erhältlichen Bauelementen ableiten.
- Die Kosten für die strahlungsmindernden Folien auf einem geeigneten Träger ergeben sich aus den Preisen dünner Aluminiumfolie und den bekannten Preisen für das Trägermaterial

Tab. 14 zeigt die Zusammenstellung der entsprechenden Werte

Innenrohr 1.4521			Aussenrohr Aluminium			Stützkörper			Folie + Träger	total
Øi	s	CHF/m	Øi	s	CHF/m	CHF/Stk	Anz/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m
15	0.5	2.06	41	0.27	1.46	0.50	0.5	0.25	0.29	4.06
18	0.5	2.4	44	0.27	1.46	0.60	0.5	0.30	0.35	4.51
22	0.6	3.2	50	0.3	1.95	0.78	0.5	0.39	0.42	5.96
28	0.6	4	56	0.3	1.95	0.99	0.5	0.50	0.54	6.99
35	0.75	5.71	63	0.38	3.25	1.08	0.5	0.54	0.67	10.17
42	0.75	6.97	72	0.45	3.73	1.16	0.5	0.58	0.81	12.09
54	0.75	8.86	84	0.53	4.87	1.49	0.5	0.74	1.04	15.52

Tab. 14 Zusammenstellung der geschätzten Materialkosten

#### 4.2.2 Abschätzung der Kosten der VSI-Rohre mit durchgehendem Vakuumpalt

Ausgehend von den Resultaten der obigen Abschnitte sind in Tab. 15 die Herstellkosten bzw. die voraussichtlichen Grosshändlerpreise der fertigen VSI-Rohre dargestellt.

Dabei wurde berücksichtigt, dass die Vakuumpalte der Rohre zum Schutz gegen die übermässige Anlagerung von Wasser auf der Oberfläche mit einem Schutzgas (z.B. N<sub>2</sub>) gefüllt und mit einem entsprechenden Deckel verschlossen werden sollten.

Material total	autom. Montage	Bake-Out	N <sub>2</sub>	Verpackung	Herstellkosten VSI total	Preis Grosshändler
CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m
4.06	1.61	2.23	0.016	0.20	8.12	17.0
4.51	1.61	2.23	0.016	0.21	8.58	18.0
5.96	1.61	2.23	0.016	0.24	10.07	21.1
6.99	1.61	2.23	0.016	0.27	11.12	23.3
10.17	1.61	2.23	0.016	0.31	14.34	30.1
12.09	1.61	2.23	0.016	0.35	16.30	34.2
15.52	1.61	2.24	0.016	0.41	19.79	41.6

Tab. 15 geschätzte Kosten der mit Schutzgas gefüllten VSI-Rohre

#### 4.2.3 Abschätzung der Installationskosten

Tab. 16 zeigt die detaillierte Abschätzung der Installationskosten, die einerseits für die Installation einer konventionell isolierten Warmwasserleitung aus Stahlrohr - bzw. aus 6 m langen starren Rohren aus beliebigem Material – und andererseits einer VSI-Leitung mit durchgehendem Vakuumpalt entstehen.

Trotz deutlich höherer Kosten bei der Installation der Leitung sind die totalen Installationskosten für die VSI-Leitung leicht tiefer als bei der konventionell gedämmten Variante, weil hier die Kosten für die nachträgliche Installation der Isolationshüllen und Zusatzkosten für Dilatationsmassnahmen völlig wegfallen.

	identisch für alle Arten	konv. Stahlrohr nachtr. isoliert	VSI-Rohr Vaku. durchgehend	
Annahmen:			ZeitMultiplik. bezüglich konvent.	
Durchschnitt Länge Ringleitung	30 m			
mittlerer Fittingabstand	2.5 m			
=> Anzahl Fittings	14			
Planungszeit	30% von Werk- zeit			
Vorbereitung	30%			
An- und Heimfahrt 1d=	8 h	1.00 h/d		
Installateur (im Mittel)	90 CHF/h			
Werkzeuge im Mittel		30 CHF/h		40 CHF/h
Total Stundenkosten		120 CHF/h		130 CHF/h
<b>Installation Leitung:</b>				
Rohre ablängen	Anz. Schnitte: 8 Minuten pro Elem. h-tot hierfür Kosten hierfür	5.00 0.67 80 CHF	2.5 12.5 1.67	216.67 CHF
Fittings, Bögen	Anz. Pressungen 26 Minuten pro Elem. h-tot hierfür Kosten hierfür	12.00 5.20 624 CHF	2 24 10.40	1352.00 CHF
Rohrschellen	Anzahl@Abst 3 m 10 Minuten pro Elem. h-tot hierfür Kosten hierfür	8.00 1.33 160 CHF	1 8 1.33	173.33 CHF
Wanddurch- führungen	Anzahl 2 Minuten pro Elem. h-tot hierfür Kosten hierfür	10.00 0.33 40 CHF	1 10 0.33	43.33 CHF
Dilatations- ausgleich	Anzahl@Abst 5 m 6 Minuten pro Elem. h-tot hierfür Kosten hierfür	15.00 1.50 180 CHF	0 60 1.00	90.00 CHF
	Σ Werkzeiten h Vorbereitungszeit h Σ h mit Fahrzeiten und Planung	9.03 2.71 16.45	14.73 4.42 26.57	
<b>Kosten Installation Leitung</b>		<b>58.39 CHF/m</b>	<b>99.36 CHF/m</b>	
<b>Isolation Leitung bzw. Evakuieren</b>				
Hüllen abläng. (Länge norm. 1.2 m)	Anz. Schnitte @50%FittingBogen: Minuten pro Elem. h-tot hierfür Kosten hierfür	16 10.00 2.67 320 CHF	Evakuieren der VSI-Leitung 96.00 CHF	
Isolationshüllen setzen	Anzahl 33 Minuten pro Elem. h-tot hierfür Kosten hierfür	8.00 4.40 528 CHF	Arbeitszeit 3 h/Evakuierung 60 CHF/h Total Evak.: 276.00 CHF	
Bögen+Durch- gänge isolieren	Anz. Minuten pro Elem. h-tot hierfür Kosten hierfür	8.00 15.00 2.00 240 CHF		
	Σ Werkzeiten h Vorbereitungszeit h Σ h mit Fahrzeiten und Planung	9.07 2.72 16.51		
<b>Kosten Installation Isolation bzw. Evakuieren</b>		<b>58.95 CHF/m</b>	<b>9.20 CHF/m</b>	
<b>Kosten Installation isolierte Leitung total</b>		<b>116.98 CHF/m</b>	<b>108.56 CHF/m</b>	

Tab. 16 Schätzung der Installationskosten konventionell und VSI am Beispiel einer DN25 Leitung

#### 4.2.4 Abschätzung der Kosten für die in Betrieb genommene VSI-Leitung

Innen-Rohr Øa	VSI-Rohr CHF/m	Installation CHF/m	∑Fittings CHF/m	Getter + Ventil CHF/m	Abpump-Ventil CHF/m	Abpumpen CHF/m	Total CHF/m	Energie-spar-potenzial CHF/m*a
15	17.00	82.13	2.08	2.67	2.00	4.80	110.67	3.72
18	18.00	90.94	2.24	3.00	2.00	4.80	120.98	3.87
22	21.10	99.75	2.50	3.33	2.17	4.80	133.65	4.00
28	23.30	108.56	2.92	3.67	2.17	4.80	145.41	4.20
35	30.10	117.37	3.28	3.67	2.17	4.80	161.39	4.63
42	34.20	126.18	4.06	4.00	2.33	4.80	175.58	4.82
54	41.60	134.99	4.66	4.00	2.33	4.80	192.39	4.98

Tab. 17 Kosten der in Betrieb genommenen VSI-Leitung und Energiesparpotenzial

Die in Tabelle Tab. 17 dargestellten Kosten setzen sich zusammen, aus den in den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3 gezeigten Kosten, sowie den zusätzlichen Kosten für VSI-Fittings, Getter und Get-terventil, das Abpumpventil und für den Arbeitsaufwand beim Abpumpen.

Die dank der Energie-Einsparung gegenüber normgerecht konventionell gedämmten Rohren erzielbaren Kosteneinsparungen errechnen sich mit der aus Fig. 18 bzw. Fig. 34 ableitbaren Differenz zwischen den Ur Werten der normgerechten konventionellen Leitung und der VSI-Leitung mit durchgehendem Vakuumpalt, wobei ein mittlerer Energiepreis von CHF 0.09 pro kWh angenommen wurde.

#### 4.2.5 Abschätzung der Kosten der normgerecht isolierten, konventionellen Leitung

Als Vergleichsbasis zeigt Tab. 18 die Kostenschätzung fertig installierter konventionell mit Glaswolle-Hüllen isolierter Warmwasserleitungen, wobei einerseits als "Billig-Variante" flexible PEX-Rohre und andererseits starre Edelstahlrohre berücksichtigt sind.

Øa	PEX-Rohr+ Fit-tings@ 5m		Stahl Rohr+ Fit-tings@ 2.5m		Glaswolle Isolationshüllen			Total Mat	Install. Rohr +Isol	Total alles PEX	Total alles Stahl
	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	s-SIA soll	s-ist mm	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m
15	2.67	9.07	6.10	13.61	40	40	7.30	20.91	91.43	105.03	112.34
18	2.80	7.16	6.90	17.05	42	40	7.60	24.65	99.94	114.71	124.60
22	4.40	9.94	9.55	22.83	45	50	10.80	33.63	108.46	129.20	142.09
28	8.00	14.75	12.60	30.79	49	50	10.90	41.69	116.98	142.63	158.67
35	12.60	21.88	19.40	46.99	53	50	10.90	57.89	125.50	158.28	183.39
42	15.93	31.06	23.70	65.89	58	60	15.30	81.19	134.02	180.38	215.20
54	25.07	51.90	30.00	90.83	63	60	15.30	106.13	142.53	209.73	248.66

Tab. 18 Kostenschätzung fertig installierter, konventionell isolierter Leitungen

#### 4.2.6 Vergleich und Potenziale

In Tab. 19 und Fig. 36 sind die in den vorangehenden Abschnitten erarbeiteten Gestehungskosten verschieden isolierter Leitungen zusammen mit dem erzielbaren jährlichen Energiekosten-Sparpotenzial dargestellt.

Stahl- Leitung konv.	PEX- Leitung konv.	VSI- Leitung	Energie- spar- potenzial	time to break even vs.Inox	time to break even vs. PEX	Gewinn in 30a bez. Inox	Gewinn in 30a bez. PEX
CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m*a	a	a	CHF/m	CHF/m
112.34	105.03	110.67	3.72	0.00	1.65	104.28	96.96
124.60	114.71	120.98	3.87	0.00	1.80	108.44	98.55
142.09	129.20	133.65	4.00	0.00	1.24	116.10	103.21
158.67	142.63	145.41	4.20	0.00	0.75	124.95	108.91
183.39	158.28	161.39	4.63	0.00	0.80	138.06	112.95
215.20	180.38	175.58	4.82	0.00	0.00	159.68	124.85
248.66	209.73	192.39	4.98	0.00	0.00	182.31	143.38

Tab. 19 Kosten und Potenziale

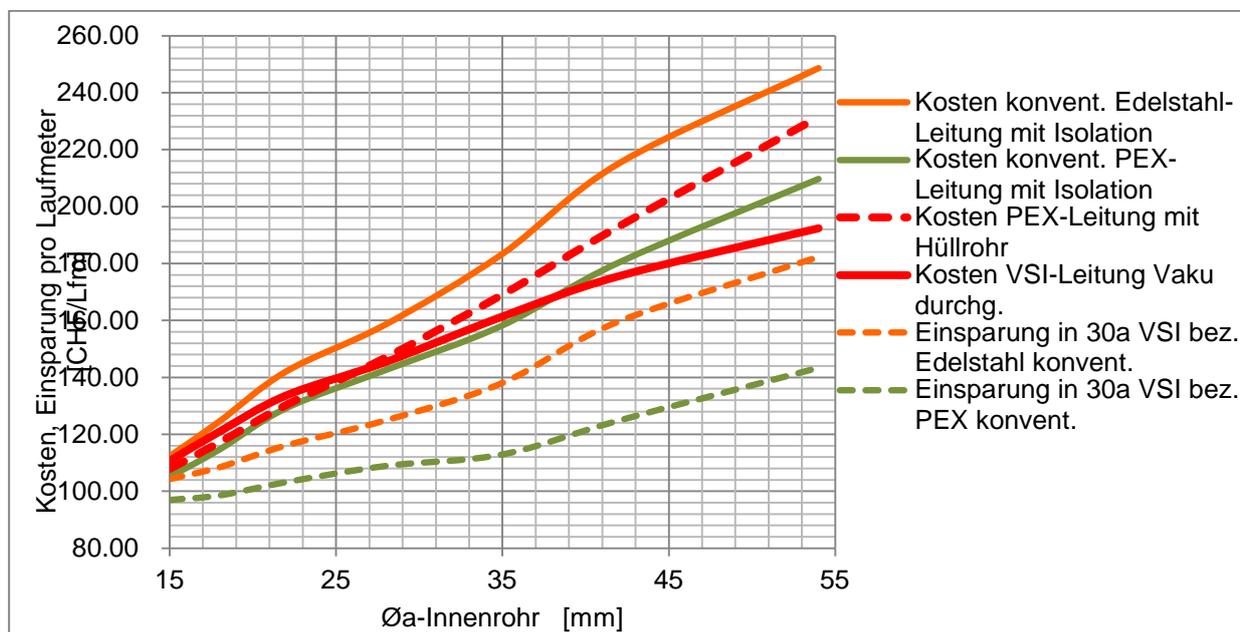


Fig. 36 Kosten und Potenziale

Es ist erkennbar, dass – unter den von uns getroffenen Annahmen - die Gestehungskosten einer fertig installierten und in Betrieb genommenen 30 m langen VSI-Leitung mit durchgehendem Vakuumspalt für alle Nenndurchmesser tiefer liegen als die entsprechenden Kosten einer normgerecht konventionell isolierten Warmwasserleitung aus Edelstahl.

Im Vergleich zu der kostengünstigsten Variante einer konventionell isolierten Leitung, der Leitung aus flexiblen PEX Rohren, liegen die Kosten der VSI-Leitung bei kleinen Durchmessern leicht höher und bei grossen Durchmessern leicht tiefer. Die "time to break-even", d.h. die nötige Zeitdauer um durch Energiekosten-Einsparung die Gestehungs-Mehrkosten auszugleichen, ist aber in jedem Fall kleiner als 2 Jahre und unterschreitet damit unsere Anforderung von 10 Jahren (Tab. 5) deutlich. Die innerhalb der "Norm-Lebensdauer" von 30 Jahren kumulierten Kosteneinsparungen liegen in der Grössenordnung der Gestehungskosten, womit sich die VSI-Leitung annähernd "selbst bezahlt".

Zum Vergleich sind auch die geschätzten Kosten einer mit VSI-Hüllrohren isolierten, neuen PEX-Leitung in Fig. 36 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass diese Variante aus wirtschaftlicher Sicht eine valable Alternative zu neu erstellten VSI-Leitungen mit durchgehendem Vakuumspalt darstellt.

### 4.3 Kostenschätzung und Potenziale für einen Retrofit mit VSI-Hüllrohren

In Fig. 37 sind die - entsprechend den vorangehenden Abschnitten geschätzten, hier aber nicht detailliert besprochenen - Gestehungskosten für den Retrofit einer bestehenden Warmwasserleitung dargestellt.

Dabei wurde davon ausgegangen, dass der Retrofit mit den in Abschnitt 3.2 besprochenen VSI-Hüllrohren durchgeführt wird und die in Fig. 34 mit durchgezogener, blauer Linie dargestellten Ur Werte aufweist.

Als Vergleichsgrösse wurde ein konventioneller Retrofit der alten Leitung mit einer neuen, normgerechten Isolationshülle aus Glaswolle geschätzt.

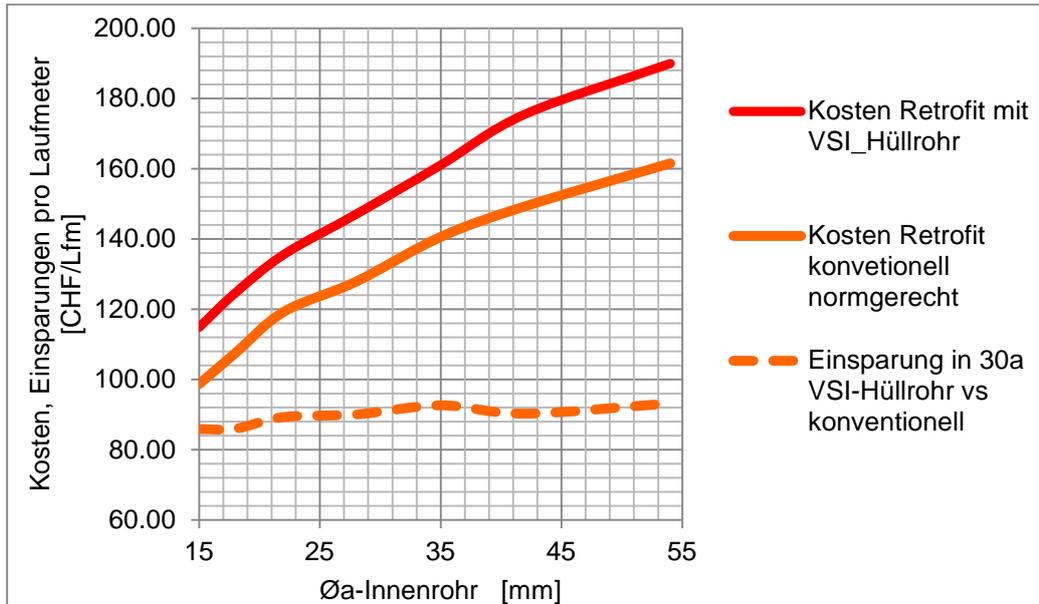


Fig. 37 Retrofit Kosten und Einsparpotenzial

Es zeigt sich, dass die Kosten eines Retrofits mit VSI-Hüllrohren deutlich höher sind als bei Verwendung konventioneller Isolationshüllen. Trotzdem ergibt sich dank den erzielbaren Energieeinsparungen innerhalb der "Norm-Lebensdauer" von 30 Jahren ein deutliches Kosten-Einsparpotenzial von ca. CHF 90.00 pro Laufmeter Leitung.

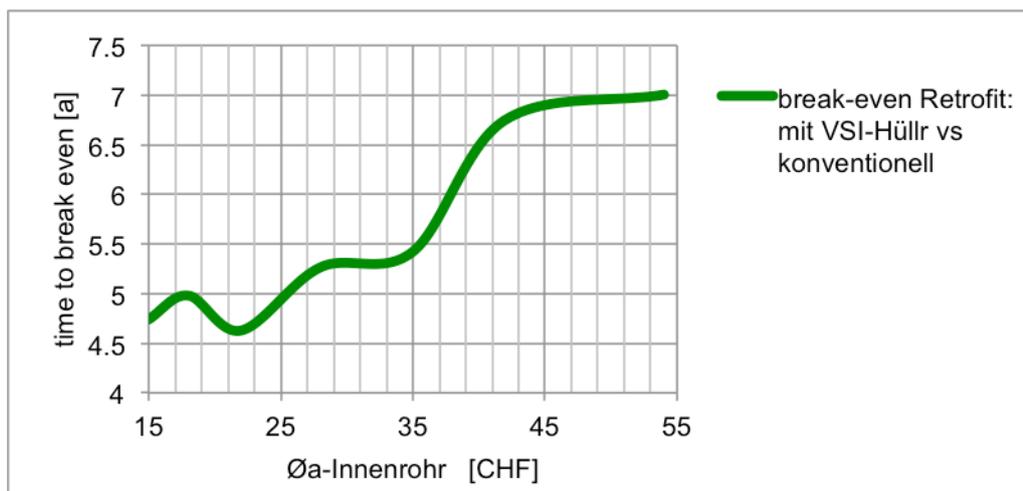


Fig. 38 time to break-even bei Retrofit mit VSI-Hüllrohren statt mit Glaswollehüllen

Von hohem Interesse ist auch das in Fig. 38 dargestellte Resultat. Es zeigt, dass die "time to break-even", d.h. die nötige Zeitdauer um durch Energiekosten-Einsparung die Gestehungs-Mehrkosten auszugleichen, für alle Durchmesser kleiner als 7 Jahre ist und damit unsere Anforderung von 10 Jahren (Tab. 5) immer noch deutlich unterschreitet.

## 5 Bewertung und Ausblick

### 5.1 Bewertung

Aufgrund der durchgeführten Arbeiten kann von folgendem ausgegangen werden:

- Die Technik von VSI-Rohren ist seit langem bekannt und bewährt. Der Einsatz der entsprechenden Rohre beschränkt sich bisher jedoch auf Anwendungen, bei denen die Rohre sehr teuer sein können und wirtschaftlich trotzdem immer noch hoch interessant sind.
- Für VSI-Warmwasserleitungen im Hausbau muss gelten, dass allfällige Mehrkosten der fertig installierte VSI-Leitung gegenüber einer konventionellen, normgerecht isolierten Leitung durch Energiekosten-Einsparungen innerhalb höchstens 10 Jahren ausgeglichen werden. Damit dies erreicht wird, müssen die VSI-Warmwasserleitungen wesentlich kostengünstiger sein, als die heute am Markt erhältlichen Rohre mit Vakuumpspalt.
- Die vorliegende Untersuchung hat ergeben, dass derartig kostengünstige VSI-Leitungen realisierbar sein sollten. Weiter ist zu erwarten, dass die theoretisch erreichbaren Energiekosten-Einsparungen, im Vergleich zu konventionellen, normgerecht isolierten PEX Leitungen, so hoch sind, dass die Zeitdauer bis zum Ausgleich allfälliger Mehrkosten (time to break-even) deutlich unterhalb der von uns als Minimalforderung gestellten Zeit von 10 Jahren sehr wahrscheinlich ist. Für eine neue erstellte VSI-Leitung beträgt die von uns abgeschätzte time to break-even für alle Rohr-Nennweiten weniger als 2 Jahre, für einen Retrofit einer bestehenden Leitung mit VSI-Hüllrohren weniger als 7 Jahre.
- Sowohl für neu erstellte VSI-Leitungen mit durchgehendem Vakuumpspalt als auch für den Retrofit einer bestehenden Leitung mit VSI-Hüllrohren scheint ein Ansatz für die Installation derartiger Leitungen vorhanden zu sein, der vom Installateur kostengünstig durchgeführt werden kann.
- Für den Aufbau von kostengünstigen VSI-Rohren sind geeignete Materialien vorhanden welche bezüglich den Ausgasraten auf kostengünstige Weise so konditioniert werden können, dass sie den Anforderungen genügen.
- Es darf davon ausgegangen werden, dass Verbindungsfitings zwischen den einzelnen VSI-Rohren kostengünstig sein und genügend kleine Leckraten aufweisen können.
- Das Gettern von Gasen welche durch Ausgasen und Leckage in den Vakuumpspalt eintreten kann gewährleistet werden
- Einfach aufgebaute Absaugventile mit sehr kleinen Leckraten können konstruiert werden.
- Der Aufbau von VSI-Rohrkrümmern und –Abzweigern stellt kein grösseres Problem dar.
- Das Abpumpen einer fertigen, bis zu 50 m langen, VSI-Leitungen mit durchgehendem Vakuumpspalt, kann mit einer kleinen, kostengünstigen Pumpe geschehen.

In Summe darf also davon ausgegangen werden, dass Warmwasserleitungen mit Vakuumpspalt-Isolation sowohl im Fall von Neuinstallationen als auch im Fall des Retrofits einer bestehenden Leitung technisch machbar und wirtschaftlich interessant sind.

### 5.2 Ausblick

Aufgrund dieser sehr positiven Bewertung, muss ein nächster Schritt in Richtung der Industrialisierung der Resultate gehen, was offensichtlich nur möglich ist, wenn ein idealerweise auf dem Gebiet der Rohrherstellung tätiger Projektpartner gefunden werden kann.

Helbling Technik AG führt momentan in dieser Hinsicht sehr intensive, vielversprechende Gespräche mit einer entsprechenden marktbekanntem Firma.

Das Ziel eines entsprechenden Projektes könnte die Erstellung einer Prototyp ähnlichen Demonstrationsanlage sein, welche beispielsweise eine VSI-Ringleitung mit einigen Ausstossleitungen, die notwendigen Umwälzpumpen, einen – allenfalls ebenfalls mit VSI versehenen – Boiler und natürlich die notwendigen Messgeräte zur Ermittlung Kennwerte beinhaltet. Als Vergleichsobjekt sollte zusätzlich eine entsprechende zweite Anlage mit einer konventionellen, normgerecht gedämmten Ringleitung aufgebaut werden.