



Thermische Isolation einer kryogenen Aufbereitungsanlage für Biogas

**Untersuchung zur Reduzierung von Wärmeverlusten im
Tiefemperaturbereich**

**Bachelorarbeit zum Erlangen des akademischen Grades
Bachelor of Engineering**

Aufgabensteller:

Hochschule Landshut

Betreuung:

Prof. Dr.-Ing. Tim Rödiger

Vorgelegt von:

Martin Jaufmann
84478 Waldkraiburg

Am:

16.03.2015

Be the change you want to see in this world.

Mohandas Gandhi

Erklärung

Name, Vorname des Studierenden:

Jaufmann, Martin

Matrikelnummer:

407821

Hochschule Landshut

Fakultät Maschinenbau

Studiengang:

Maschinenbau

Hiermit versichere ich, die Bachelorarbeit „Thermische Isolation einer kryogenen Aufbereitungsanlage für Biogas: Untersuchung zur Reduzierung von Wärmeverlusten im Tieftemperaturbereich“ selbstständig angefertigt, alle verwendeten Quellen angegeben sowie wörtliche und sinngemäße Zitate gekennzeichnet zu haben.

Weiterhin erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit nicht im Rahmen eines anderen Prüfungsverfahrens eingereicht wurde.

Die Bachelorarbeit darf über die Fachhochschulbibliothek zugänglich gemacht werden.

Ort, Datum _____

Unterschrift _____

Vorwort, Danksagung

Die vorliegende Bachelorarbeit wurde im Rahmen des Projektes *Herstellung von flüssigem Biomethan aus Biogas zur Langzeitspeicherung von Energie* der Hochschulen Weihenstephan und Landshut angefertigt. Diese erforschen und entwickeln ein neuartiges Biogasaufbereitungsverfahren, das eine Umwandlung von Biogas zu flüssigem Biomethan (LBM, aus dem Englischen: liquified biomethane) und festem Kohlenstoffdioxid (Trockeneis) ermöglicht (HAW Landshut, 2014).

Ich möchte mich bei den Teilnehmern des Projektes für die gute Zusammenarbeit in den letzten Monaten bedanken. Ein besonderer Dank gilt Herrn Korbinian Nachtmann, der während der Anfertigung der Abschlussarbeit mit tatkräftiger Unterstützung zur Seite stand.

Dem Bayerischen Institut für Umwelt- und Kläranlagentechnologie „BIUKAT“ möchte ich für die finanzielle Unterstützung danken, sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Josef Hofmann, dem Initiator dieser Bachelorarbeit.

Bei Herrn Fabian Henning vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt „DLR“ möchte ich mich für die Bereitstellung der Isolationsprobe bedanken.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Tim Rödiger für die Betreuung der Bachelorarbeit seitens der Hochschule Landshut.

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, durch intensive Untersuchungen die am besten geeignete thermische Isolation für eine Aufbereitungsanlage für Biogas zu finden. Die Anlage, welche von der Hochschule Landshut entwickelt und gebaut wird, arbeitet nach dem Tieftemperatur-Desublimationsverfahren, das die „Herstellung von flüssigem Biomethan [...] aus Biogas bei tiefen Temperaturen“ (Nachtmann, 2012) bei ca. -164 °C gewährleistet. Bei einer Raumtemperatur von 26 °C liegt die Temperaturdifferenz damit bei ca. 190 K , die bei der Wärmeübertragung einen großen Faktor darstellt. Da die übertragene Wärmeleistung die elektrische Leistung der Kältemaschine stark beansprucht, gilt es die Wärmeverluste mithilfe geeigneter Isolierungen zu verringern.

Im ersten Teil der Arbeit sind verschiedene Isolierungsmöglichkeiten für den Tieftemperaturbereich, auch Kryotechnik genannt, zu vergleichen und anhand eines morphologischen Kastens und definierten Anforderungen zu bewerten. Bei den Untersuchungen wird besonderes Augenmerk auf die Realisierung bei vorhandener Geometrie sowie auf die Kostenoptimierung gelegt.

Die Anlage beinhaltet drei Wärmetauscher, die die Temperatur des Gases sukzessiv auf das gewünschte Niveau absenken. Um ausgefrorenen Stoffe aus dem ersten Wärmetauscher untersuchen zu können, wird der Reaktor ca. ein Mal pro Monat geöffnet. Folglich gilt es eine thermische Isolation zu finden, die leicht (de-)montiert werden kann.

Darüber hinaus ist im zweiten Abschnitt die Verlustleistung unter Zuhilfenahme verschiedener Modelle für die favorisierte Isolierung aus dem ersten Teil zu berechnen und mit der Verlustleistung der Anlage ohne Isolierung zu vergleichen.

Inhaltsverzeichnis

<i>Erklärung</i>	II
<i>Vorwort, Danksagung</i>	III
<i>Zielsetzung</i>	IV
<i>Inhaltsverzeichnis</i>	V
<i>Verzeichnis der Abkürzungen, Indizes und Formelzeichen</i>	VII
<i>Einleitung</i>	1
<i>Grundlagen der Wärmeübertragung</i>	2
1. Wärmeleitung	2
1.1 Festkörperwärmeleitung	2
1.2 Restgaswärmeleitung	4
2. Konvektion	6
3. Strahlung	7
3.1 Vereinfachte Strahlungsbeziehungen	8
3.2 Berücksichtigung wechselseitige Reflexionen	10
<i>Überblick: Isolationsmöglichkeiten in der Kryotechnik</i>	12
1. Nicht evakuierte Isolationen	13
1.1 Zelluläre Isolationen	13
1.2 Perlit- und Faserisolationen	16
1.3 Strahlungsschilde	19
2. Evakuierte Isolationen	20
2.1 Vakuumisolationen	20
2.2 Perlitschüttungen	21
2.2.1 Herkömmliche Perlite	21
2.2.2 Perlit mit Spanzusatz	24
2.2.3 Mikrokugeln	25
2.3 Multi-Lagen-Isolation (MLI)	26
2.4 Hilfsstoffe	34
3. Flüssigkeitsschilde	34
4. Fazit	35
<i>Anforderungsliste, Morphologischer Kasten und Stärkediagramm</i>	36
<i>Plausibilitätsprüfung des Programms AUWÄ</i>	41
<i>Berechnung der Wärmeverluste</i>	45
1. Verlustleistungen im Trockeneisaustragsystem	45
1.1 Festkörperwärmeleitung	46
1.1.1 Kupferbehälter – PCTFE-Körper	46
1.1.2 Wärmeübertragungsplatte – PCTFE-Dichtring	47
1.2 Strahlungsverluste	48
2. Restgaswärmeleitung	48
3. Strahlungsverluste der Nebenbauteile	50
3.1 Kamerasystem	51
3.2 Kupferlitzen	51
3.3 Gasleitungen	51
4. Strahlungsverluste unter Berücksichtigung wechselseitiger Reflexionen	52
4.1 Theoretische Vorgehensweise	52
4.2 Berechnung der Strahlungsverluste	57
5. Berechnungen mit integrierter Isolation	60

5.1 Berechnung der Verluste unter Anwendung von Strahlungsschilden	60
5.2 Diskussion der Ergebnisse	63
<i>Zusammenfassung</i>	65
<i>Literaturverzeichnis</i>	IX
<i>Bildquellen</i>	XII
<i>Anhang</i>	XIII

Verzeichnis der Abkürzungen, Indizes und Formelzeichen

Abkürzungen

∅	Durchmesser	KS	Kamerasystem
%	Prozent	LBM	Flüssiges Biomethan
°C	Grad Celcius	Ma.-%	Masseprozent
Abb.	Abbildung	MLI	Multi-Lagen-Isolation
Al	Aluminium	MPET	Metallisierte Kunststoffolie
AUWÄ	Berechnungsprogramm	Ne	Neon
CH ₄	Methan	NEPF	Nicht evakuierte Perlite/Faser
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	O	Perlit mit Spanzusatz
Cu	Kupfer	PCTFE	Polychlortrifluorethylen
EPF	Evakuierte Perlite/ Faser	S	Schaum
FE	Flächenelement	SKV	Strahlungsschild ohne Vakuum
ff.	folgende Seiten	Tab.	Tabelle
GLK	Gasleitung kurz	TTD	Tief-Temperatur-Desublimation
GLL	Gasleitung lang	V	Vakuum
GP	Grundplatte	VDI	Verein deutscher Ingenieure
grad	Gradient	vgl.	vergleiche
H ₂	Wasserstoff	W	Watt
He	Helium	WT	Wärmetauscher
K	Kelvin	WÜP	Wärmeübertragungsplatte
KKO	Kaltkopf oberer Teil	ΔT	Temperaturunterschied
KKU	Kaltkopf unterer Teil	π	Kreiszahl PI (3,14)
KL	Kupferlitzen		

Indizes

0	Mittlere	G	Gas
1	Innen liegend	K	Kalt
12	Von 1 nach 2	R	Reflektiert
2	Außen liegend	S	Strahlung
21	Von 2 nach 1	Spez.	spezifisch
AH	Abstandshalter	T	Transmittiert
E	Emittiert	V	Volumen
eff	Effektiv	W	Warm
F	Feste Partikel	x	Beliebige Variable

Formelzeichen

A	Fläche	in m
a	Akkomodationskoeffizient	---
\AA	Angstrom	in m
c_p	Wärmekapazität bei konstantem Druck	in J/kgK
c_V	Wärmekapazität bei konstanten Volumen	in J/kgK
d	Dicke der Isolation	in m
e	Spektrale Intensität	in W/m ²
F_a	Akkomodationsfaktor	---
k	Wärmedurchgangskoeffizient	in W/mK
Kn	Knudsen-Zahl	---
L	Mittlere freie Weglänge	in m
M	Molare Masse	in kg/mol
\dot{m}	Massenstrom	in kg/s
N	Anzahl	---
Nu	Nußelt-Zahl	---
p	Druck	in Pa oder bar
\dot{Q}	Wärmestrom	in W
\dot{q}	Wärmestromdichte	in W/m ²
R	Allgemeine Gaskonstante	in J/molK
r	Radius	in m
$R_{spez.}$	Spezielle Gaskonstante	in J/kgK
s	Charakterlänge / Verbindungslinie	in m
T	Temperatur	in K
t	Zeit	in s
v	Geschwindigkeit	in m/s
\dot{V}	Volumenstrom	in m ³ /s
x	Beliebiger Zahlenwert	---
Δx	Dicke der Multi-Lagen-Isolation	in m
α	Wärmeübergangszahl	in W/m ² K
α_s	Absorptionsgrad	---
β	Winkel	in °
γ	Isentropenkoeffizient	---
δ	Winkel (Modell)	in °
ϵ	Emissionsgrad	---
λ	Wärmeleitfähigkeit	in W/mK
λ_w	Wellenlänge	in nm
μ	Dynamische Viskosität	in Pas
ρ	Reflexionsgrad	---
ϱ	Dichte	in kg/m ³
σ	Stefan-Boltzmann Konstante	in W/m ² K ⁴
τ	Transmissionsgrad	---
φ	Einstrahlzahl	---

Die verwendeten Präfixe entsprechen dem internationalen Einheitssystem (SI-Präfix).

Beispiel: kg = Kilogramm: 10³ Gramm

Einleitung

Abb. 1 zeigt ein Ölgemälde von 1905, das eine Vorlesung über flüssigen Wasserstoff in der „Royal Institution of Great Britain“ darstellt. Der lehrende Dozent ist James Dewar, ein schottischer Physiker und Chemiker. James Dewar hat mit seiner Erfindung im Jahre 1893 – einem doppelwandig verspiegelten und evakuierten Behälter die Kryotechnik revolutioniert (Wikipedia, 2015). Das Vakuum unterbindet die Wärmeübertragung mittels Konvektion, die verspiegelten Wände reflektieren thermische Strahlung. Fortan waren der Transport und die Lagerung flüssiger Gase und extrem kalter Stoffe möglich.



Abbildung 1: Eine Vorlesung in der Royal Institution/ Großbritannien (nach BBC, 2015)

Bis heute wurden auf Grundlage dieser Erfindung Isolationen für die Tieftemperaturtechnik entwickelt und perfektioniert. So gelang es 1951 Petersen eine mehrschichtige, hochreflektierende Isolation herzustellen, die noch heute in komplexen, kryogenen Anwendungen, wie der Raumfahrt Einsatz findet (Barron, 1985).

Da die Tieftemperaturtechnik weiterhin von Ingenieuren und Wissenschaftlern weltweit erforscht wird, ist es möglich, dass eines Tages Pioniere wie Dewar und Petersen sie waren eine Isolationsmethode entdecken, die Systeme nahezu adiabatisch machen.

Grundlagen der Wärmeübertragung

Der Begriff Wärme wird im alltäglichen Sprachgebrauch irrtümlich als „Zustand des Warmseins“ (Duden, 2015) bezeichnet. Diese Betrachtungsweise ist aus thermodynamischer Sicht nicht korrekt. Wärme stellt eine Form der Energie dar, die aufgrund von Temperaturunterschieden ohne Arbeitsleistung einem System entzogen oder zugeführt wird (Polifke, 2005). Dies entspricht der Gesetzmäßigkeit der Wärmeübertragung. Systeme unterschiedlicher Temperatur gleichen sich aus ($\Delta T \rightarrow 0$).

Grundsätzlich lässt sich die Wärmeübertragung in drei Mechanismen einteilen, die mit Anstieg des Temperaturunterschieds zunehmen: *Wärmeleitung*, *Konvektion* und *Wärmestrahlung*. Parameter wie Material und Geometrie sowie andere Randbedingungen, wie zum Beispiel Vakuum sind bei der Übertragung von Wärmeleistungen ebenso relevant. Diese drei Mechanismen werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei bei der Erklärung der, im Berechnungsteil, verwendeten Gleichungen.

1. Wärmeleitung

Wärmeleitung, auch Konduktion genannt, ist ein diffusiver Energietransport infolge von atomaren und molekularen Wechselwirkungen, Gitterschwingungen (Phononen) und freier Elektronen. Anders als bei Wärmestrahlung ist dazu ein Medium, wie ein ruhendes Fluid oder ein Festkörper nötig (Rödiger, 2013).

1.1 Festkörperwärmeleitung

Wärmeleitung zwischen zwei Festkörpern findet nur dann statt, wenn ein direkter Kontakt besteht. Aufgrund eines Temperaturunterschieds werden die Atome in Schwingung versetzt, was zu einer chaotischen Teilchenbewegung führt. Da die Atome eines Festkörpers in einer Gitterstruktur gebunden sind, ist eine Weitergabe der Energie ohne Medienbewegung möglich. Um sich diesen Vorgang besser vorstellen zu können, kann Wärmeleitung mit dem wie in Abb. 2 dargestellten Weiterreichen eines Eimers verglichen werden. Der Wassereimer stellt dabei die übertragene Energiemenge dar, das Greifen und Weitergeben des Eimers die Phononen. Obwohl sich die Atome, hier durch Menschen abgebildet, nicht bewegen, gelingt ein Wärmetransport.

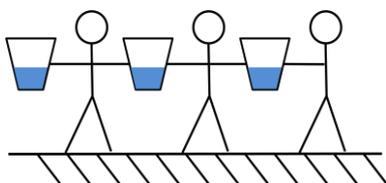


Abbildung 2: Analogie zum Feuerlöschen (eigene Anfertigung nach Polifke)

Die übertragene Wärmeleistung wird durch das Fouriersche Gesetz beschrieben, das in seiner vektoriellen Form wie folgt nach Gleichung 1.1 lautet:

$$\dot{\vec{q}} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (1.1)$$

Dabei ist \dot{q} die Wärmestromdichte pro Einheitsfläche, λ die Wärmeleitfähigkeit eines Materials und $\text{grad}(T)$ der negative Temperaturgradient. Das negative Vorzeichen der Gleichung zeigt, „dass ein positiver Wärmestrom stets in Richtung eines negativen Temperaturgradienten zeigt“ (VDI, 2013).

Für eindimensionale Fälle, bei welchen die Temperaturverteilung nur von der x-Koordinate abhängt, ist folgende Schreibweise (Gleichung 1.2) des Fourierschen Gesetzes möglich:

$$\dot{q}_x = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1.2)$$

Wird der einfache Fall durch eine isotrope, ebene Platte der Dicke d betrachtet, so ändert sich der Temperaturverlauf nur mit der x-Koordinate (Abb. 3).

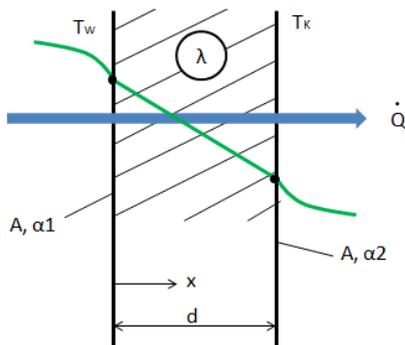


Abbildung 3: Temperaturverteilung durch eine isotrope, ebene Platte (eigene Anfertigung nach Polifke)

Durch Integration und anschließender Multiplikation mit der Fläche sowie unter Annahme eines linearen Temperaturprofils im quasi-eindimensionalen Fall, verändert sich Gleichung 1.2 (Gleichung 1.3):

$$\dot{Q} = A \frac{\lambda}{d} (T_w - T_K) \quad (1.3)$$

Sind die Temperaturen der Systemgrenzen gegeben, kann die Festkörperwärmeleitung anhand dreier Stellhebel (A , d , λ) minimiert werden. An dieser Stelle sei ein Beispiel aus der Praxis eingeführt, das diesen Zusammenhang verdeutlicht.

In einem Kryostaten befinden sich viele Aufhängungen wie Kabel oder Leitungen, die Wärmebrücken darstellen und so die Verlustleistung erhöhen. Bei der Konstruktion ist darauf zu achten, dass diese Aufhängungen aus einem Material möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit gebaut sind. Außerdem ist die Querschnittsfläche auf ein Minimum zu reduzieren und die Länge auf ein Maximum zu erhöhen (Kaganer, 1969). Die thermische

Strahlung (siehe 3.) darf dabei allerdings nicht vernachlässigt werden. Es gilt anhand einer Verlustberechnung ein Optimum zwischen den Übertragungsarten zu finden.

1.2 Restgaswärmeleitung

Restgaswärmeleitung bezeichnet den Energieaustausch zwischen Gasmolekülen untereinander sowie mit Oberflächen unterschiedlicher Temperatur. Mit sinkendem Druck in einem System nimmt auch die Anzahl der Moleküle im Gas und somit die mittlere freie Weglänge L ab¹. Nähert sich die mittlere freie Weglänge, im Folgenden MFW, der Größenordnung der charakteristischen Länge s , die dem Abstand zweier Oberflächen entspricht (Smoluchowski-Effekt), lässt sich die Restgaswärmeleitung mithilfe der Knudsen-Zahl in drei Bereiche einteilen (Lehmann, Jahr unbekannt). Die nach dem dänischen Naturwissenschaftler Martin Knudsen benannte Knudsen-Zahl (Wikipedia, 2015), ist ein dimensionsloser Faktor, der das Verhältnis zwischen MFW und Charakterlänge darstellt (Gleichung 1.4).

$$Kn = \frac{L}{s} \quad (1.4)$$

Zur Berechnung der MFW gibt es verschiedene Möglichkeiten. Nach (Barron, 1985) ist sie durch folgenden Ausdruck (Gleichung 1.5) berechenbar:

$$L = \frac{\mu}{p} \cdot \left(\frac{\pi R_{spez} T}{2} \right)^{0,5} \quad (1.5)$$

A) **Kn << 1** – Bereich der Gaswärmeleitung: Der Energieaustausch findet vor allem durch Kollisionen zwischen den Gasmolekülen statt. Stöße mit den umgebenden Oberflächen sind vernachlässigbar.

B) **Kn ≈ 1** – Übergangsbereich mit Smoluchowski-Effekt: Der Energieaustausch findet durch Zusammenstöße der Moleküle untereinander sowie mit den Oberflächen statt.

C) **Kn >> 1** – Bereich der Restgaswärmeleitung: Ist die Knudsen-Zahl größer als 1, fliegen die Moleküle direkt von der warmen Oberfläche zur kalten und geben einen Teil ihrer Gesamtenergie (innere und kinetische Energie (Barron, 1985)) ab. Der Energietransport der Moleküle kann mit dem Akkomodationskoeffizienten (a) beschrieben werden, der die Wärmeleitungsbeziehung beeinflusst.

Mathematisch betrachtet ist der Akkomodationskoeffizient das Verhältnis zwischen der tatsächlich ausgetauschten Wärmemenge zu der maximal austauschbaren Wärmemenge. Sein Wert ist abhängig vom Gas sowie der Oberflächentemperatur (Atrey, 2014).

¹ Die mittlere freie Weglänge ist der durchschnittlich zurückgelegte Weg von A nach B eines Moleküls ohne Kollision mit einem anderen Molekül.

$$a = \frac{\text{tatsächlicher Energieaustausch}}{\text{maximaler Energieaustausch}}$$

Die Moleküle können nicht ihre gesamte Energiemenge abgeben, da die Zeit des direkten Kontaktes mit der Oberfläche von zu kurzer Dauer ist, was einen thermischen Ausgleich unmöglich macht. Abschließend lässt sich der Akkomodationsfaktor F_a nach Gleichung 1.6 bilden (Timmerhaus, 2013), der die Akkomodationskoeffizienten und Flächen beider Oberflächen berücksichtigt:

$$F_a = \left(\frac{1}{a_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{a_2} - 1 \right) \right)^{-1} \quad (1.6)$$

Für eine detaillierte Herleitung zum Akkomodationsfaktor wird auf entsprechende Fachliteratur hingewiesen [Timmerhaus S. 383 ff.]; [Barron S. 388 ff.]; [Vorlesung Prof. Atrey].

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für konzentrische Zylinder einige Annäherungen für die Akkomodationskoeffizienten existieren (vgl. Tab. 1), die für viele ingenieurmäßige Berechnungen ausreichen.

Tabelle 1: Akkomodationskoeffizienten für konzentrische Zylinder (nach Flynn, 2009)

Temp. (K)	He	H ₂	Ne	Luft
300	0,29	0,29	0,66	0,8 – 0,9
78	0,42	0,53	0,83	1
20	0,59	0,97	1	1

Aus der kinetischen Gastheorie folgt der, durch den Akkomodationsfaktor beeinflussten, Term zur Berechnung der Restgaswärmeleitung. Bevor sich die Verlustleistung durch das Restgas berechnen lässt, muss geprüft werden, ob die Knudsen-Zahl $Kn \gg 1$ ist (Barron, 1985). Die Berechnung der Wärmeverluste erfolgt durch Gleichung 1.7:

$$\dot{Q} = \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right) \left(\frac{R}{8\pi T} \right)^{0,5} \cdot F_a \cdot p \cdot A_1 \cdot \Delta T \quad (1.7)$$

Da die MFW (1.5) invers und Gleichung (1.7) direkt proportional zum Gasdruck ist, lässt sich die Verlustleistung durch Restgaswärmeleitung auf ein vernachlässigbares Niveau bringen, wenn der Druck verringert wird. Der Zusammenhang der Wärmestromdichte ist in Abb. 4 schematisch dargestellt. Ab einem Hochvakuum von $1 \cdot 10^{-5}$ mbar sind diese Verluste vernachlässigbar, wie im Kapitel *Berechnung der Wärmeverluste* nachgewiesen wird (Timmerhaus, 2013).

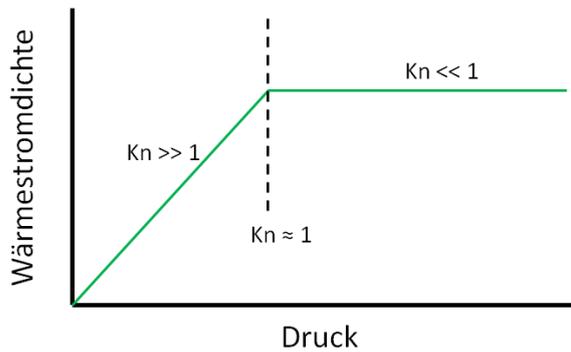


Abbildung 4: Wärmestromdichte in Abhängigkeit des Drucks (schematisch). (nach Timmerhaus, 2013)

2. Konvektion

Der konvektive Wärmeübergang entsteht zwischen einem Körper und einem Fluid, die in relativer Bewegung zueinander stehen. Die Energieübertragung setzt sich aus einer gerichteten Teilchenbewegung (Advektion) und der Konduktion an der Strömungsgrenzschicht zusammen (Rödiger, 2013). Dabei kann die Bewegung entweder von einer externen Quelle, wie beispielsweise einem Gebläse oder einer Pumpe, verursacht werden, was zu einer erzwungenen Konvektion führt oder die Folge eines Temperatur- bzw. Dichteunterschieds im Fluid sein, den man freie Konvektion nennt (siehe Abb. 5).

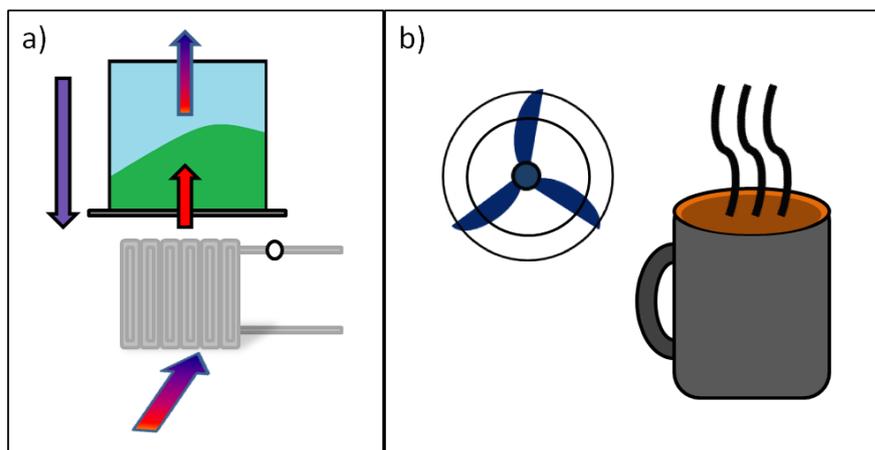


Abbildung 5: a) freie Konvektion b) erzwungene Konvektion. (eigene Anfertigung)

Der durch Konvektion verursachte Wärmestrom wird mithilfe des Newtonschen Gesetzes von 1701 dargestellt (Gleichung 1.8). Dabei hängt er von der Form des Körpers sowie von der Geschwindigkeitsverteilung im Fluid ab (Polifke, 2005).

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_\infty) \quad (1.8)$$

In diesem Fall steht T_w für die Temperatur einer Wand bzw. eines Festkörpers. „Der Wärmeübergangskoeffizient α beschreibt die Fähigkeit eines Gases oder einer Flüssigkeit, Energie von der Oberfläche eines Stoffes abzuführen bzw. [...] abzugeben“ (Wikipedia, 2015). Die Berechnung dieses Faktors stellt ein äußerst schwieriges Problem dar, da zum einen die Geschwindigkeitsverteilung in der Grenzschicht (Abb. 6) von Trägheit und Reibung

beeinflusst wird. Zum anderen ist ein konduktiv-konvektiver Wärmetransport zu berechnen. Ingenieursmäßig betrachtet, gibt es allerdings einige vereinfachte Methoden zur Lösung des Problems. So lässt sich die Wärmeübergangszahl mit der von Wilhelm Nußelt formulierten Gleichung 1.9 berechnen:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot s}{\lambda} \quad (1.9)$$

Die Variable s bezeichnet die charakteristische Länge des Körpers. „Die Nußelt-Zahl wiederum kann für viele Geometrien mittels sogenannter Korrelationen bestimmt werden“ (Polifke, 2005), die von Kennzahlen wie Reynolds- und Prandtlzahl abhängig sind.

Die Wärmeübertragung durch Konvektion ist, genau wie Wärmeleitung, an ein Medium gebunden. Da es sich in dieser Arbeit um eine Hochvakuum-Anwendung handelt, ist die konvektive Verlustleistung vernachlässigbar. Für detaillierte Beschreibungen sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen [Polifke, 2005].

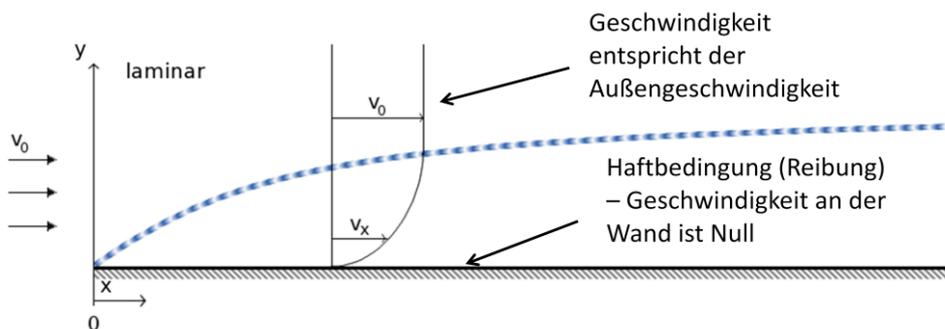


Abbildung 6: Strömungsgrenzschicht. (modifiziert nach Wikipedia, 2015)

3. Strahlung

Wärmestrahlung, auch thermische Strahlung genannt, basiert auf dem „Austausch von Wärme zwischen zwei Körpern unterschiedlicher Temperatur durch elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 0,1 bis 1000 μm “ (rot in Abb. 7) (Polifke, 2005). Der durch Strahlung emittierte Energiestrom umfasst ein breites Spektrum. Das bedeutet, thermische Strahlung ist nur ein Bruchteil der gesamten Strahlung. Jeder Körper mit einer Temperatur größer Null Kelvin sendet Strahlung, die aufgrund einer Umwandlung von innerer Energie entsteht, aus. Grund für diese Transformation sind interatomare Vorgänge (Rödiger, 2013).

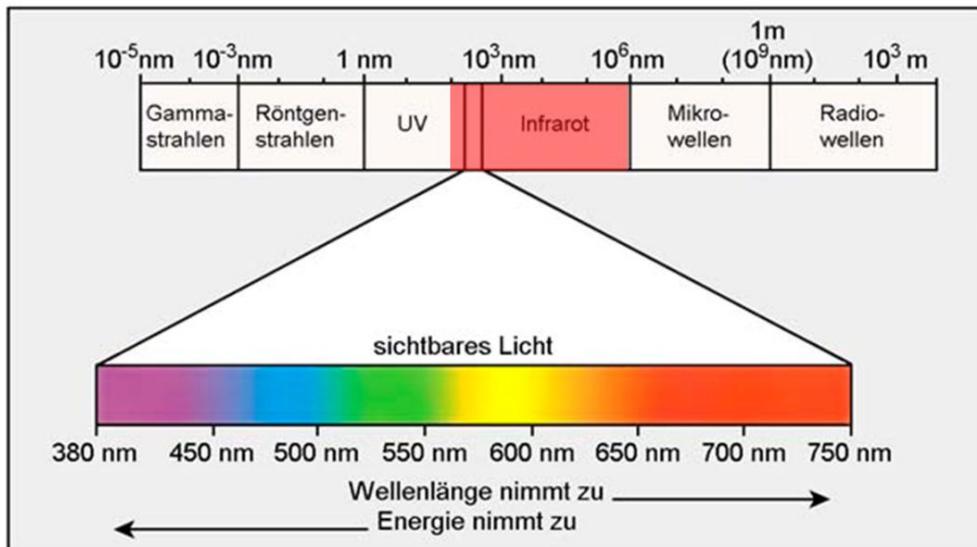


Abbildung 7: Elektromagnetisches Spektrum und sichtbares Licht (nach Uni Düsseldorf)

3.1 vereinfachte Strahlungsbeziehungen

Anders als Wärmeleitung und Konvektion ist die Wärmestrahlung nicht an ein Medium gebunden. Das heißt, selbst in einem perfekten Vakuum ist die Wärmeübertragung durch Strahlung möglich.

Beim Wärmeaustausch strahlender Körper wird zwischen absorbiertes, reflektiertes und transmittiertes Strahlung unterschieden. Daraus bildet sich anschließende Energiebilanz (Gleichung 1.10),

$$\dot{Q} = \dot{Q}_R + \dot{Q}_A + \dot{Q}_T \quad (1.10)$$

die von Parametern, wie Temperatur, Material, Oberflächenbeschaffenheit, Einstrahlwinkel und Wellenlänge der Strahlung abhängig ist. Aus der Energiebilanz lässt sich folgende Beziehung ableiten (Gleichung 1.11):

$$\alpha_S + \rho + \tau = 1 \quad (1.11)$$

wobei α_S dem Absorptionsgrad, τ dem Transmissionsgrad und ρ dem Reflexionsgrad entspricht.

Der absorbierte Strahlungsanteil wird in innere Energie umgewandelt und als Strahlungsstrom \dot{Q}_E emittiert. Die Charakterisierung der Emission erfolgt durch die „spektrale Intensität“ nach Gleichung 1.12:

$$e_{\lambda_w}(T, \lambda_w) = \frac{\text{emittierte Energie } \dot{Q}_E}{\text{Zeit } t \cdot \text{Oberfläche } dA \cdot \text{Wellenlänge } \lambda_w} \quad (1.12)$$

Es sei ein idealisierter Körper definiert, der die gesamte einfallende Strahlung absorbiert (schwarzer Körper mit Emissionsgrad $\varepsilon = 1$). Die Integration von Gleichung (1.12) über den

kompletten Wellenlängenbereich definiert die Gesamtemission eines schwarzen Strahlers nach Stefan Boltzmann – einer analogen Größe zur Wärmestromdichte:

$$\dot{q}_e = e_s(T) = \int_0^{\infty} e_{\lambda,S}(T, \lambda_w) \cdot d\lambda_w = \sigma \cdot T^4 \quad (1.13)$$

Anders als bei Wärmeleitung und Konvektion ist der Wärmestrom proportional zu T^4 . Das heißt eine Verdopplung des Temperaturunterschieds führt zu einem 16-mal höheren Wärmeverlust.

Graue Strahler, die näherungsweise einem realen Strahler entsprechen, haben ein Emissionsverhältnis, das nicht mehr von der Wellenlänge abhängig ist. Die strahlungstechnische Umsetzung von (1.13) lautet nach Gleichung 1.14 demnach (VDI, 1994):

$$\dot{q} = \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot \Delta T^4 \quad (1.14)$$

Durch Multiplikation mit der Fläche A ergibt sich die bekannte Formel zur Wärmestromberechnung nach Stefan Boltzmann (Gleichung 1.15).

$$\dot{Q} = \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_k^4) \quad (1.15)$$

Der effektive Emissionsgrad (ε_{eff}), der relative Orientierung und Materialeigenschaften erfasst, lässt sich nach Einführung der Strahlungsbeziehungen für diffus-graue Strahler nach den Gleichungen 1.16 – 1.18 berechnen und in 1.15 einsetzen.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \frac{A_1}{A_2}} \quad (1.16)$$

Diese Form der Gleichung ist für einen (konvexen) Körper in einem Raum gültig (Abb. 8).

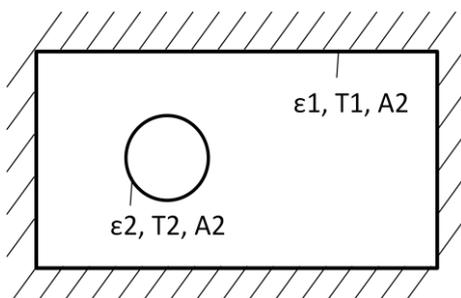


Abbildung 8: (konvexer) Körper in einem Raum. (eigene Anfertigung nach Rödiger, 2013)

Aus Gleichung (1.16) lassen sich zwei Sonderfälle ableiten.

A) Zwei planparallele Platten großer Ausdehnung

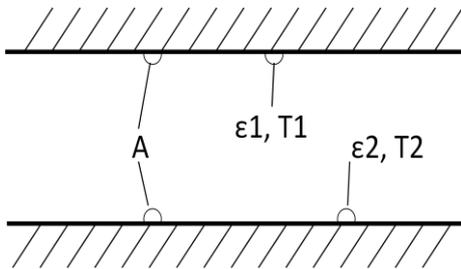


Abbildung 9: parallele Platten gleicher Fläche (eigene Anfertigung nach Rödiger, 2013)

Da die Fläche beider Platten gleich groß ist, ändert sich Gleichung (1.16):

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (1.17)$$

B) Körper in sehr großem Raum

Befindet sich der Körper in einem unendlich großen Raum, ist die äußere Fläche viel größer, als die des inneren Körpers. Da die äußere Fläche in (1.16) im Nenner steht, geht dieser Faktor gegen Null, was die Gleichung auf folgendes reduziert:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 \quad (1.18)$$

Ein Beispiel für diesen Anwendungsfall wäre die Strahlungsleistung der Sonne auf die Erde.

3.2 Berücksichtigung wechselseitiger Reflexionen

Wie bereits in der Definition thermischer Strahlung erwähnt, senden alle Körper mit einer Temperatur größer Null Kelvin eine Strahlung aus. In 3.1 Vereinfachte Strahlungsbeziehungen wurde missachtet, dass nicht nur der warme Körper den kalten bestrahlt, sondern auch der kältere den wärmeren. „Die übertragene Wärmemenge ist die Differenz der jeweils absorbierten Anteile beider Strahlungsbeträge“ (VDI, 1994). Mithilfe des Lambertschen Cosinusetzes wird die Wärmemenge bei Berücksichtigung wechselseitiger Reflexionen berechnet (Gleichung 1.19). Allerdings ist die Ermittlung der Einstrahlzahlen, abgesehen von wenigen Sonderfällen, sehr aufwendig.

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{12} \cdot A_1}{1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot \varphi_{12} \cdot \varphi_{21}} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.19)$$

φ_{12} und φ_{21} sind Einstrahlzahlen - dimensionslose Größen, die lediglich geometrische Beziehungen zwischen den Flächen darstellen (vgl. Gleichung 1.20).

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2)}{s^2} dA_1 dA_2 \quad (1.20)$$

Der reziproke Zusammenhang liefert Gleichung 1.21:

$$\varphi_{21} = \varphi_{12} \cdot \frac{A_1}{A_2} \quad (1.21)$$

In Abb. 10 sind A_1 und A_2 beliebig große Flächen in einem Raum, mit den Temperaturen T_1 und T_2 und den Emissionsgraden ε_1 und ε_2 . Dabei ist s die Verbindungslinie zwischen zwei Flächenelementen dA_1 und dA_2 . Die Winkel β_1 und β_2 entstehen jeweils aus der Flächennormalen und der Verbindungslinie s (VDI, 1994).

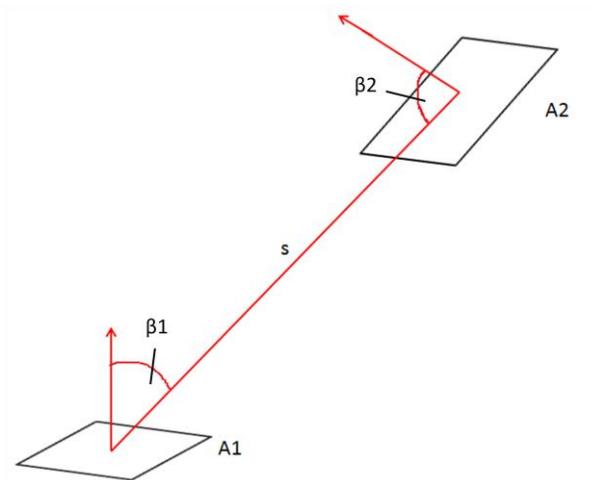


Abbildung 10: Strahlungsaustausch zwischen zwei Flächen (eigene Anfertigung)

Überblick: Isolationsmöglichkeiten in der Kryotechnik

Sowohl in technischen Anwendungen, als auch im Alltag finden thermische Isolationen häufigen Gebrauch. Das damit verbundene Ziel ist stets die Reduzierung von Wärmeverlusten, die die Leistung, meist elektrischer Geräte beeinträchtigen und die verursachten Kosten in die Höhe treiben.

Grundsätzlich lassen sich Isolationen in zwei Haupt-Bereiche einteilen, die sich hinsichtlich der Funktion, der Effizienz und der Kosten unterscheiden. Dabei gibt es diverse Methoden für den nicht evakuierten, als auch für den evakuierten Bereich. In Abb. 11 ist eine Einteilung der verschiedenen Isolationen für den Einsatz in kryotechnischen Anlagen dargestellt, die im folgenden Kapitel erläutert werden.

Die Kryotechnik, auch Tieftemperaturtechnik genannt, befasst sich mit der Erzeugung von Temperaturen unter -150 °C , zur Nutzung physikalischer Effekte in beispielsweise Energie-, Vakuum- oder Raketentechnik (Wikipedia, 2015).

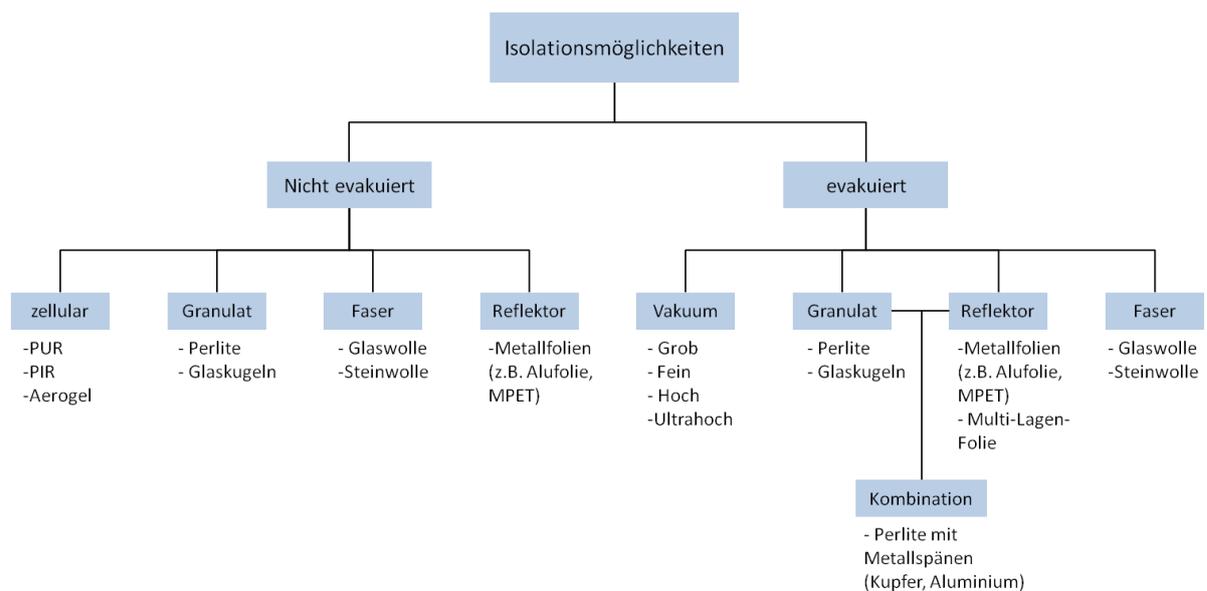


Abbildung 11: Einteilung Isolationsmöglichkeiten (eigene Anfertigung)

Die in Abb. 11 gezeigten Alternativen können abhängig von ihrer Isolationsfähigkeit Wärmeverluste zwischen zwei oder mehreren Systemgrenzen verringern. Befinden sich Verbindungen wie z.B. Rohre oder Leitungen zwischen kalter und warmer Seite, entstehen Wärmebrücken, die mittels Festkörperwärmeleitung eine Verlustleistung von bis zu 50 % des gesamten Verlusts verursachen können (Kaganer, 1969). Diese sind lediglich mithilfe einer kryotechnisch adäquaten Konstruktion zu vermeiden bzw. verringern.

Der Wärmetransport durch eine Isolation lässt sich in der Kryotechnik mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Wert) beschreiben – im Englischen „apparent thermal conductivity“. Dieser basiert auf theoretisch und empirisch ermittelten Daten wie Wärmeleitfähigkeit (λ) und Wärmeübergangskoeffizienten (α).

1. Nicht evakuierte Isolationen

1.1 Zelluläre Isolationen

Durch eine Gasexpansion von organischen sowie anorganischen Festkörpern entsteht im Herstellprozess die zelluläre Struktur (Abb. 12), die man in Schäumen oder Aerogelen vorfindet. Das Gasvolumen innerhalb der Zellen ist 10 – 100 Mal größer, als das Volumen der festen Bestandteile (Flynn, 2009). Als Treibmittel dient häufig Kohlenstoffdioxid oder ein Halogenkohlenwasserstoff (Timmerhaus, 2013).

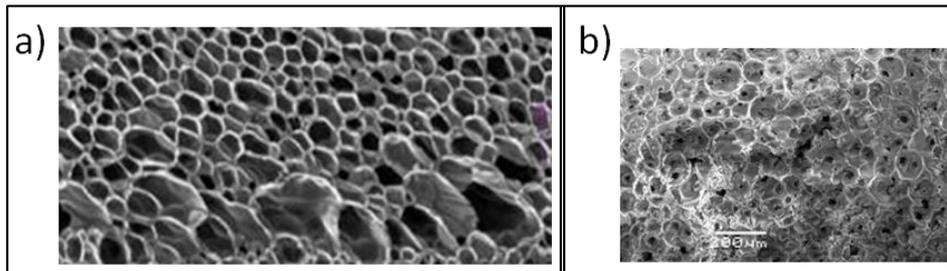


Abbildung 12: a) die zelluläre Struktur eines Schaums (Kalia, 2013) b) eines Aerogels (nach <http://www.aerogel.org>)

Der Wärmetransport durch poröse Materialien setzt sich aus Festkörperwärmeleitung entlang der Zellwände und Wärmeleitung durch das interstitielle² Gas zusammen. Die entstehenden Wärmeverluste lassen sich mit den Wärmedurchgangskoeffizienten aus Tab. 2 berechnen. Da Schäume lichtundurchlässig sind, wird Strahlung und durch die kleinen Zellen Konvektion verhindert. Die chemische Struktur und makromolekuläre Architektur der Schaummatrix beeinflussen die mechanischen und thermischen Eigenschaften (Kalia, 2013). So haben Versuche der Firma Solvay Fluor GmbH gezeigt, dass die thermische Leitfähigkeit um ca. $2 \frac{mW}{mK}$ sinkt, wenn herkömmliche Treibmittel durch ein eigens entwickeltes Produkt substituiert werden (Fapu, 2014). Für detaillierte Informationen zum Einfluss der chemischen Zusammensetzung sei auf die Fachliteratur [Kalia, 2013, S.206 ff.] verwiesen.

Tabelle 2: Wärmedurchgangskoeffizienten Schäume (nach Barron, 1985)

Schaum	Dichte (kg/m ³)	Wärmedurchgangskoeffizient k (mW/mK)
Polyurethan	11	33
Polystyrol	39	33
	46	26
Moosgummi	80	36
Schaumglas	140	35
Silikonschaum	160	55

Eine Reduzierung der Zellengröße verbessert die Isolierfähigkeit (Abb. 13). Das Gasvolumen verringert sich in den Zellen stark, sodass die Knudsen-Zahl größer als Eins wird, was zu Restgaswärmeleitung führt.

² Interstitiell: in den Zwischenräumen/Zellen befindlich

Der k-Wert kann nicht beliebig reduziert werden, da er auch von der Massendichte abhängig ist (Timmerhaus, 2013).

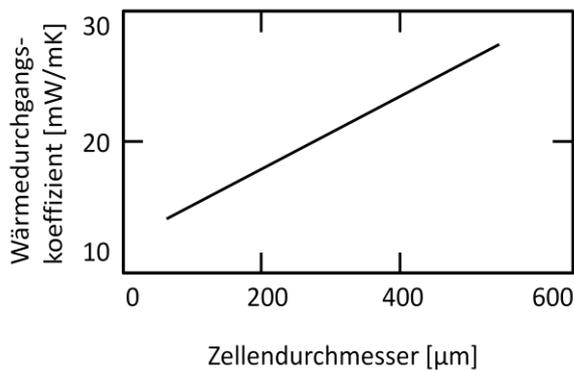


Abbildung 13: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit des Zellendurchmessers (modifiziert nach Flynn, 2009)

Schaum gilt als konventionelles Isolationsmaterial, das vielseitigen Einsatz findet. Die zu isolierende Fläche wird entweder direkt mit Schaum eingesprüht oder mit, zuvor formgenau hergestellten, Platten beklebt. Diese Vorgehensweisen bergen bei einer kryotechnischen Anwendung allerdings ein Risiko. Die thermische Ausdehnung von Schaum ist mit $7,2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$ ungefähr sieben Mal so groß, wie die des Stahls mit $1,15 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$ (Barron, 1985). Dies hat zur Folge, dass bei der Abkühlung von 300 K auf ca. 110 K der Schaum im Verhältnis zu seinem Ausgangsvolumen weiter schrumpft als Stahl. Dies wiederum führt wegen der hohen Spannungen zum Bruch. Dem kann durch Hinzufügen von Fiberglas (GFK) in die Schaummasse oder einiger Dehnungsfugen entgegengewirkt werden (Timmerhaus, 2013).

Die Anwendung von Dampf-/ Wassersperren ist empfohlen, damit keine Feuchtigkeit aus der Umgebung die thermische Leitfähigkeit beeinträchtigt. Versuche des „Institute of Refrigeration and Cryogenics“ in Hangzhou/ China haben gezeigt, dass eine unzureichende bzw. fehlende Wassersperre zu einer Gewichtszunahme des Schaums und einer Verschlechterung seines Wärmedurchgangskoeffizienten führt (Cryogenics Vol. 52, 2012).

Liegt die Kondensationstemperatur des, in den Zellen befindlichen, Gases oberhalb der Anwendungstemperatur, kondensiert dieses bei der Abkühlung. Dieser Prozess beeinträchtigt die thermische Performanz des Materials.

Wird die Schaumisolation einem fremdartigen Gas ausgesetzt, verhält sie sich semipermeabel. Das heißt, das interstitielle Gas diffundiert mit der Zeit durch die Zellwände; es findet ein Gasaustausch mit der Atmosphäre statt, der die thermische Leitfähigkeit um bis zu 30 % erhöht und so die Isolierfähigkeit verschlechtert (Timmerhaus, 2013).

Trotz Vorteilen wie einfacher und günstiger Herstellung sind Schäume für die Isolation langfristiger Anwendungen nicht geeignet. Dennoch gibt es für Schaumisolierungen einige Einsatzgebiete in der Kryotechnik, wie zum Beispiel den Transport kleiner Mengen flüssiger Gase.

Eine Ausnahme bildet hier, das von S. Kistler 1931 entwickelte, Aerogel (Fricke, 1986). Aerogel ist ein offenzelliges Material mit einem Zellendurchmesser von ca. $\frac{1}{10.000}$ des menschlichen Haars und einer Porosität von nahezu 99 % (NASA, 2014). Es besitzt den geringsten k-Wert, der von Festkörpern bekannt ist.

Die in Tab. 3 dargestellten Werte beziehen sich auf ein plattenförmiges Produkt der Firma aspen aerogels, die auf dem Markt der thermischen Isolation dominieren. Der Wärmedurchgangskoeffizient granularer Ware weicht von den tabellierten Werten leicht ab (Tab. 6).

Tabelle 3: Wärmedurchgangskoeffizient Aerogel in Abhängigkeit der mittleren Betriebstemperatur

Mittl. Temp. [°C]	-200	-150	-100	-50	0	50	100
k [mW/mK]	9,8	11,4	12,3	12,9	13,8	15,5	18,6

Aerogelisolierungen werden entweder als Granulat oder wie Schäume in Platten gefertigt (Abb. 14).

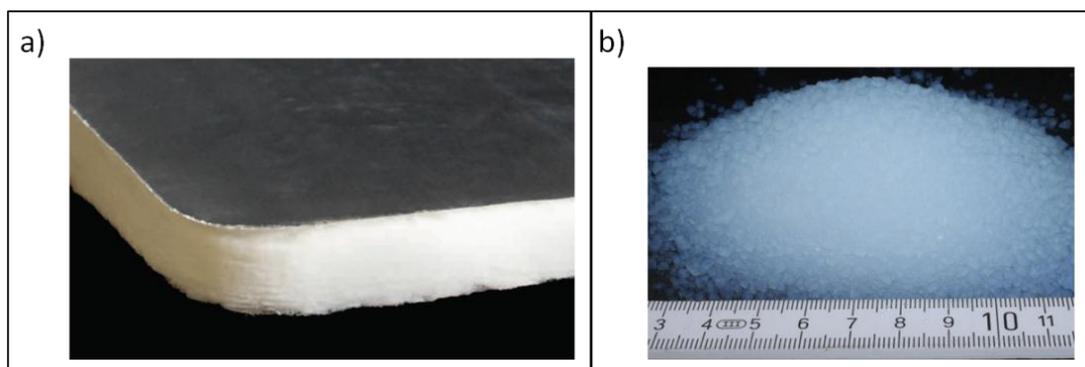


Abbildung 14: a) Aerogel Platte (aspen aerogels) b) Aerogel Granulat (nach aerogel24)

Zur Herstellung von Aerogelen wird einem gallertartigen Stoff, meist Kieselsäure, das Wasser bei 1100 °C entzogen und zunächst durch einen Äthylalkohol zu 95 % ersetzt. Der Alkohol verdunstet allmählich und hinterlässt eine skelettartige Struktur (Flynn, 2009). Die Idee von einem derartigen Gel existierte schon lange. Kistler war der erste, dem die Trocknung ohne Schrumpfung gelang (Fricke, 1986).

Der Herstellprozess ist sehr zeitaufwendig, sodass die Kosten für derartige Produkte im Vergleich zu anderen Isolationsmaterialien ziemlich hoch sind. Oft können andere Methoden eingesetzt werden, die bei gleicher Effizienz kostengünstiger sind.

1.2 Perlit- und Faserisolationen

Im Vergleich zu Schaumisolationen, ist der Wärmedurchgangskoeffizient von Perlitschüttungen bzw. Faserisolationen bis zu ca. 50 % geringer (vgl. Tab. 4).

Tabelle 4: Wärmedurchgangskoeffizienten Perlit- und Faserisolationen

Isolation	Dichte (kg/m ³)	Wärmedurchgangskoeffizient k (mW/mK)
Perlit	50	26
	210	44
Granulares Aerogel	80	19
Fiberglas	10	25
Steinwolle	160	35

Perlit ist ein natürlich vorkommendes, siliziumhaltiges Vulkangestein mit einem Wassergehalt von 2 – 6 %. Bevor der Perlit eingesetzt werden kann, ist das Gestein zu zerkleinern (unterschiedliche Dichten) und bei ca. 870 °C schnell auszuheizen. Dadurch verdampft das enthaltene Wasser auf einen maximalen Gehalt von 0,1 Ma.-% und das Volumen des Perlits steigt auf das 20-fache (vgl. Abb. 15) (Perlite Institute, Jahr unbekannt). Diese Ausdehnung erzeugt unzählige Zwischenräume zwischen den 100 – 1600 µm großen Partikeln (Flynn, 2009), die für den geringen k-Wert verantwortlich sind. Eine weitere Eigenschaft hebt siliziumhaltiges Vulkangestein von anderen ab – der ausgedehnte Perlit ist nicht hygroskopisch. Das heißt, Feuchtigkeit aus der Atmosphäre kann nicht gebunden werden, was den Einsatz von Perlit in evakuierten Reaktoren begünstigt. Deshalb sollten Perlite vor dem Gebrauch trocken sein.



Abbildung 15: Der Weg vom Vulkangestein zum Perlit (modifiziert nach www.perlite.net)

Die Wärmeübertragung durch nicht evakuierte Perlite und Faserisolationen ist eine Kombination aus Festkörper- und Gaswärmeleitung. Die kleinen Partikel eines porösen Perlits „zerlegen“ den Weg der Festkörperleitung (Abb. 16). Die Wärme, dargestellt durch den roten Pfeil, kann deshalb nicht den direkten Weg entlang des Temperaturgradienten (grüner Pfeil) strömen, wodurch ein Teil der Energie verloren geht (Flynn, 2009). Es lassen sich folgende Dichten (ρ) von Perlitschüttungen herstellen: $\rho = 32 \dots 240 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Beispielhaft ist in Tab. 4 der Wärmedurchgangskoeffizient zweier unterschiedlicher Dichten angegeben. Der k-Wert nimmt bei atmosphärischem Druck (1000 mbar) mit steigender Dichte zu.

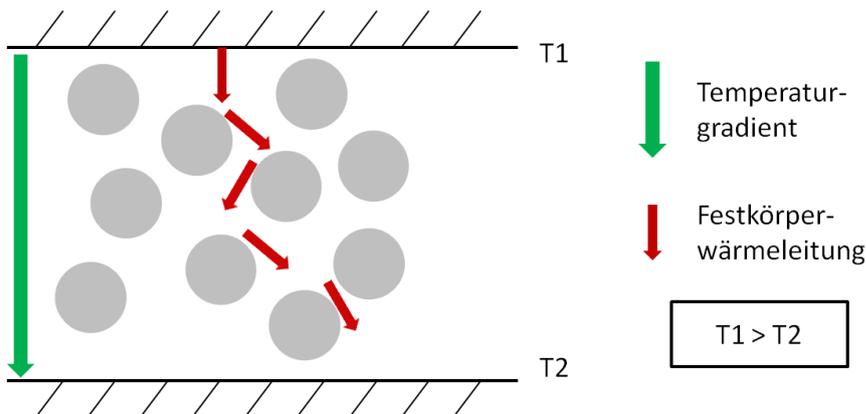


Abbildung 16: Wärmestrom durch eine Perlitschüttung. (eigene Anfertigung)

Die opaken, festen Partikel und kleinen Zwischenräumen dazwischen verhindern größtenteils Wärmestrahlung und Konvektion.

Die Wärmedurchgangskoeffizienten aus Tab. 4 werden von dem Gas, das sich in den Zwischenräumen der Partikel befindet, direkt beeinflusst. Es ist daher von Vorteil, dass Gase in der Regel eine geringe Wärmeleitfähigkeit haben, die allerdings nur genutzt werden kann, „wenn die gleichzeitig stattfindende Wärmeübertragung durch Konvektion und Wärmestrahlung eingeschränkt wird“ (Wikipedia, 2015). Das praktischste interstitielle Gas wäre Neon, das sich wegen hoher Kosten durch Helium ersetzen lässt. Obwohl Helium eine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt, wird es bevorzugt eingesetzt, da die geringen Abstände zwischen den Partikeln den Wärmedurchgangskoeffizienten stark reduzieren. Grund dafür liefert die mittlere freie Weglänge, die bei gegebenem Druck, beispielsweise drei Mal höher als die der Luft ist (Flynn, 2009). Bei Reduzierung des Betriebsdrucks, nimmt die mittlere freie Weglänge weiter zu. Das heißt, der k-Wert und damit das Isolationsverhalten kann unter Anwendung eines Vakuums deutlich verbessert werden (siehe dazu 2.2 *Perlitschüttungen*).

Nußelt und Bayer haben für pulverartige Isolationen eine Formel (2.1) zur Berechnung ihres Wärmedurchgangskoeffizienten entwickelt (Atrey, 2014):

$$k = \left(\frac{V_V}{\lambda_F} + \frac{1}{\frac{\lambda_G}{1 - V_V} + \frac{4 \cdot \sigma \cdot T^3 \cdot d}{V_V}} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

Folgende Variablen werden definiert:

V_V : Verhältnis fester Partikel zum Gesamtvolumen

λ_F : Wärmeleitfähigkeit fester Partikel

λ_G : Wärmeleitfähigkeit des interstitiellen Gases

T: Mittlere Temperatur

d: Mittlere Dicke der Isolation

Da in kryotechnischen Anwendungen die Temperatur sehr gering und die Wärmeleitfähigkeiten eines Festkörpers deutlich höher als die eines Gases ist, ist folgende Schreibweise nach Gleichung 2.2 möglich:

$$k = \frac{\lambda_G}{1 - V_V} \quad (2.2)$$

Gleichung (2.2) stellt den geringsten k-Wert dieser Isolationen dar. Da es sich dabei lediglich um eine theoretische Formel handelt, sollte in der Realität mit einem höheren Wert gerechnet werden.

Versuche haben gezeigt, dass bei der Verwendung granularer Materialien die Wärmeübertragungsart von den Temperaturen der Systemgrenzen abhängt. Für eine Warmtemperatur von ca. 300 K (Raumtemperatur) und einer Kalttemperatur von 77 K (Siedetemperatur von Stickstoff) sind die Wärmeverluste proportional zu ΔT^4 , also strahlungsabhängig. Für eine Temperaturspanne von 77 – 20 K wurde die Proportionalität für ΔT^1 nachgewiesen. Das heißt im zweiten Fall ist die Festkörperwärmeleitung dominierend (Barron, 1985).

Perlitisolationen werden in der Regel als Schüttungen in einem doppelwandigen System, von der Umgebung isoliert, eingesetzt. Die Anwendung faserhaltiger Isolationen erfolgt analog der zellularen. Beim Einsatz von Perlitschüttungen ist darauf zu achten, dass die Betriebstemperatur nicht unter der Kondensationstemperatur des interstitiellen Gases liegt. Andererseits verdampft das Gas und begünstigt den Wärmeverlust (Flynn, 2009). Ein weiteres Problem birgt die Morphologie des Perlits. Bei Vibrationen verdichten sich die Partikel, sodass zwei unterschiedliche Bereiche entstehen, die beiderseits negative Auswirkungen auf das Isolationsverhalten haben. Zum einen bilden sich Stellen hoher Perlitkonzentration, wo durch den Anstieg der Dichte die Festkörperwärmeleitung zunimmt. Zum anderen fehlt dieses Material in anderen Bereichen, sodass sich hier die Gaswärmeleitung erhöht. Ist bekannt, dass es während des Gebrauchs zu Erschütterungen des Reaktors kommt, empfiehlt es sich, Faserisolationen anstelle des Perlits einzusetzen, da diese einer mechanischen Belastung besser standhalten (Flynn, 2009).

Wird die wärmere Seite der Isolation der Atmosphäre ausgesetzt, diffundiert Wasser in die Perlite, fließt gen kalte Seite und gefriert. Der Wärmedurchgangskoeffizient nimmt schlagartig einen hohen Wert an und die Isolierfähigkeit geht stark zurück. Gleiches Problem kann auftreten, wenn die Perlitschüttung vor Gebrauch nicht ordnungsgemäß getrocknet worden sind. Die Verwendung einer Wasser-/ Dampfsperre wirkt dieser Problematik entgegen. Ein experimenteller Nachweis hat gezeigt, dass Wasserbarrieren aus Polyester die besten Eigenschaften bei 77 K haben. Es ist schwer durchdringbar, hat ein geringes Eigengewicht und passt sich wegen guter Dehnbarkeit jeglichen Formen an (Flynn, 2009).

Eine absolute Dichtigkeit ist wegen möglicher Diffusionsvorgänge allerdings zu vermeiden – kleine Ausgangsöffnungen in den Wassersperren unterstützen die Effektivität (Barron, 1985).

1.3. Strahlungsschilde

Neben poröser und granularer Materialien werden auch Strahlungsschilde zur thermischen Isolation verwendet. Dabei handelt es sich meist um sehr dünne ($\sim 15 \mu\text{m}$) (Wikipedia, 2015), metallisierte Kunststofffolien (MPET) oder gewalztes Metall mit einem geringen Emissionsgrad. Abhängig der Anzahl der im Reaktor positionierten Schilde lässt sich Wärmestrahlung auf Basis dieser Eigenschaften auf ein Minimum verringern.

Die thermische Strahlung zweier paralleler Platten mit unterschiedlichen Temperaturen entspricht einem kontinuierlichen Wärmestrom, der keinem Medium bedarf (siehe Abb. 17). Der Wärmestrom, dargestellt durch die schwarzen Pfeile, fließt von der roten, wärmeren Platte zur kälteren blauen.

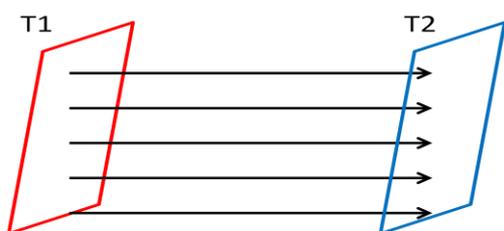


Abbildung 17: Wärmestrom zweier paralleler Platten (eigene Anfertigung)

Dieser kontinuierliche Wärmestrom kann durch den Einbau von Strahlungsschilden unterbrochen werden, wie es aus Abb. 18 ersichtlich ist.

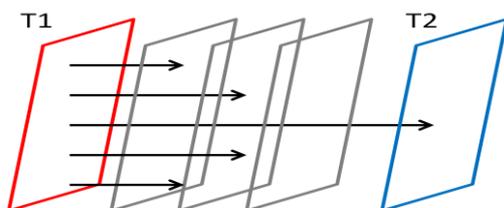


Abbildung 18: Wärmestrom durch Strahlungsschilde (eigene Anfertigung nach Atrey, 2014)

Zu Beginn ist der Betrag des Wärmestroms der gleiche wie in Abb. 17. Dies ändert sich, wenn der erste Schild einen Teil der Verlustleistung reflektiert. Da der Emissionsgrad kleiner als Eins und wie aus Kapitel *Grundlagen der Wärmeübertragung* bekannt ist, wird der restliche Teil transmittiert. Dieser Vorgang wiederholt sich so oft, bis der reduzierte Wärmestrom die blaue Wand erreicht.

Die Anzahl N der Schilde beeinflusst den Emissionsfaktor (Gleichung 2.3), der anstelle des effektiven Emissionsgrades in die Formel zur Berechnung der Strahlungsverluste einzusetzen ist. Gleichung (2.3) ist für parallele Ebenen gleicher Flächen gültig.

$$F_E = \left(\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_S} - 1 \right) + (N - 1) \left(\frac{2}{\varepsilon_S} - 1 \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_S} - 1 \right) \right)^{-1} \quad (2.3)$$

ε_S : Emissionsgrad des Strahlungsschildes

Um die Wirkung dieser thermischen Isolation zu verdeutlichen, sei an dieser Stelle ein Rechenbeispiel eingeführt.

Beispiel:

$$\varepsilon_S = 0,05 \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$$

Fall 1: $N = 0 \rightarrow F_E = 0,667$ (kann auch nach Gleichung (1.17) berechnet werden)

Fall 2: $N = 10 \rightarrow F_E = 0,00255$

Die Verlustleistung durch Strahlung beträgt in Fall 2 nur noch ca. 0,38 % des ersten Falls. Anhand dieses kurzen Beispiels wird das enorme Isolationspotenzial dieser Methode ersichtlich. Ein Problem stellt allerdings die Realisierung dar. Es stellt sich die Frage, wie Strahlungsschilder in der geforderten Weise installiert werden können. Abb. 8 beschreibt ein theoretisches Modell, bei dem sich die Schilder exakt parallel zu den Systemgrenzen und ohne jeglichen Kontakt zu anderen Bauteilen im Raum befinden.

Prinzipiell ist die Anwendung von Strahlungsschildern sowohl ohne, als auch mit Vakuum möglich. Allerdings ist die Verlustleistung durch Konvektion, die im nicht evakuierten Zustand auftritt, nicht zu vernachlässigen, sodass dieser Einsatz nicht sinnvoll erscheint. Im nächsten Abschnitt werden verschiedene Vakuumniveaus detailliert, die die Verwendung von Strahlungsschildern begünstigen.

2. Evakuierte Isolationen

2.1 Vakuumisolationen

In der Umgangssprache wird ein Vakuum häufig als luftleerer Raum bezeichnet. Diese Aussage lässt sich physikalisch betrachtet mit einer kleinen Ergänzung untermauern. Somit ist ein Vakuum die Abwesenheit jeglicher Materie (Wikipedia, 2015). Wird der Atmosphärendruck bei Normalbedingungen (1000 mbar) verringert, herrscht je nach Restdruck ein Grob-, Fein-, Hoch- oder Ultrahochvakuum, deren Wertebereiche untenstehend tabelliert sind (Tab. 5). Die Erzeugung von Hoch- und Ultrahochvakua erfolgt in zwei Schritten. Ein Vordruck von ca. 0,01 bis 1 mbar ist durch mechanisch wirkende Pumpen wie zum Beispiel einer Drehschieberpumpe realisierbar. Eine weitere Druckreduzierung gelingt durch den Einsatz einer Turbomolekularpumpe.

Wie im Kapitel *Grundlagen der Wärmeübertragung* beschrieben wurde, sind lediglich Konvektion und Wärmeleitung von einem Medium abhängig. Wärmestrahlung hingegen bedarf keiner Materie und tritt deshalb auch im Vakuum auf, ist aber durch Einsatz von

Strahlungsschilden reduzierbar (vgl. Abschnitt 1.3 *Strahlungsschilde*). Da in der Realität ein perfektes Vakuum nicht möglich ist, wird Wärme auch durch das Restgas übertragen. Die Anzahl der verbleibenden Moleküle ist vom Druck bzw. dem Vakuumlevel abhängig, das den Knudsen-Bereich und so die Berechnung der Verlustleistung festlegt. Demnach bieten sich Vakua sowohl mit, als auch ohne Reflektoren gut als thermische Isolatoren an.

Tabelle 5: Einteilung der Vakuumstufen (nach Riegler, 2015)

Einheit	Großvakuum	Feinvakuum	Hochvakuum	Ultrahochvakuum
mbar	10^3 bis 1	1 bis 10^{-3}	10^{-3} bis 10^{-7}	$< 10^{-7}$

Der schottische Physiker James Dewar war der erste, der im Jahre 1874 ein Vakuumgefäß für den Transport flüssiger Gase verwendet hat. Knapp 20 Jahre später stellte er eine verbesserte Ausführung seines Vakuumgefäßes vor – das nach ihm benannte Dewargefäß. Heute werden Dewargefäße – doppelwandige und verspiegelte Behälter (Abb. 19) - zur Lagerung heißer, als auch kalter Stoffe in Laboren oder in Isolierkannen eingesetzt.

Der Wärmedurchgangskoeffizient eines Ultrahochvakuums von $1,3 \cdot 10^{-9}$ mbar beträgt ca. $5 \frac{mW}{mK}$ (Flynn, 2009).

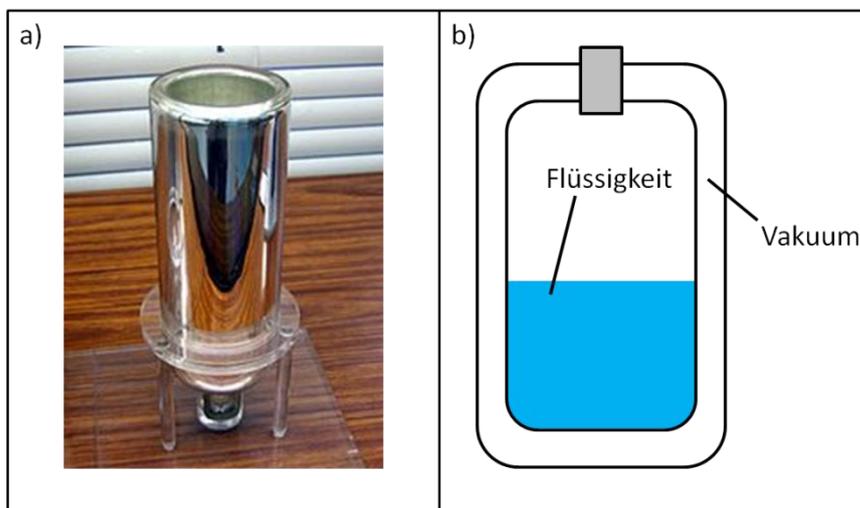


Abbildung 19: a) Dewargefäß (Wikipedia, 2015) b) Schematischer Querschnitt Dewargefäß (eigene Anfertigung)

2.2 Perlitschüttungen

2.2.1 Herkömmliche Perlite

Ist der zu isolierende Raum mit Perliten gefüllt und das Verhältnis der gasgefüllten Zwischenräume zum festen Material groß, entspricht die thermische Leitfähigkeit ungefähr der des interstitiellen Gases. Wird dieses Gas durch Evakuierung eliminiert, bleibt der Wärmedurchgangskoeffizient zunächst konstant. Allerdings verhält er sich im Vakuum

druckabhängig, wie aus Abb. 20 zu entnehmen ist. Ab einem Druck von 10^2 Torr³ (133,322 mbar) steigt die mittlere freie Weglänge rasant, was bis zu einem Druck von 10^2 Torr (0,013 mbar) zu einer Reduzierung des k-Werts führt. Stagniert die Druckabhängigkeit, wird die Wärme abhängig der Temperatur dominierend über Festkörperwärmeleitung oder thermische Strahlung übertragen. Besitzt die wärmere Seite eine Temperatur von 300 K und die Kaltseite 77 K, sind Strahlungsverluste höher als durch Festkörperwärmeleitung. Zwischen 77 K und 4 K (Siedetemperatur Wasserstoff) überwiegt die Wärmeleitung. Das heißt, die bevorzugte Einsatztemperatur für evakuierte Perlitschüttungen liegt zwischen 300 K – 77 K (Barron, 1985). Für den zweiten Bereich ist es ratsam lediglich eine Vakuumisolation anzuwenden.

Aufgrund des hohen Strömungswiderstandes, den Perlitschüttungen erzeugen, ist die Evakuierung solcher Apparaturen sehr zeitaufwendig. Durch Installation mehrerer Pumpausgänge kann diese Zeit deutlich reduziert werden. Voraussetzung für eine hohe Lebensdauer der Vakuumpumpe ist der Einbau eines Filters, der feine Partikel abfängt (Flynn, 2009).

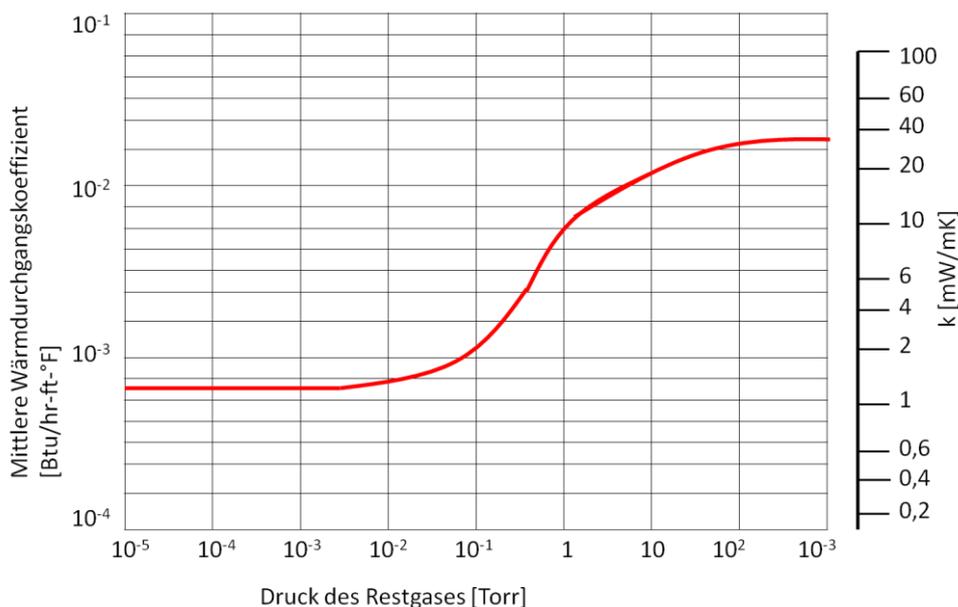


Abbildung 20: Druckabhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten von Stickstoff (modifiziert nach Barron, 1985)

An dieser Stelle sei eine kurze Textpassage aus Kapitel 1.2 *Perlit- und Faserisolationen* wiederholt, um den Unterschied zu verdeutlichen:

„Die Wärmeübertragung durch nicht evakuierte Perlite und Faserisolationen ist eine Kombination aus Festkörper- und Gaswärmeleitung. [...]. Es lassen sich folgende Dichten (ρ) von Perlitschüttungen herstellen: $\rho = 32 \dots 240 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Beispielhaft ist in Tab. 4 der Wärmedurchgangskoeffizient zweier unterschiedlicher Dichten angegeben. Der k-Wert nimmt bei atmosphärischem Druck (1000 mbar) mit steigender Dichte zu“.

³ 1 Torr entspricht 1,333 mbar

Durch eine Reduzierung des Drucks infolge einer Vakuumherzeugung sinkt der Wärmedurchgangskoeffizient mit steigender Dichte, da die Zwischenräume der Partikel (charakteristische Länge) kleiner als die mittlere freie Weglänge werden (Perlite Institute, Jahr unbekannt). Die Dichte ist sowohl von der Feinheit der Perlite, als auch von der Packungsdichte abhängig. So ergibt sich für runde Partikel durch anhaltendes Schütteln eine orthorhombische⁴ Anordnung, die die höchste Dichte zur Folge hat (Flynn, 2009).

Es ergeben sich folgende k-Werte für evakuierte Perlitschüttungen und Faserisolationen (Tab. 6):

Tabelle 6: Wärmedurchgangskoeffizienten evakuierter Perlit- und Faserisolationen (nach Barron, 1985)

Isolation ($1,3 \times 10^{-6}$ mbar)	Dichte (kg/m ³)	Wärmedurchgangs- koeffizient k (mW/mK)
Feines Perlit	180	0,95
Grobes Perlit	64	1,9
Fiberglas	50	1,7
Kalziumsilikat	210	0,59

Kalziumsilikat wird bei der Umsetzung von Kalzium- mit Silikatoxid gewonnen. In natürlicher Form kommt es im Mineral Wollastonit vor (Wikipedia, 2015).

Der Wärmetransport lässt sich anhand Gleichung (2.4) berechnen:

$$\dot{Q} = \frac{k \cdot A_0 \cdot (T_W - T_K)}{d} \quad (2.4)$$

Wie in vorangehenden Berechnungsmethoden ist k der Wärmedurchgangskoeffizient, d die konstante Dicke der Isolation und T_x die Temperatur der wärmeren bzw. kälteren Wand. A_0 wird als Umrechnungsfaktor der äußeren und inneren Fläche definiert. A_0 entspricht der mittleren Fläche der Wärmeübertragung.

Gleichung (2.5) gilt dabei für konzentrische Zylinder, Gleichung (2.6) für konzentrische Kugeln, wobei A_1 der Fläche der kälteren Wand und A_2 der wärmeren Fläche entspricht (Barron, 1985). Für „normale“ Kesselformen mit einem gekrümmten Deckel haben die genannten Formeln einen maximalen Fehler von 5 %, sofern die Dicke des Isolationsraumes nicht größer als 50 % des inneren Behälters ist (Flynn, 2009).

$$A_0 = \frac{A_2 - A_1}{\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)} \quad (2.5)$$

$$A_0 = \sqrt{A_1 \cdot A_2} \quad (2.6)$$

⁴ Orthorhombisch: jede Kugel hat 8 Kontaktpunkte

2.2.2 Perlit mit Spanzusatz

Im Jahre 1960 haben Riede und Wang nachgewiesen, dass die geringen Strahlungsverluste durch Perlitschüttungen reduziert und so die Leistungsfähigkeit der Isolation weiter verbessert werden kann. Die Zugabe von hochreflektierenden Aluminium- oder Kupferflocken wirkt im Perlit wie viele kleine Strahlungsschilde, die thermische Strahlung reflektieren. Der benötigte Vakuumlevel ist im Vergleich zu anderen Isolationsmethoden, mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten dieser Größenordnung, deutlich geringer (Flynn, 2009). Wie viele Späne hinzuzufügen sind, ist aus Abb. 21 abzuleiten.

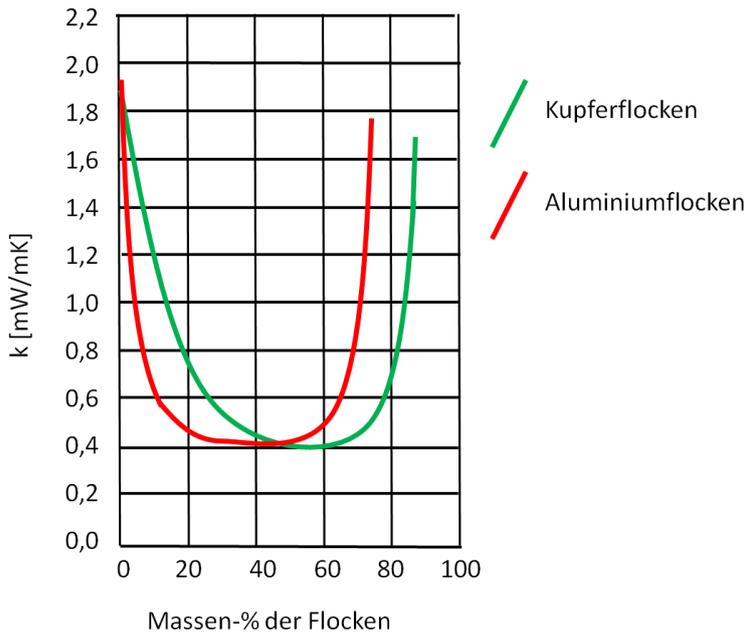


Abbildung 21: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit der Massenprozent⁵ Al-/Cu-Flocken (nach Atrey, 2014)

Bei Kupferflocken (grüner Graph) wird das Optimum bei ca. 50 Ma.-% erreicht. Lediglich 40 Ma.-% sind nötig, wenn statt Kupfer- Aluminiumspäne (roter Graph) verwendet werden. Unabhängig welches Material zum Einsatz kommt, beträgt der k-Wert mit 0,4 mW/mK nur noch 21,05 % des Ausgangswertes 1,9 mW/mK. Eine übermäßige Zugabe von Flocken begünstigt die Festkörperleitung, sodass sich die Isolierperformanz verschlechtert.

Tabelle 7: Wärmedurchgangskoeffizienten Perlit mit Spanzusatz(nach Atrey)

Isolation ($1,3 \times 10^{-6}$ mbar)	Dichte (kg/m ³)	Wärmedurchgangs- koeffizient k (mW/mK)
50 Massen-% Al-Späne	160	0,35
50 Massen-% Cu-Späne	180	0,33

Obwohl mehr Material nötig ist, sind Kupferflocken bevorzugt, da Aluminium in Verbindung mit Sauerstoff ein brennbares Gemisch ergibt. Während der Vakuumherzeugung birgt diese Kombination eine Gefahr (Barron, 1985).

⁵ Verhältnis von Flocken zu gesamter Masse

Wie bei herkömmlichen Perlitschüttungen besteht auch hier das Problem der Verdichtung des Materials. Im Laufe der Zeit oder durch externe Einwirkungen wie Vibrationen verdichten sich die Partikel und der Wärmedurchgangskoeffizient steigt. Herr Zhou des „Shanghai Institute of Mechanical Engineering/China“ hat in Versuchen nachweisen können, dass die Verwendung quadratischer Aluminiumflocken anstatt herkömmlicher Additive dem Problem der Verdichtung entgegen wirkt. Die Späne können aufgrund ihrer kantigen Geometrie bei Vibrationen kaum verrutschen (Cryogenics Vol.30, 1990).

2.2.3 Mikrokugeln

Mikrokugeln sind komprimierte, hohle Glaskugeln einer Größe zwischen 15 – 150 µm, die mit einem Aluminiumfilm überzogen wurden. Die Funktion dieser Kugeln ist analog der Perlitschüttungen mit Spanzusatz, allerdings besitzen sie einige Vorteile gegenüber den erwähnten Materialien. Die Kugeln sind speziell dafür entwickelt worden, Perlitschüttungen und seine Nachteile zu ersetzen (Cryogenic Engineering Conference, 2003).

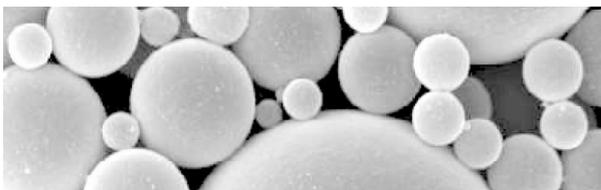


Abbildung 22: Vergrößerung (500-fach) von Mikrokugeln (nach Cryogenic Engineering Conference, 2003)

Sie bilden bei den granularen Isolationen eine Ausnahme, da sie sich nicht verdichten und so ihre Effizienz über die Nutzungsdauer nahezu konstant bleibt. Außerdem ist die Vakuumerzeugung leichter⁶ und die Aufrechterhaltung besser als bei herkömmlichen Perliten (vgl. Abb. 23).

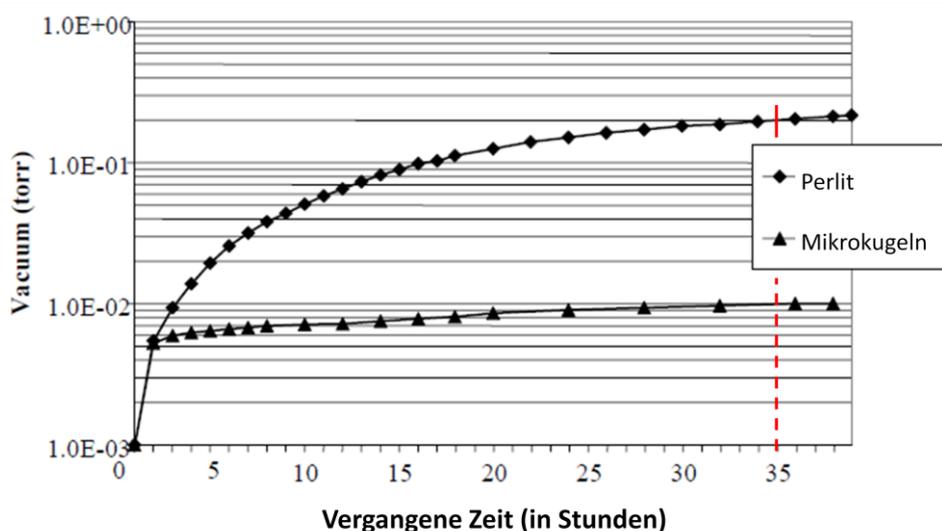


Abbildung 23: Vakuumaufrechterhaltung von Perlit und Mikrokugeln (modifiziert nach Cryogenic Engineering Conference, 2003)

⁶ In Versuchen wurden je eine Perlit- und eine Mikrokugeln-Probe 8 Stunden evakuiert. Perlit erreichte ein Vakuumlevel von $7,9 \times 10^{-4}$ Torr und Mikrokugeln eines von $3,7 \times 10^{-4}$ Torr.

Bei einer Vakuumstufe von $1 \cdot 10^{-3}$ Torr wurde die Vakuumpumpe von den Versuchsreaktoren getrennt, stündlich der Druck gemessen und anschließend die in Abb. 23 dargestellten Verläufe geplottet. Der Vakuumlevel der Mikrokugel-Probe pendelt sich nach bereits zwei Stunden auf einen Druck von ca. $1 \cdot 10^{-2}$ Torr ein. Die Perlit-Probe hingegen verliert innerhalb kürzester Zeit das voreingestellte Niveau. Der Vergleich nach 35 Stunden liefert einen Unterschied von $0,9 \text{ Torr} - 1 \cdot 10^{-2} \text{ Torr} = \mathbf{0,89 \text{ Torr}}$ (entspricht **1,187 mbar**).

Aufgrund ihres geringen Wärmedurchgangskoeffizienten (Tab. 8) bieten sie eine gute Alternative zur Multi-Lagen-Isolierung (MLI), die im nächsten Kapitel detailliert beschrieben wird. Zwar ist der k-Wert der Mikrokugeln zwei bis vier Mal höher als der der MLI, aber Vorteile wie die leichte Installation, geringe Kosten und thermische Isotropie machen den Einsatz dieser Methode attraktiv (Flynn, 2009).

Tabelle 8: Vergleich Mikrokugeln mit MLI

Isolation ($1,3 \times 10^{-6} \text{ mbar}$)	Dichte (kg/m^3)	Wärmedurchgangs- koeffizient k (mW/mK)
Mikrokugeln	70 – 80	0,22 – 0,4
MLI	50 – 60	0,05 – 0,1

2.3 Multi-Lagen-Isolierung (MLI)

In Abschnitt 1.3 *Strahlungsschilde* wurde das enorme Potenzial von normal zum Wärmestrom angeordneten Reflektoren dargestellt. Probleme ergaben sich allerdings bei der Realisierung. Wie ist es möglich das Material mit dem niedrigen Emissionsgrad zu installieren?

1951 entwickelte Peterson (Schweden) die Multi-Lagen-Isolierung – ein Material, das aus mehreren hochreflektierenden Schichten, getrennt durch Abstandshalter (Spacer), besteht. Ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt, wird MLI heute in sämtlichen Anwendungen hoher Temperaturunterschiede eingesetzt (Flynn, 2009). Es ist einfach um das zu isolierende Bauteil zu wickeln (Abb. 24).

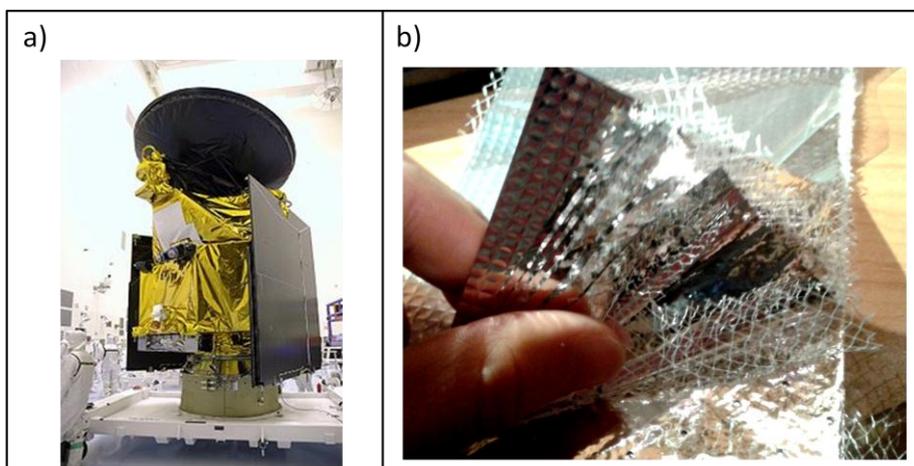


Abbildung 24: a) Raumsonde eingewickelt in MLI(nach Wikipedia, 2015) b) MLI Folie (eigene Aufnahme)

Um die volle Isolierfähigkeit der MLI ausnutzen zu können, ist ein Vakuumlevel von mindestens $1 \cdot 10^{-3}$ mbar (Barron, 1985) nötig. Der Wärmedurchgangskoeffizient beträgt dann im Mittel allerdings nur $25 \mu\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, wie Abb. 25 erkennen lässt.

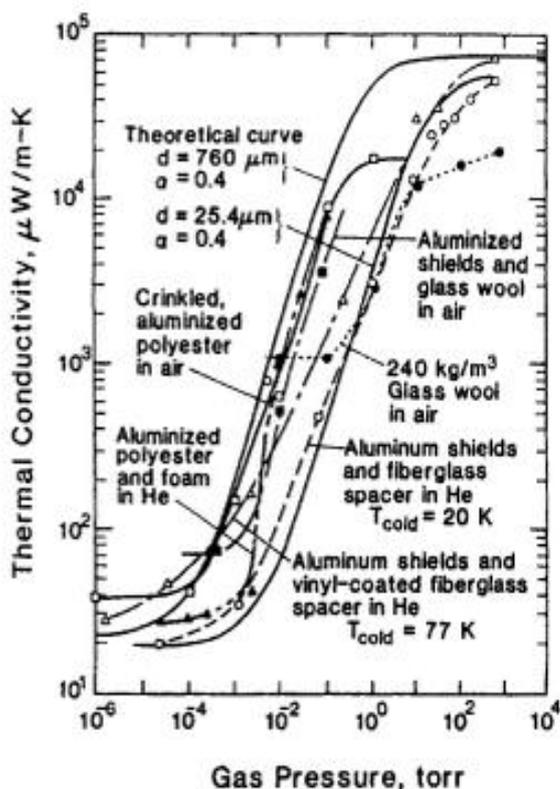


Abbildung 25: Druckabhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten diverser MLI (nach Flynn, 2009)

Damit ist die beste thermische Isolation in der Vakuumtechnik möglich. Zu Recht wird die Multi-Lagen-Isolation auch *Superisolation* genannt.

Üblicherweise kommen in kryotechnischen Anlagen ein- oder beidseitig metallisierte PET-Folien einer Stärke von 5 – 125 μm zum Einsatz, die durch Abstandshalter, schlecht wärmeleitender Materialien, getrennt sind. Die geringen Emissionsgrade der Strahlungsschilde bilden dabei das wichtigste Glied.

Es sollte stets darauf geachtet werden, dass die Metallschicht der Folie mindestens 500 \AA ⁷ beträgt, da eine Reflexion der Strahlung sonst nicht möglich ist (Flynn, 2009). Abb. 26 zeigt die Emissionsgrade (ϵ) verschiedener Metalle bei einer Dicke von 1000 \AA . Aluminium hat mit $\epsilon = 0,021$ einen geringfügig kleineren Wert als Gold mit $\epsilon = 0,019$ und Silber mit $\epsilon = 0,012$. Zudem ist Aluminium leichter erhältlich und in der Fertigung wesentlich kostengünstiger.

Metallisierte Kunststofffolien werden aufgrund ihrer besseren mechanischen Eigenschaften und dem geringeren Gewicht gegenüber dünn gewalzten Metallen bevorzugt verwendet, da bei Wandstärken dieser Größenordnung die Handhabung und somit die Installation sehr kompliziert ist.

⁷ \AA : Angstrom ($1 \text{ Angstrom} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$)

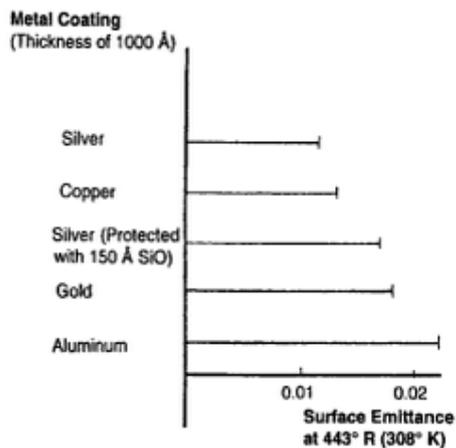


Abbildung 26: Emissionsgrade aufgedampfter Materialien (nach Flynn, 2009)

Grundsätzlich lassen sich MLI in drei Arten, abhängig der Spacer einteilen.

A) Netzartige Abstandshalter

Die gängigste Form der MLI sind Strahlungsschilde, die durch netzartige Spacer getrennt werden. Wie bereits in Abb. 24 b) dargestellt, sind abwechselnd Folie und Abstandshalter angeordnet. Aufgabe der Spacer, die meist aus Materialien wie Fiberglas, Quarz oder Kunststofffasern (z.B. Nylon) hergestellt werden, ist die Verlustleistung durch Festkörperwärmeleitung zu minimieren. Die netzartige Struktur garantiert dabei kleinste Angriffsflächen für den Wärmestrom. Die Spacer sind entweder mit einem speziellen Klebstoff auf die Folien zu heften oder lose dazwischen zu legen. Durch das Kleben wird allerdings die Fläche und damit die Verlustleistung größer. Die Handhabung nicht geklebter MLI ist aber bedeutend schwieriger, sodass ein Kompromiss anlässlich der Anforderungen zu finden ist.

B) Punktkontakt

Um die Angriffsfläche für den Wärmestrom zu reduzieren, gibt es die Möglichkeit statt eines Netzes lediglich punktförmige Partikel auf den Strahlungsschilden zu verteilen. Ist die Größe eines Teilchens im Vergleich zum Abstand zweier Partikel klein, wird dies als Punktkontakt deklariert. Um die Festkörperwärmeleitung zu minimieren, sollte der Abstand zwischen zwei Partikeln möglichst groß sein, sodass sich die Folien aber aufgrund des Eigengewichts nicht berühren.

Eine weitere Methode, Punktkontakte herzustellen, bietet die Prägung der Strahlungsschilde. In diesem Fall sind zusätzliche Abstandshalter nicht nötig, da durch die Prägung Gebiete entstehen (Abb. 27), die die Folien trennen (Flynn, 2009).

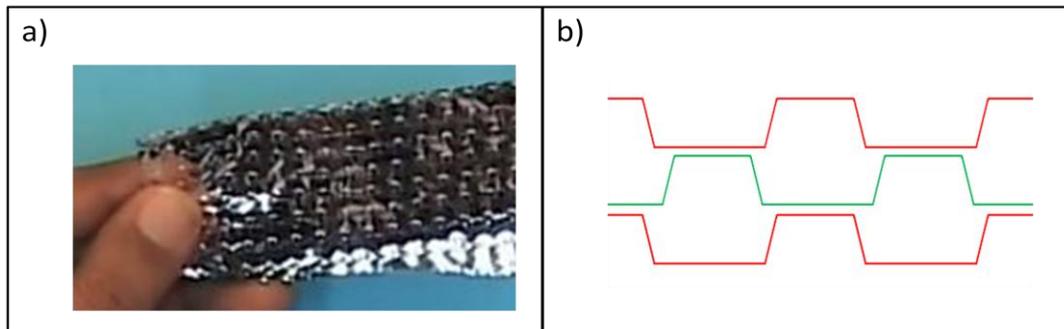


Abbildung 27: a) Geprägte MLI (nach Atrey, 2014) b) Schematischer Querschnitt (eigene Anfertigung)

C) Verbund-Abstandshalter

Die Verwendung von Verbund-Abstandshaltern gewährleistet die gezielte Anpassung mechanischer und thermischer Eigenschaften. Wie der Name schon suggeriert, bestehen die Spacer aus mindestens zwei gegenteiligen Materialien. Jedes davon erfüllt eine bestimmte Aufgabe. So kann der erste Teil aus einem leichten Material mit guten mechanischen, aber schlechten thermischen Eigenschaften gebaut werden. Als nächstes kommt ein Material mit schlechter mechanischer und guter thermischer Funktion zum Einsatz (Flynn, 2009).

Zusammenfassend werden die Aufgaben der einzelnen Komponenten wie folgt definiert (Barron, 1985):

- Strahlungsschild mit sehr geringem Emissionsgrad: Strahlung minimieren
- Hoch- bis Ultrahochvakuum: (Rest-) Gaswärmeleitung minimieren
- Abstandshalter: Festkörperwärmeleitung minimieren

Die Leistungsfähigkeit der MLI ist von Faktoren wie der Lagen-Dichte, Vakuumlevel und vielen weiteren abhängig, die in den nächsten Abschnitten detailliert beschrieben sind. In Tab. 9 sind die Wärmedurchgangskoeffizienten einiger MLI dargestellt.

Tabelle 9: Wärmedurchgangskoeffizienten diverser MLI

Isolation ($1,3 \times 10^{-6}$ mbar)	Lagen-Dichte (N/cm)	Wärmedurchgangs- koeffizient k (mW/mK)
Al-Folie und Nylon spacer	31	$3,5 \times 10^{-2}$
Al-Folie und Fiberglas spacer	30 – 60	$1,7 \times 10^{-2}$
Al-Folie gefaltet und Mylarfilm	35	$4,2 \times 10^{-2}$

Genau wie bei einfachen Strahlungsschilden ist es ratsam die MLI im 90° - Winkel zum Wärmestrom zu installieren, da die Multi-Lagen thermisch anisotrop sind (Neumann, 2009). Das heißt, ein nicht senkrechter bzw. zu den Lagen paralleler Wärmestrom ist höher als bei fachgerechter Installation.

Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgt nach Gleichung (2.7):

$$k = \left(\frac{N}{\Delta x} \right)^{-1} \cdot \left(\lambda_{AH} + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \frac{(T_W^2 - T_K^2) \cdot (T_W + T_K)}{2 - \varepsilon} \right) \quad (2.7)$$

λ_{AH} : Wärmeleitfähigkeit Abstandshalter

ϵ : Emissionsgrade der Strahlungsschilde

N: Anzahl Strahlungsschilde

Δx : Isolationsdicke

Aus Tab. 9 und Gleichung (2.7) ist bereits der erste wichtige Parameter die Lagen-Dichte (N/cm) erkennbar. Die Anzahl (N) der integrierten Folien pro Zentimeter (Δx) beeinflusst maßgeblich den k-Wert der MLI. Wie in Abb. 28 zu sehen ist, nimmt der k-Wert mit steigender Lagen-Dichte zunächst ab. Nachdem das Optimum von ca. 30 Lagen/cm erreicht wurde, verschlechtert dieser sich wieder. Grund dafür ist die Festkörperwärmeleitung, die ab einer bestimmten Dichte dominiert.

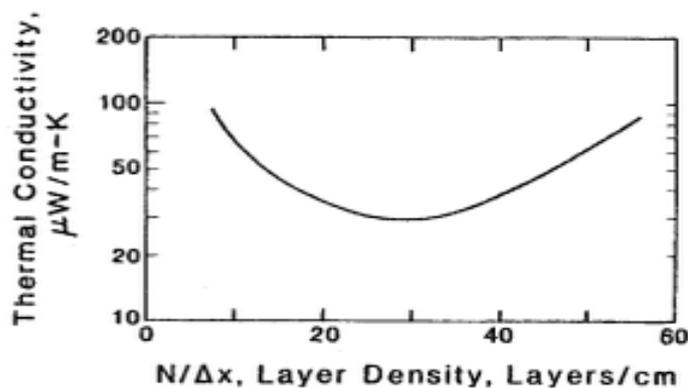


Abbildung 28: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit der Lagen-Dichte (nach Flynn, 2009)

Am Anfang dieses Kapitels wurde in Abb. 25 der Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit des Drucks gezeigt. Da für eine effektive Leistungsfähigkeit ein sehr geringer Druck vorhanden sein muss, wirkt sich die Restgaswärmeleitung auf MLI doppelt so stark wie auf anderen Isolationsmöglichkeiten aus. Abb. 29 zeigt schematisch denselben S-förmigen Verlauf des Wärmedurchgangskoeffizienten. Dabei seien die Bereiche 1 – 3, wie folgt definiert (Atrey, 2014):

Bereich 1 (grün eingekreist): Zwischen dem atmosphärischen Druck und ungefähr 15 Torr (20 mbar) ist der Wert druckunabhängig.

Bereich 2 (entlang des blauen Pfeils): Bei einer Druckreduzierung verhält sich der k-Wert proportional zum Druck des Restgases. Wärmeverluste entstehen hier hauptsächlich durch Restgaswärmeleitung. In einem logarithmisch dargestellten Diagramm ist der Graph nahezu linear.

Bereich 3 (gelb eingekreist): Ab einem Betriebsdruck von weniger als 10^{-3} Torr (ca. $1,33 \cdot 10^{-3}$ mbar) bleibt der Wärmedurchgangskoeffizient nahezu konstant.

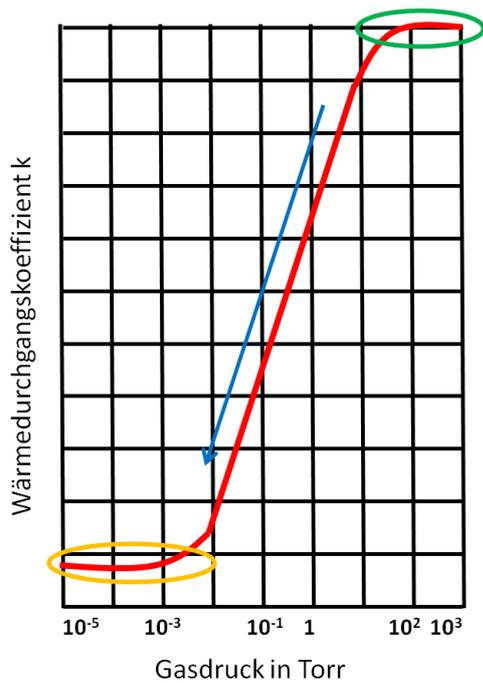


Abbildung 29: schematische Darstellung des Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit des Gasdrucks (modifiziert nach Atrey, 2014)

Durch Perforieren der Folien kann nicht nur das Gewicht der Isolation verbessert, sondern auch die Vakuumerzeugung erleichtert werden. Da die Spacer einen Großteil des Platzes zwischen den Schichten nutzen, muss das interstitielle Gas bei dessen Entfernung einen weiten Weg zurücklegen. Die Perforationen schaffen hierfür Abhilfe.

Die Vakuumerzeugung ohne Perforationen in den Strahlungsschilden wird im Englischen „Edge pumping“ (zu Deutsch: Rand-Pumpen) genannt. Das Rand-Pumpen kann einen ausreichend guten Vakuumlevel nur für eine gewisse Zeit garantieren, ist aber zeitintensiver als das sogenannte „Broadside pumping“. Broadside pumping (zu Deutsch: Quer-Pumpen) ist die Evakuierung mithilfe einer zu 10 % perforierten Fläche. Die Ausgasungen erhöhen sich um den Faktor 3 und die Aufrechterhaltung der Vakuumstufe ist einfacher (Flynn, 2009).

Durch das Perforieren ergeben sich allerdings auch einige Probleme. Der Emissionsgrad erhöht sich. Viele kleine Löcher bieten daher im Vergleich zu großen die bessere Lösung. Kleinere Perforationen verursachen aber einen höheren Wärmestrom, wie Abb. 30 zu entnehmen ist. Bezüglich dieses Dilemmas ist ein, den Anforderungen angemessener, Kompromiss zu finden.

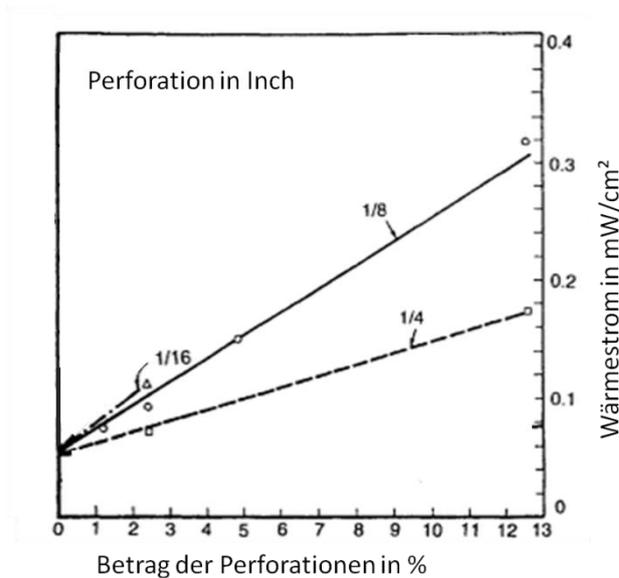


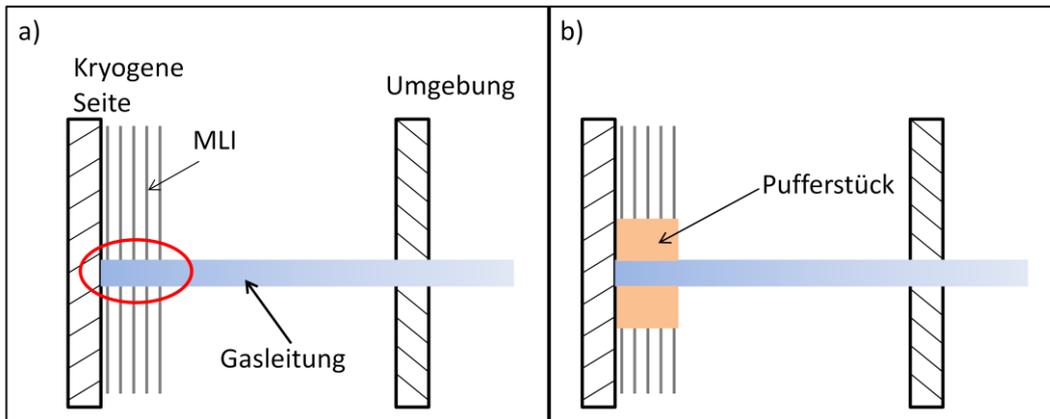
Abbildung 30: Wärmestrom in Abhängigkeit der Perforationen (modifiziert nach Timmerhaus, 2013)

Abb. 30 zeigt den Effekt der Perforationen auf den Wärmestrom. Die Werte wurden empirisch für eine MLI-Probe (Aluminium Strahlungsschild mit vinylummantelten Fiberglas-Abstandshaltern) ermittelt. Es zeigt sich deutlich, dass der Wärmestrom für Perforationen eines Durchmessers von 1/8 Inch⁸ (3,175 mm) um $0,32 \text{ mW/cm}^2 - 0,18 \text{ mW/cm}^2 = \mathbf{0,15 \text{ mW/cm}^2}$ größer ist als der von 1/4 Inch. Dieser Unterschied erscheint im ersten Moment vernachlässigbar. Es ist allerdings zu bedenken, dass diese Leistung pro Quadratzentimeter verloren geht. Bei einer fiktiven Anlage werden 10 m² (100.000 cm²) MLI benötigt. Der Unterschied der Verlustleistungen nimmt einen beachtlichen Wert von $100.000 \text{ cm}^2 \times 0,15 \text{ mW/cm}^2 = 15.000 \text{ mW} = 15 \text{ W}$ an.

Ein weiterer stark beeinflussender Faktor ist die Installation der MLI. Nicht immer ist es möglich die Multi-Lagen-Isolation einfach um den zu isolierenden Behälter zu wickeln, da Bauteile wie Gas- oder Elektroleitungen stören. Es muss entweder ein Loch durch alle Schichten geschnitten oder um die Leitungen herum gewickelt werden. Da solche Bauteile meist mit der Umgebung verbunden sind, haben diese eine höhere Temperatur als die kryogene Seite. Wie in Abb. 31 a) schematisch dargestellt, gibt es einen Wärmestrom zwischen Bauteil und MLI – verursacht durch Festkörperwärmeleitung (rot eingekreist). Diesen Fall nennt man einen **thermischen Kurzschluss**.

Bereiche, die von solchen Problemen betroffen sind, benötigen sogenannte Pufferstücke, die aus einem schlecht wärmeleitenden Material wie Glaswolle oder Schäumen hergestellt werden. Dadurch wird die Penetration von der Isolation entkoppelt (Abb. 31 b)) und die thermische Performanz nicht wesentlich verringert.

⁸ 1 Inch = 25,4 mm



**Abbildung 31: a) Thermischer Kurzschluss durch Penetration der MLI
b) Vermeidung von a) durch Einsatz eines Pufferstücks (eigene Anfertigung nach Flynn, 2009)**

Vom „Space Program“ der NASA wurden drei Befestigungsarten (Abb. 32) entwickelt, die dafür sorgen, dass die Isolation ihre Position behält und unter anderem die mechanischen Eigenschaften unterstützen. Für detaillierte Angaben bezüglich der Befestigungsarten sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen [Flynn, 2009, S. 503 ff.].

MLI sind mechanischer Belastung gegenüber sehr empfindlich. So ist es unabdingbar, dass geschultes Personal die Installation durchführt (MTM, 2014). Bei einer Druckbelastung von lediglich 2 psi (0,96 g/cm²) erhöht sich der Wärmetransport bei den meisten MLI um das 200-fache. Gefaltete Aluminium-Mylar-MLI bietet durch eine höhere mechanische Belastbarkeit eine kleine Abhilfe für dieses Problem (Flynn, 2009).

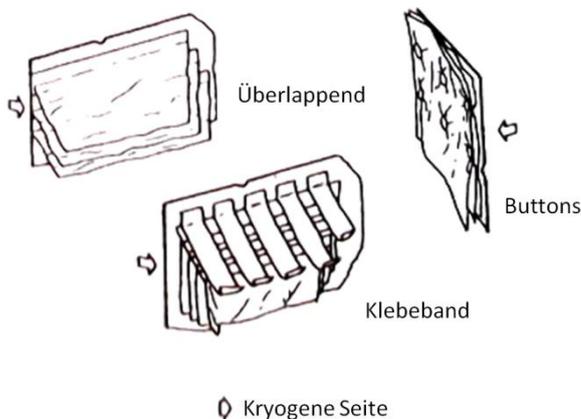


Abbildung 32: Befestigungsarten für MLI (nach Flynn, 2009)

Im Anhang befindet sich ein MLI-Installationsbeispiel der Firma Meyer Tools & MFG Inc., Illinois/USA sowie eine Probe Multi-Lagen-Isolation, die vom DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) freundlicherweise als Anschauungsmaterial zur Verfügung gestellt wurde.

2.4 Hilfsstoffe

Jede Vakuumpumpe erreicht ab einem bestimmten Druck ihre Grenzen – ein gewisser Anteil des Restgases lässt sich nicht mehr entfernen. Eine günstige Alternative ein Vakuumlevel lange aufrechtzuerhalten, bieten sogenannte Getter an. Eine große Oberfläche und hohe Affinität zu Gasen bei niedrigem Druck gewährleisten eine langanhaltende Entfernung des Restgases mithilfe einer Kombination aus physikalischer Sorption⁹ sowie Chemisorption¹⁰. Getter (Zeolith, Aktivkohle, Silikongel) werden entweder mit einer Haltevorrichtung oder mit einem Spezialkleber im Inneren des Behälters befestigt (Timmerhaus, 2013). Bevor der Getter in der Kryotechnik eingesetzt wird, ist er durch Ausheizen soweit wie möglich zu entgasen (Wutz, 2004).

3. Flüssigkeitsschilde

Kryostaten, die flüssigen Wasserstoff oder flüssiges Helium enthalten, lassen sich mit Flüssigkeitsschilde isolieren. Die teuren Flüssigkeiten, mit einer Siedetemperatur von bis zu 4,25 K, werden dabei von einem Hochvakuum und kostengünstigeren flüssigen Gas wie Stickstoff umgeben (siehe Abb. 33). Der flüssige Stickstoff, der sich in einem Zwischenbehälter befindet, wird thermisch durch eine evakuierte Perlitschüttung isoliert.

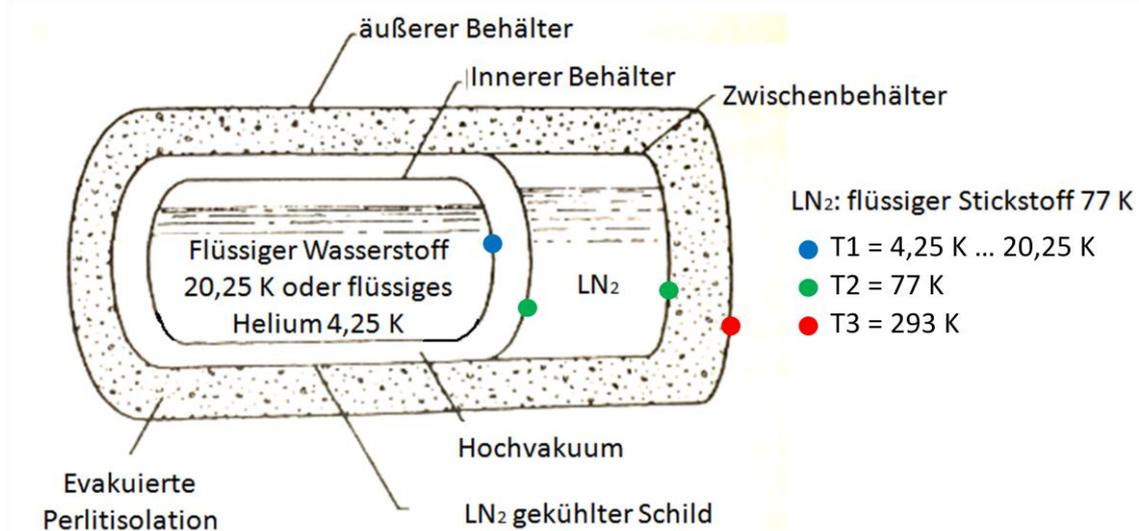


Abbildung 33: Flüssigkeitsschild zur Isolation extremer Temperaturen (modifiziert nach Flynn, 2009)

Bei der Annahme, dass T_1 minimal 4,25 K und T_2 der Siedetemperatur des Stickstoffs (77 K) entspricht, beträgt der maximale Temperaturunterschied 72,75 K zwischen diesen Behältern. Da die Strahlungsverluste proportional zu ΔT^4 sind, werden diese im Vergleich zu einer den obenstehenden Isolationen, bei der der Temperaturunterschied maximal $293 \text{ K}^{11} - 4,25 \text{ K} = 288,75 \text{ K}$ beträgt, drastisch reduziert. Versuche haben gezeigt, dass das LN₂-Schild bereits bis zu 99,6 % der Strahlungsverluste abfängt (Flynn, 2009).

⁹ Sorption: „Anreicherung eines Stoffes“ (<http://de.wikipedia.org/wiki/Sorption>)

¹⁰ Chemisorption: Das Restgas wird chemisch an das Gettermaterial gebunden

¹¹ 293 K entspricht in etwa der Raumtemperatur von 20 °C

Am Aufbau dieser Isolationen ist deutlich zu erkennen, dass solch isolierte Anlagen ein hohes Eigengewicht haben, da ein zusätzliches, flüssiges Gas nötig ist. Da die Effizienz von MLI in den letzten Jahren stark verbessert wurde, sind Flüssigkeitsschilde heutzutage in vielen Fällen nicht mehr relevant.

4. Fazit

Abschließend werden in diesem Kapitel die wesentlichen Wärmedurchgangskoeffizienten tabelliert (Tab. 10) und bildlich nebeneinander dargestellt (Abb. 34), damit diese untereinander besser vergleichbar sind. Flüssigkeitsschilde fehlen in dieser Darstellung, da sie, von MLI technisch überholt, heutzutage in der Kryotechnik kaum eine Rolle spielen.

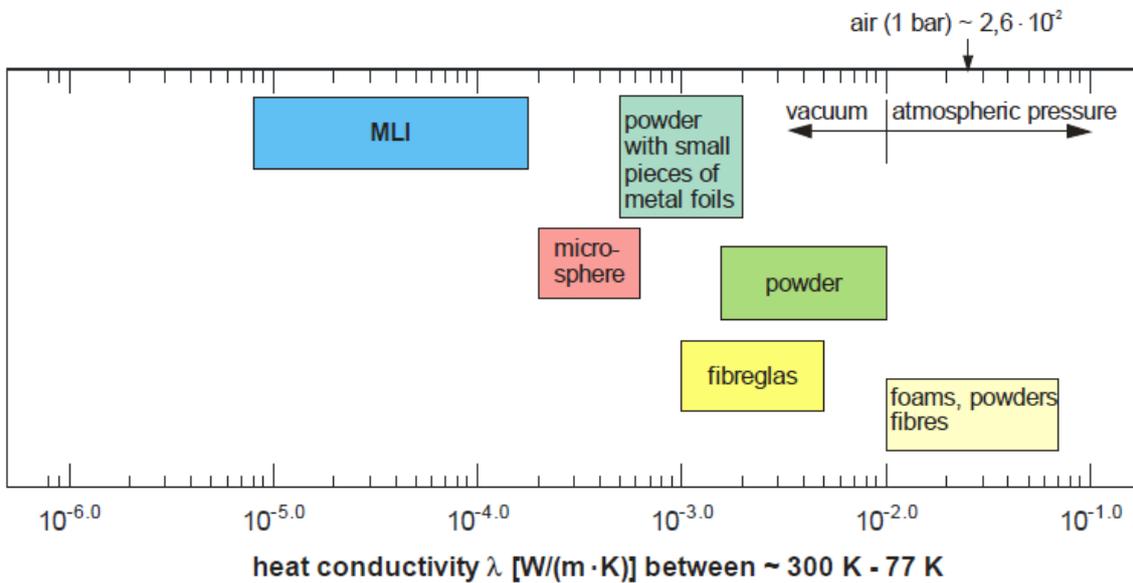


Abbildung 34: Wärmedurchgangskoeffizienten der Isolationsarten (hier: powder = Perlite) (nach Neumann, 2009)

Tabelle 10: Wärmedurchgangskoeffizienten der Isolationen (nach Flynn, 2009)

Isolation	Wärmedurchgangskoeffizient k (mW/mK)
Ultrahochvakuum ($1,3 \times 10^{-9}$ mbar)	5
<u>Zellulare Isolationen</u>	
Polyurethan (11 kg/m^3)	33
Polystyrol (46 kg/m^3)	26
Aerogel (80 kg/m^3)	19
<u>Nicht evakuierte Perlite/Fasern</u>	
Perlite (50 kg/m^3)	26
Perlite (210 kg/m^3)	44
Fiberglas (110 kg/m^3)	25
<u>Evakuierte Perlite ($1,3 \times 10^{-6}$ mbar)</u>	
Perlite ($60 - 180 \text{ kg/m}^3$)	1 – 2
Fiberglas (50 kg/m^3)	1,7
Perlite mit 50 Massen-% Al/Cu Späne	$3,5 \times 10^{-1}$
<u>Multi-Lagen Isolierung ($1,3 \times 10^{-6}$ mbar)</u>	
Al-Folie und Nylon Abstandshalter (31 Lagen/cm)	$3,5 \times 10^{-2}$
Al-Folie und Fiberglas Abstandshalter (30 – 60 Lagen/cm)	$1,7 \times 10^{-2}$
Al-Folie gefaltet und Mylarfilm (35 Lagen/cm)	$4,2 \times 10^{-2}$

Welche Isolationsart in einer Anlage verwendet wird, hängt jeweils von den Temperaturen und Ansprüchen des Kunden ab. Theoretisch können sämtliche Apparaturen mit MLI thermisch bestens isoliert werden. Allerdings verlangen die Anforderungen dies in vielen Fällen nicht. Die Kosten würden unnötig hoch.¹²

¹² Ein Quadratmeter MLI kostet bei Firma RUAG ca. 70 €; vgl. Anhang 7. Datenträger (nach Konstruktionsarbeit, 2014)

Anforderungsliste, Morphologischer Kasten und Stärkediagramm

Bevor eine Entscheidung über die Auswahl einer Isolationsart getroffen wird, sind zunächst die Anforderungen des Biogasverflüssigers zu klären.

Im Folgenden eine stichpunktartige Anforderungsliste, mit den wesentlichen Merkmalen:

- Reduzieren der Wärmeverluste (Genauere Werte werden im Kapitel *Berechnung der Wärmeverluste* berechnet)
- einfach (De-)Montage: Der Reaktor ist etwa einmal pro Monat zu öffnen, um die abgeschiedenen Störstoffe aus „Wärmetauscher 1“ zu untersuchen
- geringe Kosten: da es sich um eine Versuchsanlage handelt, muss zuerst geprüft werden, ob das Verfahren der Tieftemperatur-Desublimation¹³ (TTD-Verfahren) in der Praxis umsetzbar ist. Im Anschluss kann der Biogasverflüssiger hinsichtlich der thermischen Isolation optimiert werden
- Eignung für eine Betriebstemperatur von etwa 100 K

In einem morphologischen Kasten sind die Möglichkeiten die drei grundlegenden Wärmeübertragungsarten zu verringern, dargestellt. Die Kombination jeweils eines Werts aus den Anforderungen ergibt die Isolationsarten, die im Kapitel *Überblick: Isolationsmöglichkeiten in der Kryotechnik* beschrieben wurden.

Varianten	1	2	3	4	5
Anforderungen					
Konvektion verringern	Schaum ■	Perlit/ Faser ■	Vakuum ■ ■ ■ ■	keins ■	
Wärmeleitung verringern	Perlit/ Faser ■ ■	Vakuum ■	keins ■ ■ ■ ■		
Strahlung verringern	Schaum ■	Perlit/ Faser	Strahlungsschild ■ ■ ■ ■	Flüssiggasschild ■	keins ■ ■

- ▲ MLI
- ▲ Strahlungsschild (ohne Vakuum)
- ▲ Flüssiggasschild
- Nicht evakuierte Perlit/ Fasern
- Evakuierte Perlit/ Fasern
- Schaum
- Evakuiertes Perlit mit Al-/Cu-Spänen

Abbildung 35: Morphologischer Kasten (eigene Anfertigung)

¹³ Siehe Nachtmann, 2012 für weitere Details bezüglich des TTD-Verfahrens

Diese Kombinationen sind bezüglich ihrer technischen und wirtschaftlichen Wertigkeit zu bewerten und anschließend in einem Stärkediagramm nach VDI-Richtlinie 2225 (Weinbrenner, 2014) darzustellen. Jeweils vier Kriterien werden für die technische und wirtschaftliche Wertigkeit definiert und anschließend durch einen Vergleich dieser gewichtet. In einer matrizenartigen Darstellung werden die Kombinationen mit Punkten zwischen 1 ... 5 bewertet und mit den Gewichtungsfaktoren verrechnet. Eine Division der jeweils gebildeten Summen der Isolationsarten durch die höchste Punktbewertung (in diesem Fall 5) ergibt Zahlenwerte zwischen 0 ... 1, die in das Stärkediagramm eingetragen werden.

Die folgenden Tabellen wurden anhand der Informationen aus den vorhergehenden Kapiteln erstellt. Die Bewertungen erfolgten subjektiv, d.h. die Eigenschaften lassen sich durchaus anders interpretieren. Die Tabellen zur Berechnung der Gewichtungen befinden sich im Anhang.

Für eine übersichtlichere Darstellung sind die Isolationsarten in den Tabellen in abgekürzter Form abgebildet.

NEPF: nicht evakuierte Perlit-/Faserisolationen

EPF: evakuierte Perlit-/Faserisolationen

SKV: Strahlungsschilde ohne Vakuum

MLI: Multi-Lagen-Isolation

S: Schaum

V: Vakuumisolation

O: evakuierte Perlitschüttung mit Spanzusatz (aus dem Englischen „opacified perlite“)

FS: Flüssigkeitsschild

Tabelle 11: Bewertung technischer Wertigkeit

	NEPF	EPF	SKV	MLI	S	V	O	FS
k-Wert (1)	3	4	1	5	2	4	5	4
Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Belastung (2)	3	3	4	2	4	5	2	5
Temperatur – Einsatzbereich (3)	2	5	1	5	2	4	5	3
Gewicht (4)	3	3	4	4	4	5	3	1

Tabelle 12: Technische Wertigkeit

	NEPF	EPF	SKV	MLI	S	V	O	FS
(1)	1,125	1,5	0,375	1,875	0,75	1,5	1,875	1,5
(2)	0,75	0,75	1	0,5	1	1,25	0,5	1,25
(3)	0,5	1,25	0,25	1,25	0,5	1	1,25	0,75
(4)	0,375	0,375	0,5	0,5	0,375	0,625	0,375	0,125
Summe	2,75	3,875	2,125	4,125	2,625	4	4	3,625
Wertigkeit	0,55	0,775	0,425	0,825	0,525	0,875	0,8	0,725

Tabelle 13: Bewertung wirtschaftlicher Wertigkeit

	NEPF	EPF	SKV	MLI	S	V	O	FS
Anschaffungskosten (1)	4	2	5	1	4	3	2	1
Einfache (De-)Montage (2)	3	3	5	2	4	5	3	3
Energiekosten (3)	5	3	5	2	5	3	3	1
Wartungshäufigkeit (4)	4	4	5	4	3	5	4	3

Tabelle 14: wirtschaftliche Wertigkeit

	NEPF	EPF	SKV	MLI	S	V	O	FS
(1)	1,33	0,67	1,67	0,33	1,67	1	0,67	0,33
(2)	1	1	1,67	1,67	1,33	1,67	1	1
(3)	0,83	0,5	0,83	0,33	0,83	0,5	0,5	0,17
(4)	0,67	0,67	0,83	0,67	0,5	0,83	0,67	0,5
Summe	3,83	2,83	5	2	4	4	2,83	2
Wertigkeit	0,77	0,57	1	0,4	0,8	0,8	0,57	0,4

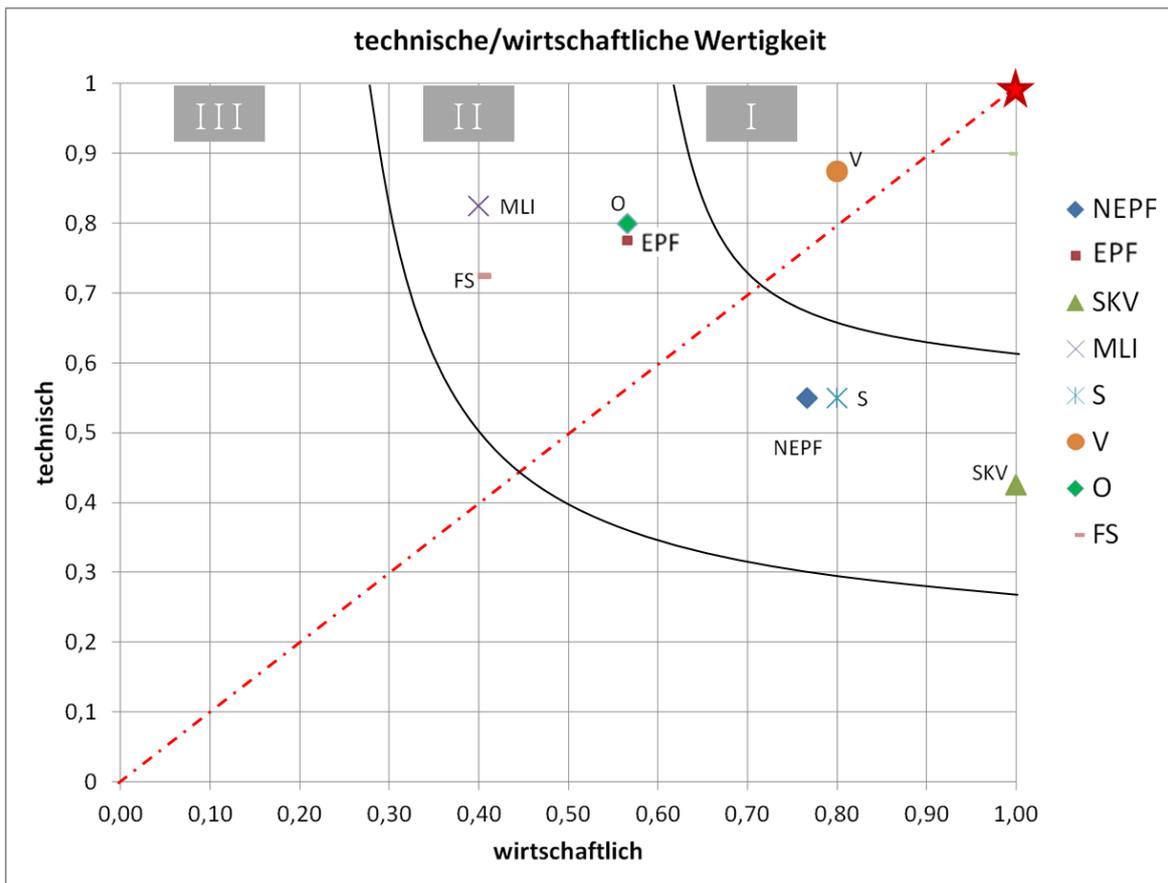
Aus den Tabellen 12 und 14 ergibt sich das Stärkediagramm (Abb. 36):

Je näher die Alternativen am Idealpunkt (1|1) liegen (dargestellt durch den Stern), desto besser. Die rote Linie markiert technisch und wirtschaftlich ausgeglichene Lösungen und die Bereiche I–III teilen das Koordinatensystem in die Relevanz der Produkte ein.

Bereich I: TOP-Lösungen

Bereich II: akzeptable Lösungen

Bereich III: inakzeptable Lösungen



- ◆ NEPF : Nicht evakuierte Perlit-/Faserisolationen
- EPF : evakuierte Perlit-/Faserisolationen
- ▲ SKV : Strahlungsschilde ohne Vakuum
- × MLI : Multi-Lagen-Isolation
- ✖ S : Schaum
- V : Vakuum
- ◆ O : evakuierte Perlitschüttung mit Spanzusatz
- FS : Flüssigkeitsschild

Abbildung 36: Stärkediagramm (eigene Anfertigung)

Obwohl MLI die beste Isolationsfähigkeit hat und in vielen komplexen Bereichen wie beispielsweise der Raumfahrt Anwendung findet, ist sie technisch nicht am besten bewertet worden. Das liegt vor allem daran, dass die Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Belastung bei Multi-Lagen-Isolationen sehr hoch ist.

Bis auf die Vakuumisolation, die man als TOP-Produkt bezeichnen kann, befinden sich alle Isolationsmöglichkeiten in Bereich II. Es ist allerdings auffällig, dass Strahlungsschilde ohne Einsatz eines zusätzlichen Vakuums wirtschaftlich den Ideal-Wert von 1 erreicht haben. Wie in der Anforderungsliste bereits erläutert wurde, handelt es sich bei dem Biogasverflüssiger um eine Pilotanlage, die das TTD-Verfahren untersuchen soll. Da die Kosten deshalb möglichst gering gehalten werden sollen, ist sich auf Grundlage der gewonnen Erkenntnisse für eine Vakuumisolation ($p = 10^{-5}$ mbar) kombiniert mit Strahlungsschilden zu entscheiden. Das Potenzial dieser Lösung ist im Abschnitt 1.3 *Strahlungsschilde* im Berechnungsbeispiel dargelegt.

Zur Prüfung der Effektivität dieser Lösung werden in den abschließenden Kapiteln dieser Arbeit die Verlustleistungen sowohl ohne, als auch mit integrierten Strahlungsschilden anhand realistischer Modelle berechnet und verglichen.

Plausibilitätsprüfung des Programms AUWÄ

Im Rahmen der Konstruktionsarbeit im Sommersemester 2014, die sich um den Grobentwurf des Biogasverflüssigers gekümmert hat, wurde das Programm AUWÄ von Johannes Fischer und Andre Schallenburger entwickelt. Hauptaufgabe des Programms ist die Berechnung der Geometrie sowie die Leistungsaufnahme des zweiten Wärmetauschers (Konstruktionsbericht, 2014). Für detaillierte Beschreibungen sei auf den Bericht der Konstruktionsarbeit hingewiesen.

Um die Strahlungsverluste dieses Wärmetauschers berechnen zu können, ist dessen Wandtemperatur nötig. Der Temperaturverlauf über die Lauflänge wird von AUWÄ visualisiert. Durch eine Modifikation des Programmcodes werden auch die einzelnen Werte pro Flächenelement ausgegeben.

In diesem Abschnitt gilt es diese Erkenntnisse zu überprüfen. Dazu werden sämtliche Formeln, die im Quellcode von AUWÄ hinterlegt sind, auf ihre Richtigkeit geprüft und anschließend das Programm mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms „nachgebildet“ (siehe Anhang 7. Datenträger). Ziel ist lediglich eine Plausibilitätsprüfung. Das heißt, keine identischen Werte zu berechnen, sondern ihre Größenordnung. Unter dieser Voraussetzung können einige Annahmen getroffen werden, um den Berechnungsaufwand zu reduzieren.

Vorgehensweise der Plausibilitätsprüfung:

Analog zu AUWÄ wird das Wärmetauscherrohr (WT-Rohr) in 0,1 mm breite Streifen aufgeteilt. Beide Programme sind damit vergleichbar.

Zunächst ist die Änderung der Gastemperatur entlang der Lauflänge, unter Vorgabe der Anfangs- und Endtemperatur (20 bis -145 °C), als konstant anzunehmen, sodass ein linearer Verlauf entsteht. Die Ergebnisse aus dieser Annahme wurden allerdings als fehlerbehaftet eingeschätzt. Grund ist eine zu hohe Abweichung des Gastemperaturverlaufs, wie in Abb. 37 a) erkennbar ist. Abb. 37 zeigt schematisch die Temperaturen entlang der Lauflänge für ein fiktives Beispiel.

Der von AUWÄ geplottete Verlauf ist ab der Temperatur x (T_x) als linear zu betrachten (Abb. 37b)). T_x ist die Kondensationstemperatur des CO_2 - CH_4 -Gemisches. Diese wird anhand eines von Johannes Fischer erstellten Polynoms 4. Grades berechnet. Grundlage für die folgende Formel sind Versuchsauswertungen der Dissertation von Detlef Seime (Seime, 1997).

$$T_x = -2 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 0,0006x^3 - 0,0565x^2 + 2,3605x + 148,88 \quad (4.1)$$

Da das Biogas einen Kohlenstoffdioxidanteil von $x = 43 \%$ hat, ergibt sich eine Kondensationstemperatur von ca. **186,78 K**.

Linearisiert man den Temperaturverlauf von der Kondensations- zur Endtemperatur, ist die Differenz zunächst relativ gering.

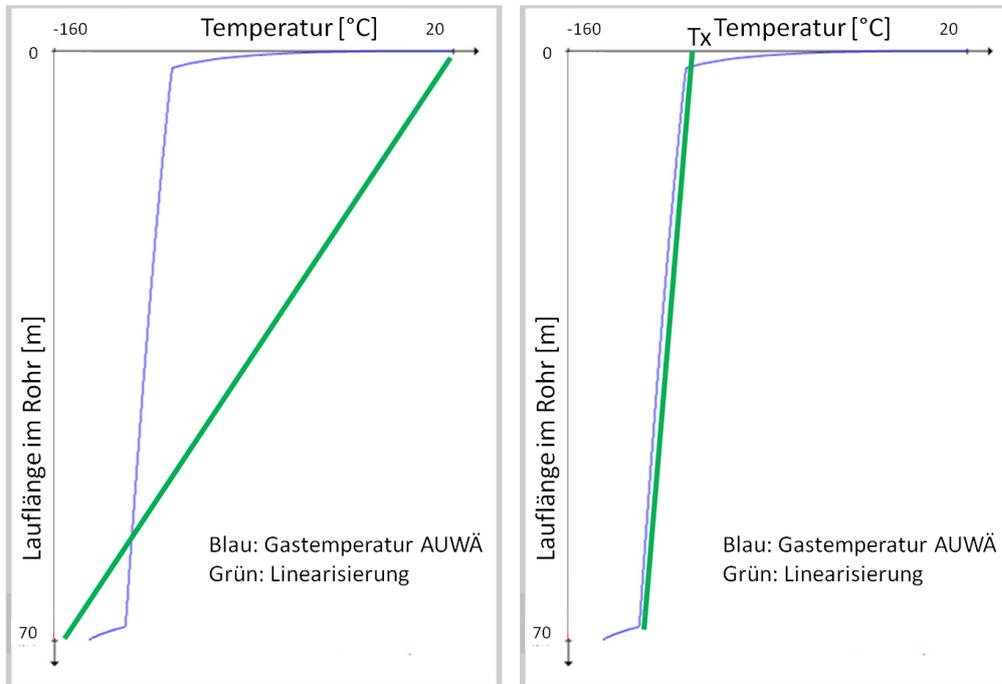


Abbildung 37: a) inakzeptable Annahme b) akzeptable Annahme des Temperaturverlaufs (modifiziert nach AUWÄ)

Im Wärmetauscher bildet sich Trockeneis (sublimiertes CO_2), das sich an den Wänden festsetzt und die Wärmetransporte beeinflusst. Diese Trockeneisbildung wird beim Plausibilisieren nicht beachtet.

Für die weiteren Berechnungsschritte sind alle nötigen Variablen festzulegen sowie temperaturabhängige Parameter (Wärmeleitfähigkeiten, Dichten, Massen- und Volumenprozent des Methans sowie Wärmeübergangszahl) zu berechnen.

Nach Prüfung der Formeln konnte nachgewiesen werden, dass die Gleichung zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit eines Gasmisches nach Wassiljewa (Gleichung 41 im Konstruktionsbericht) sowie die Temperatur des Trockeneises (Gleichung 63) zu verbessern sind. Mittlerweile wurden diese Fehler im Quellcode von AUWÄ von Herrn Johannes Fischer behoben, wodurch sich der maximale Volumenstrom des Wärmetauschers zur vorherigen Version etwas verringert hat.

Bei der Festlegung der Variablen wird die nächste Annahme zur Vereinfachung getroffen, indem die Strömung durch das Rohr konstant als laminar zu betrachten ist. Nachdem alle, für die Wärmetransporte, wichtigen Variablen definiert wurden, lassen sich die Wärmeverluste berechnen. Abb. 38 zeigt schematisch die Transportvorgänge zwischen zwei Rohrelementen.

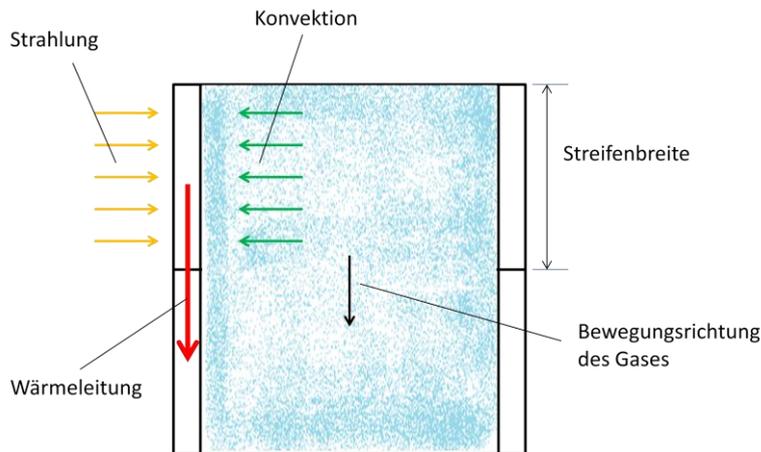


Abbildung 38: Wärmevorgänge zwischen zwei Rohrelementen (eigene Anfertigung)

Der Grundgedanke dieser Darstellung ist, dass sich die Wärmeleitung eines Streifens aus der aufgenommenen Strahlungs- und Konvektionsleistung und der zugeführten Wärmeleitung aus dem darüber liegenden Streifen zusammensetzt. Der gesamte Wärmestrom aus den drei Übertragungsarten beeinflusst die Wandtemperatur des Streifens. Da mindestens eine Wandtemperatur gegeben sein muss, um diese Berechnungsmethode anzuwenden, wird iterativ eine Temperatur angenommen, bis der resultierende gesamte Wärmestrom dem theoretisch überschlägigen Wärmestrom entspricht. Dieser ist für die jeweiligen Vorgänge (Methan abkühlen, Kohlenstoffdioxid abkühlen, Kohlenstoffdioxid sublimieren und Trockeneiskühlung) mit folgender Formel (Gleichung 4.2) berechenbar:

$$\dot{Q} = c_p \cdot \dot{V} \cdot \rho \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

Die Herleitung erfolgt durch die Gleichungen 4.3 und 4.4:

$$\dot{Q} = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \quad (4.3)$$

$$\text{mit } \dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (4.4)$$

Um diesen Prozess greifbarer erscheinen zu lassen, wird an dieser Stelle die Vorgehensweise an einem fiktiven Beispiel erklärt (vgl. Tab. 15).

Tabelle 15: Berechnung des Wärmestroms

	Strahlung	Konvektion	Wärmeleitung	Wärmestrom gesamt
1. Streifen	6	+	4	+ 0 = 10
2. Streifen	2	+	5	+ 10 = 17
3. Streifen	3	+	7	+ 17 = 27

Es seien drei Streifen unterschiedlicher Gastemperaturen gegeben. Die Wärmeleitung des ersten Streifens beträgt Null, da sich oberhalb kein Material befindet, das den Wärmestrom leiten könnte. Stattdessen ist der Betrag der Strahlungsleistung höher als die der anderen,

weil die Oberseite (Deckel) die Angriffsfläche vergrößert. Der gesamte Wärmestrom des ersten Streifens setzt sich auf Strahlungsleistung und Konvektion zusammen, da die aufgenommene Leistung wieder abgegeben werden muss. Dieser Wärmestrom entspricht dem Wärmeleitungsstrom vom ersten zum zweiten Streifen. Der Wärmestrom des zweiten Streifens ist demnach die Summe aller Transportarten. Dieser Vorgang wiederholt sich bis zum Ende des Wärmetauschers. Anschließend wird die Summe aller „gesamten Wärmeströme“ gebildet und iterativ die richtige Anfangstemperatur gefunden.

Ein Vergleich der Strahlungs- und Konvektionsleistungen sowie der damit verbundenen Wandtemperaturen von AUWÄ mit den vereinfachten Berechnungen, liefert zunächst vernachlässigbare Unterschiede (vgl. Abb. 39).

Die Abweichung der Gastemperatur beträgt im arithmetischen Mittel 7,1 K im Vergleich zu AUWÄ. Folglich summieren sich die Fehler durch die vereinfachenden Annahmen immer weiter auf, sodass sich die Wärmeströme stark unterscheiden.

Das Iterationsverfahren ist unter diesen Voraussetzungen nicht möglich, da keine realistischen Werte das Ergebnis sind. Dennoch können viele Werte größentechnisch nachgewiesen werden, sodass das Programm AUWÄ als plausibel anzusehen ist. Für genauere Ergebnisse sind die getroffenen Annahmen zu ungenau.

AS	AU	C	AT	N	AY
Strahlung AUWÄ	Strahlung vereinfacht	Gastemp	Konvektion AUWÄ	Gastemp.-linear in °C	Konvektion vom Gas
0,075958	0,07600592	-86,357359	0,000937	-86,370402	0,157758925
0,000434	0,000408402	-86,368244	0,000937	-86,374591	0,000847671
0,000434	0,000408403	-86,379126	0,000936	-86,382969	0,000847647
0,000434	0,000408404	-86,390006	0,000936	-86,39134699	0,000847623
0,000434	0,000408405	-86,400884	0,000936	-86,39972499	0,000847599
0,000434	0,000408406	-86,41176	0,000936	-86,40810299	0,000847575
0,000434	0,000408407	-86,422634	0,000936	-86,41648098	0,000847552
0,000434	0,000408408	-86,433505	0,000935	-86,42485898	0,000847528
0,000434	0,000408409	-86,444374	0,000935	-86,43323698	0,000847505
0,000434	0,000408411	-86,455241	0,000935	-86,44161498	0,000847482
0,000434	0,000408412	-86,466105	0,000935	-86,44999297	0,000847459
0,000434	0,000408413	-86,476967	0,000934	-86,45837097	0,000847436
0,000434	0,000408414	-86,487827	0,000934	-86,46674897	0,000847413
0,000434	0,000408415	-86,498685	0,000934	-86,47512696	0,000847391
0,000434	0,000408416	-86,50954	0,000934	-86,48350496	0,000847368
0,000434	0,000408418	-86,520393	0,000934	-86,49188296	0,000847346
0,000434	0,000408419	-86,531244	0,000933	-86,50026096	0,000847324
0,000434	0,00040842	-86,542093	0,000933	-86,50863895	0,000847302
0,000434	0,000408421	-86,552939	0,000933	-86,51701695	0,00084728
0,000434	0,000408422	-86,563784	0,000933	-86,52539495	0,000847258

Abbildung 39: Berechnungsergebnisse für Strahlung und Konvektion (grün: AUWÄ / gelb: eigene Berechnung)

Berechnung der Wärmeverluste

Nachdem die Entscheidung der Isolationsmethode auf Strahlungsschilde kombiniert mit einem Hochvakuum von 10^{-5} mbar gefallen ist, wird anhand von Berechnungen der Verlustleistungen das Einsparpotenzial aufgezeigt. Da eine Vakuumisolation für kryotechnische Apparaturen unerlässlich ist, sind im ersten Schritt die Verluste im evakuierten Reaktor zu berechnen. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Wärmeverluste mithilfe der Formel (2.3) aus Abschnitt 1.3 *Strahlungsschilde* für den isolierten Fall.

Die Berechnungen in diesem Kapitel sind in zwei Bereiche eingeteilt. Verlustleistungen aus Konvektion, Restgas- und Festkörperwärmeleitung sowie thermischer Strahlung auf bewusst gewählte Bauteile im Reaktor (Gasleitungen, Kamerasystem, Kupferlitzen) lassen sich konventionell anhand der beschriebenen Formeln berechnet. Strahlungsverluste auf den Kaltkopf und die darauf befestigte Wärmeübertragungsplatte werden unter Zuhilfenahme eines CAD-Modells, das aus den technischen Zeichnungen der Anlage hervorgeht, ermittelt. Das Modell ist zur Feststellung der Verbindungslinien und der damit einhergehenden Einstrahlzahlen (φ) zur Berechnung der Strahlungsverluste bei wechselseitigen Reflexionen nötig.

Das Berechnungsergebnis der Strahlungsleistungen mit wechselseitigen Reflexionen würde bei Berücksichtigung aller Bauteile zwar genauer sein. Allerdings ist die Position der Gasleitungen und Kupferlitzen nicht eindeutig definiert, sodass eine Berechnung nicht möglich ist. Das Kamerasystem wird mit vereinfachter Strahlungsformel nach Stefan-Boltzmann berechnet, da für ein so kleines Bauteil der Erkenntnisgewinn als weniger wichtig eingeschätzt wird.

Anmerkung: *Im Anhang befinden sich in Tab. A2 alle Bauteile inklusive ihrer Außenmaterialien sowie den dazugehörenden Emissionsgraden.*

1. Verlustleistungen im Trockeneisaustragsystem

Das im zweiten Wärmetauscher ausgefrorene Kohlenstoffdioxid wird im sog. Trockeneisaustragsystem bis zu seiner Entnahme gespeichert. Abb. 40 zeigt einen schematischen Aufbau dieses Behälters.

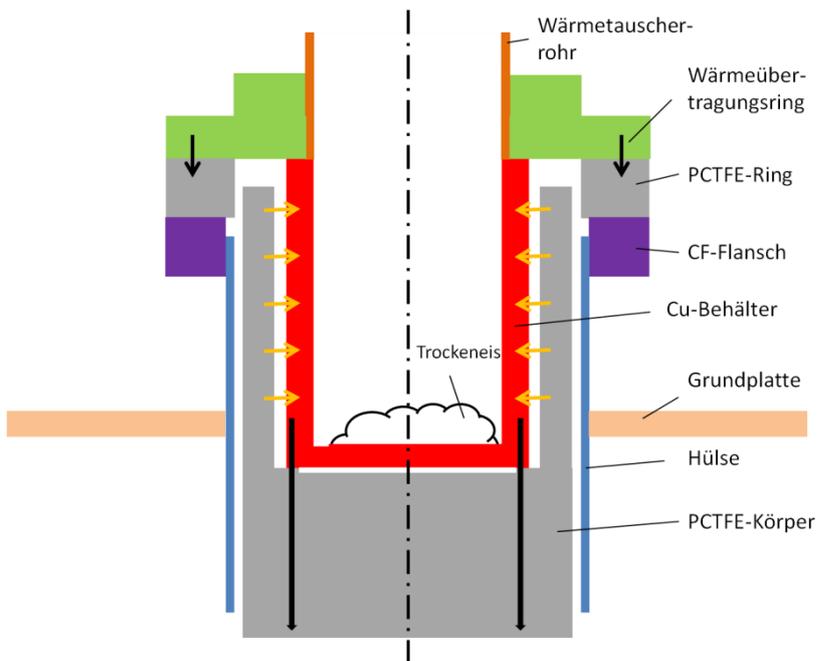


Abbildung 40: Trockeneisaustragsystem schematisch (eigene Anfertigung)

Zwischen PCTFE-Körper und Kupferbehälter bildet sich aufgrund der Temperaturverteilung im Spalt eine Strömung infolge eines Dichteunterschieds aus, die Konvektion verursacht. In Absprache mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Rödiger wurde vereinbart diese Verluste zu vernachlässigen, da kleine Wärmeströme zu erwarten sind, die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten jedoch eine sehr komplexe Berechnung erfordert.

Die Festkörperwärmeleitung, dargestellt durch die schwarzen Pfeile und Strahlung (orange Pfeile) wird im Folgenden berechnet.

Anmerkung: Jegliche Berechnungsprogramme befinden sich auf dem Datenträger im Anhang.

1.1. Festkörperwärmeleitung

1.1.1 Kupferbehälter – PCTFE-Körper

Als Randbedingungen für diese Berechnung werden für die Temperatur des PCTFE-Behälters ein Betrag von 293 K und die Temperatur des Cu-Behälters konstant über seine Lauflänge mit 113 K (Endtemperatur des WT-Rohrs) festgelegt. Da der Cu-Behälter in den PCTFE-Körper integriert ist, dieser aber kein Vollmaterial ist, reduziert sich die Angriffsfläche und somit die Verlustleistung.

Als Basis zur Berechnung der Festkörperwärmeleitung dient die in den Grundlagen erwähnte Formel (1.3).

Die Wärmeleitfähigkeit des PCTFE-Körpers sowie die Geometriewerte stammen aus dem Bericht der Konstruktionsarbeit sowie zugehörigen CAD-Modellen (Konstruktionsbericht,

2014). Bei einem Außendurchmesser von 90 mm und einem Innendurchmesser von 83 mm (dieser Wert musste angenommen werden, da zum Zeitpunkt der Berechnung das Maß nicht eindeutig definiert war) ergibt sich eine ringförmige Angriffsfläche (rot in Abb. 41) von ungefähr 950 mm². Abb. 41 zeigt ein nicht maßstäbliches Modell des PCTFE-Körpers, das lediglich die Auflagefläche des Kupferbehälters veranschaulicht.

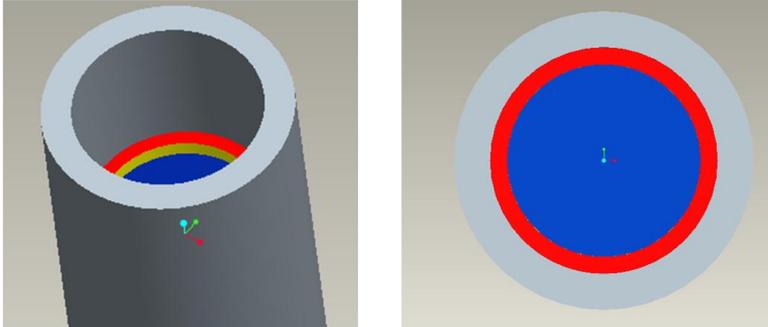


Abbildung 41: PCTFE-Körper (eigene Anfertigung)

Damit stehen folgende Werte zur Berechnung zur Verfügung:

$\lambda_{\text{PCTFE}} = 0,19 \text{ W/mK}$ // $d = 63,5 \text{ mm}$ // $A = 950 \text{ mm}^2$ // $T_1 = 293 \text{ K}$ // $T_2 = 128 \text{ K}$ (Endtemperatur des zweiten Wärmetauschers)

$$\dot{Q} = \frac{0,19}{63,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 950 \cdot 10^{-6} \cdot (293 - 128) = \mathbf{0,47 \text{ W}}$$

Um die Wirkung der verkleinerten Angriffsfläche zu verdeutlichen, wird die gleiche Berechnung für ein Vollmaterial angestellt. Die Auflagefläche beträgt in diesem Fall, unter Berücksichtigung eines Außendurchmessers von 90 mm, 6362 mm².

$$\dot{Q} = \frac{0,19}{63,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 6362 \cdot 10^{-6} \cdot (293 - 128) = \mathbf{3,14 \text{ W}}$$

Es ergibt sich bei einer Ringfläche eine beachtliche Reduzierung von $3,14 \text{ W} - 0,47 \text{ W} = \mathbf{2,67 \text{ W}}$, was einer Verbesserung von etwa 85 % entspricht. Diese Verlustleistung ist durch Isolationsmaßnahmen, die in dieser Arbeit behandelt wurden, nicht zu verhindern.

1.1.2 Wärmeübertragungsplatte – PCTFE-Dichtring

Wie aus Abb. 40 ersichtlich ist, existiert ein weiterer Wärmestrom, der durch Festkörperwärmeleitung verursacht wird. Unter der Annahme die Hülse habe eine konstante Temperatur über die Lauflänge und gibt diese an den Flansch weiter, stellt sich ein Temperaturunterschied von $293 \text{ K} - 128 \text{ K} = \mathbf{165 \text{ K}}$ ein. Die resultierende Verlustleistung lässt sich analog zu Abschnitt 1.1.1 Kupferbehälter – PCTFE-Körper berechnen.

Mit folgenden Randbedingungen: $\lambda_{\text{PCTFE}} = 0,19$ // $d = 20$ mm // $A_{\text{Dichtring}} \approx 8800$ mm² (gemessen mit Pro Engineer) ergibt sich ein Wärmeverlust von **13,8 W**.

$$\dot{Q} = \frac{0,19}{20 \cdot 10^{-3}} \cdot 8800 \cdot 10^{-6} \cdot (293 - 128) = \mathbf{13,8 W}$$

1.2 Strahlungsverluste

Der Kupferbehälter des Trockeneisaustragsystems hat zur Vermeidung von Wärmeleitung einen kleineren Durchmesser als der PCTFE-Körper innen. Stattdessen finden ein Strahlungsaustausch sowie vernachlässigbare Konvektionsströme statt. Die Berechnung der Strahlungsverluste erfolgt mit Gleichung 1.16, die für diffus-graue Körper in einem Raum gilt. Beide Körper können durch eine Rohrgeometrie angenähert werden, sodass sich bei den Durchmessern (Indizes: 1: innen und 2: außen) $D_1 = 84$ mm sowie $D_2 = 90$ mm und einer Höhe von 97 mm folgende Mantelflächen ergeben: $A_1 = 0,0256$ m² und $A_2 = 0,0274$ m².

Wie bei den folgenden Berechnungen beträgt der Emissionsgrad des Kupferbechers $\varepsilon_1 = 0,037$ (VDI, 1994). Der Emissionsgrad des PCTFE-Körpers wird mit $\varepsilon_2 = 1$ angenommen, da in der Literatur keine vergleichbaren Werte zu finden sind und dies den Worst Case darstellt.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \left(\frac{1}{0,037} - 1\right) \frac{0,0256}{0,0274}} = 0,038$$

Dieser Wert ist bei Temperaturen von $T_1 = 128$ K (Endtemperatur des zweiten Wärmetauschers) und $T_2 = 293$ K (Raumtemperatur) in die allgemeine Strahlungsformel nach Stefan-Boltzmann einzusetzen.

$$\dot{Q} = 0,038 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0256 \cdot (293^4 - 128^4) = \mathbf{0,39 W}$$

2. Restgaswärmeleitung

Vor der Berechnung der Verlustleistungen durch Restgaswärmeleitung ist zunächst der Bereich nach Knudsen zu überprüfen. Dazu wird das Verhältnis der mittleren freien Weglänge (L) und der charakteristischen Länge (s) ermittelt.

Die Berechnung der mittleren freien Weglänge ist nach Gleichung (1.5) möglich:

Folgende Parameter sind gegeben:

$p = 0,001$ Pa // $T = 293$ K // $\mu_{\text{Luft},300\text{K}} = 18,47$ μPas (Atrey, 2014) // $R = 8,314$ J/molK
(allgemeine Gaskonstante)

Spezifische Gaskonstante der Luft (nach Gleichung 5.1):

$$R_{Luft} = \frac{R}{M_{Luft}} \quad (5.1)$$

Molare Masse der Luft (M_{Luft}):

Für die Berechnung der molaren Masse von Luft ist seine Zusammensetzung erforderlich:

78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff und 1 % Argon (Wikipedia, 2015):

$M_{Stickstoff}$: 28 g/mol

$M_{Sauerstoff}$: 32 g/mol

M_{Argon} : 40 g/mol

$$\begin{aligned} M_{Luft} &= 0,78 \cdot M_{Stickstoff} + 0,21 \cdot M_{Sauerstoff} + 0,01 \cdot M_{Argon} = \\ &= 0,78 \cdot 28 \frac{g}{mol} + 0,21 \cdot 32 \frac{g}{mol} + 0,01 \cdot 40 \frac{g}{mol} = \mathbf{28,96 \frac{g}{mol}} \end{aligned}$$

$$R_{Luft} = \frac{8,314 \frac{J}{mol \cdot K}}{\frac{28,96 \frac{kg}{1000 mol}}{1000 mol}} = 287,085 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Damit ergibt sich eine MFW von:

$$L = \frac{18,47 \cdot 10^{-6}}{0,001} \left(\frac{\pi \cdot 287,085 \cdot 293}{2} \right)^{0,5} = 6,71 \text{ m}$$

Da der Innendurchmesser des Reaktors 694 mm beträgt und der zweite Wärmetauscher (Durchmesser von 70 mm) genau mittig positioniert ist, erhält man damit die größte charakteristische Länge von 0,312 m.

$$s = \frac{694 \text{ mm}}{2} - \frac{70 \text{ mm}}{2} = 312 \text{ mm} = 0,312 \text{ m}$$

Knudsen-Zahl bestimmen:

$$Kn = \frac{L}{s} = \frac{6,71 \text{ m}}{0,312 \text{ m}} = 21,5$$

Da die Knudsen-Zahl mit einem Wert von 21,5 größer als Eins ist, handelt es sich um den Bereich der Restgaswärmeleitung, der sich nach Gleichung (1.7) berechnen lässt.

Der Isentropenkoeffizient (γ) ist aus der Thermodynamik bekannt und stellt das Verhältnis der „Wärmekapazität bei konstantem Druck (c_p) zur Wärmekapazität bei konstantem Volumen (c_v)“ (Wikipedia, 2015) dar. Obwohl der Isentropenkoeffizient temperaturabhängig

ist, wird mit einem Wert von $\gamma = 1,4$ (gilt für $T = 273,15$ K bei Normaldruck) gerechnet, da für den kryotechnischen Anwendungsfall kaum Literatur vorhanden ist.

Der Akkomodationsfaktor (F_a) lässt sich unter Berücksichtigung tabellierter Akkomodationskoeffizienten und der Flächen der Systemgrenzen nach Gleichung (1.6) ermitteln.

Aus Tab. 1 werden die passenden Akkomodationsfaktoren für Luft gewählt:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 \\ a_2 &= 0,85 \end{aligned}$$

Die Flächen lassen sich mithilfe der Durchmesser berechnen. Unter der Annahme, dass der Reaktor ein konzentrischer Zylinder ist, ergeben sich folgende Flächen (Indizes: 1: innen / 2: außen) aus den Durchmessern (D) und Höhen (H).

$$D_1 = 70 \text{ mm und } H_1 = 750 \text{ mm}$$

$$D_2 = 694 \text{ mm und } H_2 = 950 \text{ mm}$$

$$\rightarrow A_1 = 0,154 \text{ m}^2 \text{ und } A_2 = 2,07 \text{ m}^2$$

$$F_a = \left(\frac{1}{1} + \left(\frac{0,154}{2,07} \right) \cdot \left(\frac{1}{0,85} - 1 \right) \right)^{-1} = 0,987$$

Durch Einsetzen der Werte in Gleichung (1.7) ergibt sich folgende Restgaswärmeleitung:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \left(\frac{1,4 + 1}{1,4 - 1} \right) \cdot \left(\frac{287,085}{8 \cdot \pi \cdot 293} \right)^{0,5} \cdot 0,987 \cdot 0,001 \cdot 0,154 \cdot (293 - 128) \\ &= \mathbf{0,0297 \text{ W}} \end{aligned}$$

Mit diesem Ergebnis sei die Aussage von Timmerhaus unterstützt, welche behauptet, dass ab einem Vakuumlevel von 10^{-5} mbar die Restgaswärmeleitung vernachlässigbar ist (Timmerhaus, 2013). Deshalb wird auf die Berechnung der Restgaswärmeleitung bei den anderen Bauteilen verzichtet.

3. Strahlungsverluste der Nebenbauteile

Die Strahlungsverluste auf die Gasleitungen, Kupferlitzen und das Kamerasystem werden nach Gleichung 1.15 unter Zuhilfenahme von (1.16) berechnet. Diese Vereinfachung ist notwendig, da die genaue Position nicht bekannt ist. Der Emissionsgrad des Kamerasystems sowie der Gasleitungen beträgt nach „Kleiber-Infrared“ 0,4 für Edelstahl (Kleiberinfrared, 2015).

3.1 Kamerasystem

Die Geometrie des innenliegenden Kamerasystems (Abb. 42) stammt aus den CAD-Daten der Konstruktionsarbeit vom 28.06.14. Vereinfacht wird angenommen, dass sich die Kamera aus zwei Zylindern unterschiedlicher Durchmesser zusammensetzt. Zur Berechnung stehen folgende Werte zur Verfügung: $D_{\text{gro\ss}} = 69,5 \text{ mm}$ // $L_{\text{gro\ss}} = 30 \text{ mm}$ // $D_{\text{klein}} = 40 \text{ mm}$ // $L_{\text{klein}} = 10,5 \text{ mm}$ // Umgebungstemperatur $T_1 = 293 \text{ K}$ // mittlere Temperatur des zweiten Wärmetauschers (und somit der Kamera) $T_2 = 203 \text{ K}$

Ein Wärmeverlust von **1,011 W** ist das Ergebnis einer Berechnung nach Gleichung (1.15).

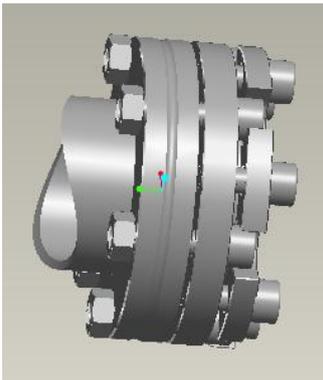


Abbildung 42: Kamerasystem innen (nach Konstruktionsbericht, 2014)

3.2 Kupferlitzen

In Absprache mit Herrn Daniel Schwinghammer kommen voraussichtlich acht Kupferlitzen in Einsatz, die eine maximale Länge von 350 mm und einen Durchmesser von 18,4 mm haben. Da die Litzen direkt an die Wärmeübertragungsplatte geschraubt sind, kann ihre Temperatur mit 113 K angenommen werden. Der Emissionsgrad von Kupfer stammt aus dem VDI Wärmeatlas und beträgt für angelaufenes Kupfer 0,037 (VDI, 1994). Es ergeben sich für acht Kupferlitzen Strahlungsverluste von **2,44 W**.

3.3 Gasleitungen

Alle relevanten Daten der Gasleitungen wurden aus den CAD-Modellen der Konstruktionsarbeit vom 28.06.14 entnommen. Der Durchmesser beträgt 15 mm, die Leitung vom ersten zum zweiten Wärmetauscher eine Länge von 1100 mm sowie die Gasleitung vom zweiten Wärmetauscher zur Verflüssigungseinheit eine Länge von 500 mm. Folglich sind die Temperaturen unterschiedlich, sodass sich für die längere Leitung eine mittlere Temperatur von 193 K und für die kürzere 123 K ergibt. Die Summe der Verlustleistungen für beide Gasleitungen beträgt ca. **11,12 W**.

Die Berechnung der Strahlungsverluste von Kupferlitzen und Gasleitungen erfolgt durch Anwendung der Gleichungen 1.15 / 1.16.

4. Strahlungsverluste unter Berücksichtigung wechselseitiger Reflexionen

4.1 Theoretische Vorgehensweisen

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, lässt sich die Verlustleistung auf den Kaltkopf sowie die Wärmeübertragungsplatte unter Berücksichtigung wechselseitiger Reflexionen nach Gleichung (1.19) berechnen.

Da weder die Winkel ($\beta_{1/2}$), noch die Verbindungslinie (s) von den Flächenelementen abhängig sind, wird Gleichung (1.20) wie folgt umformuliert:

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \cdot \frac{\cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2)}{s^2} \cdot A_1 \cdot A_2 \quad (5.2)$$

Die Ermittlung der Verbindungslinie und mit der Flächennormale der Flächenelemente (FE) eingeschlossenen Winkel erfolgt unter Zuhilfenahme eines vereinfachten CAD-Modells. Die Grundplatte wurde mit quadratischen FE einer Kantenlänge von 10 mm nachgebildet. Vertiefungen, die der Durchführung diverser Geräte wie der Kältemaschine oder der Vakuumpumpe dienen, sind im Modell nicht berücksichtigt. Der Kaltkopf, der aus zwei Teilen unterschiedlicher Durchmesser besteht, ist, wie in Abb. 3 ersichtlich, durch zwei 16-Ecke annähernd modelliert. Die Höhe eines FE beträgt 10 mm. Abb. 43 zeigt die durch Flächenelemente angenäherte Grundplatte sowie den Kaltkopf mit Wärmeübertragungsplatte.

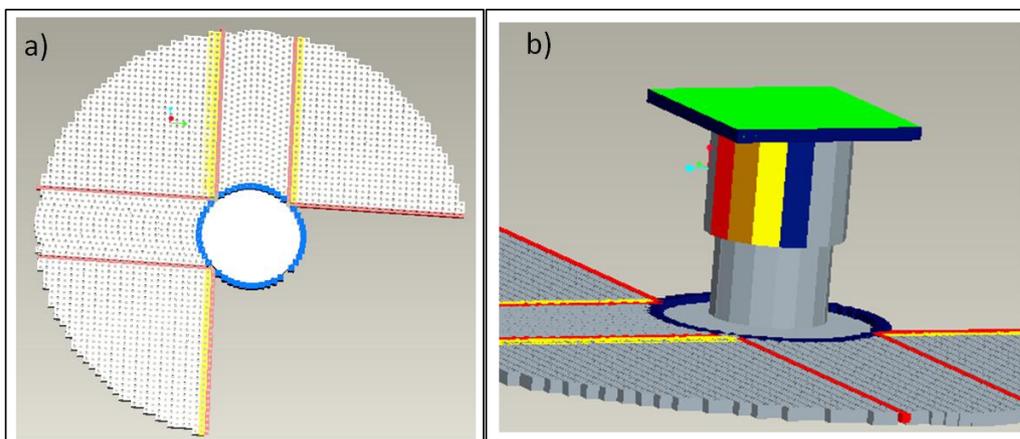


Abbildung 43: a) Grundplatte b) Kaltkopf inklusive Wärmeübertragungsplatte (eigene Anfertigung)

Die eingefärbten FE dienen lediglich der Orientierung während des Rechenprozesses. Wie Abb. 43 erkennen lässt, ist nicht die gesamte Grundplatte für die Berechnung nötig. Aufgrund der Anordnung der FE um den Kaltkopf (in Abb. 43: blauer Ring), werden nur die Verlustleistungen für zwei Streifen des Kaltkopfs (in Abb. 43: blau und gelb) berechnet. Durch Multiplikation mit dem Faktor 8 sind die Strahlungsverluste des gesamten Kaltkopfs zu berechnen.

Da nicht alle FE der Grundplatte die FE des Kaltkopfs bestrahlen, ist anhand einer in das Modell eingefügten Ebene die Anzahl der relevanten FE zu bestimmen (vgl. Abb. 44).

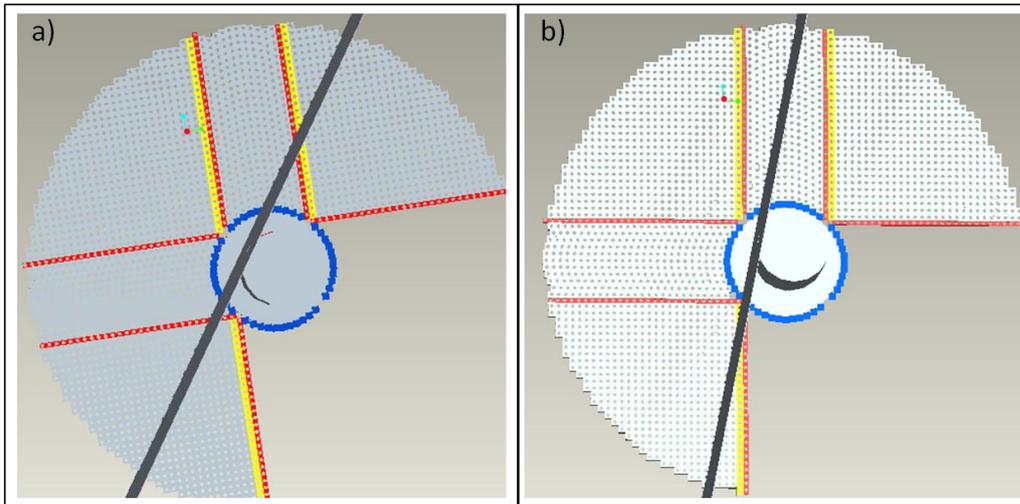


Abbildung 44: eingefügte Ebene zur Bestimmung der bestrahlenden FE

a) für gelbe FE des Kaltkopfs / b) für blaue FE des Kaltkopfs (eigene Anfertigung)

Flächenelemente, die von der Ebene rechts gesehen liegen, sind für die weiteren Berechnungen uninteressant.

Die Grundidee zur Bestimmung der Verlustleistung ist die wechselseitige Reflexion jeweils zweier FE und anschließender Addition. An dieser Stelle sei ein kleines Gedankenexperiment zum leichteren Verständnis eingeführt:

Stellen Sie sich vor, die Grundplatte besteht aus 9 und der Kaltkopf aus 1 Flächenelement(en). Sie erhalten von jedem der 9 FE einen Wärmestrom zum FE des Kaltkopfs und umgekehrt von dem einzelnen FE zu den anderen 9, da jedes System einer Temperatur höher Null Kelvin thermische Strahlung aussendet. Die Differenz dieser wechselseitigen Wärmeströme lässt sich mit Gleichung (1.19) berechnen. Die gesamte Verlustleistung wird dann durch Addition der einzelnen Wärmeströme berechnet.

Das Grundprinzip dieser Überlegung ist auf das komplette Modell zu übertragen.

Zu Beginn seien die Maße des Kaltkopfs in Abb. 45 gegeben, da diese im weiteren Verlauf benötigt werden. Alle Angaben sind in mm.

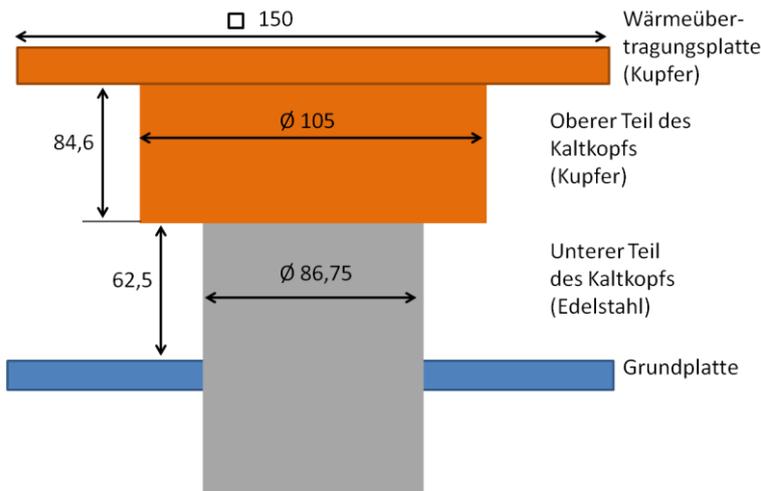


Abbildung 45: Technische Daten des Kaltkopfs (eigene Anfertigung nach Konstruktionsbericht, 2014)

Die Verbindungslinien der FE lassen sich durch Messen bestimmen. Diese Methode ist aber sehr zeitintensiv, da es mehrere tausend Werte sind, die bei einer Änderung der Höhe des Kaltkopfs nutzlos sind. Es gilt deshalb die Ermittlung parameterabhängig zu gestalten. Dazu wird eine neue Variable (c-Wert) eingeführt, die den Abstand eines FE der Grundplatte zum FE des Kaltkopfs in einer zweidimensionalen Ebene darstellt (rosa Linie in Abb. 46).

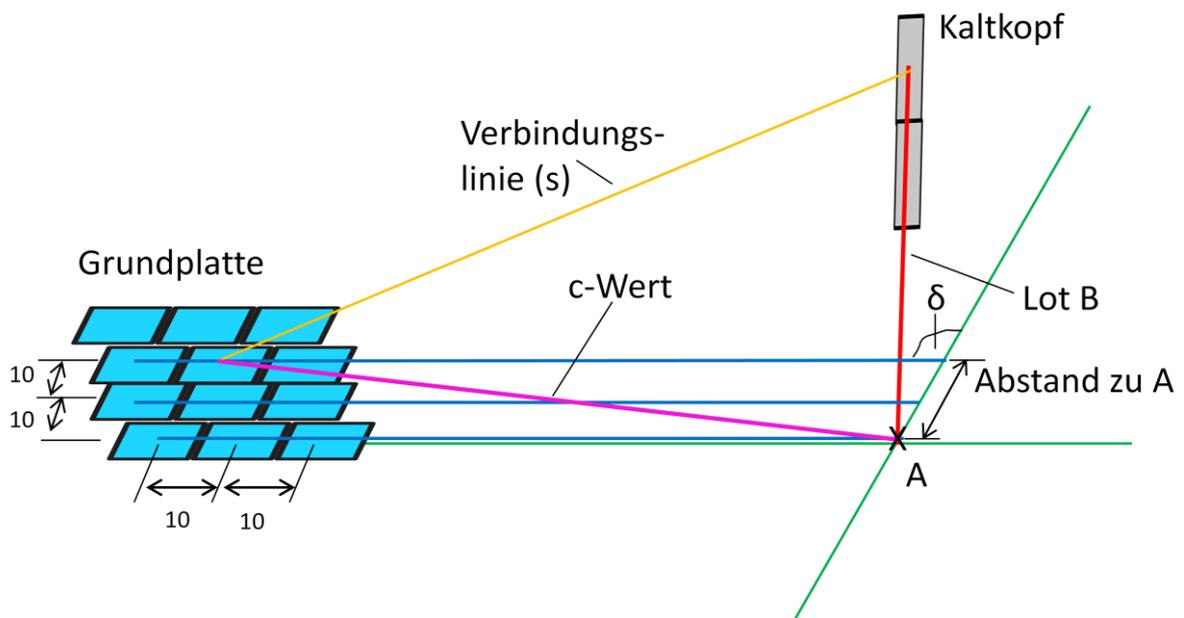


Abbildung 46 : Schematischer Zusammenhang der Verbindungslinie mit dem c-Wert (eigene Anfertigung)

Zunächst wird ein Lot der FE des Kaltkopfs auf die Ebene, dargestellt durch die grünen Achsen, gefällt. Wichtig dabei ist, dass die diagonale, grüne Achse durch den Schnittpunkt (A) des Lots B mit der zweidimensionalen Ebene verläuft und parallel zu den FE der Grundplatte ist. Die Abstände der FE der Grundplatte zur diagonalen Achse (im Bild blaue Linie; in Berechnungsdatei „senkrecht“), die Abstände der daraus resultierenden Schnittpunkte mit dem Punkt A (im Bild „Abstand zu A“, in Berechnungsdatei „abstand“) sowie die davon eingeschlossenen Winkel (δ) werden für alle äußersten FE manuell gemessen. Die c-Werte ergeben sich dann mithilfe des Kosinussatzes aus den gemessenen Werten. Diese Vorgehensweise mag im ersten Moment aufwendiger erscheinen als die

direkte Messung der Verbindungslinien. Allerdings ist die Kantenlänge eines FE bekannt, sodass die dahinterliegenden c-Werte schnell berechnet werden können. Unter Zuhilfenahme des Satz von Pythagoras ist die Ermittlung der Verbindungslinie (s) mithilfe der c-Werte und des Lots B, das der Höhe des FE des Kaltkopfs entspricht, möglich. Durch Variation des Betrags des Lots lassen sich die Verbindungen zu allen FE des Kaltkopfs herstellen.

Dieser Prozess wird vom Grundprinzip für alle Bauteile angewendet (oberer und unterer Teil des Kaltkopfs sowie Unterseite und Seitenflächen der Wärmeübertragungsplatte). Anschließend sind die Strahlungsverluste der Glocke auf diese Bauteile zu ermitteln.

Zur Bestimmung der Verbindungslinien der FE der Glocke zu den FE des Kaltkopfs bzw. der Wärmeübertragungsplatte werden die bereits vorhandenen c-Werte aus vorausgehenden Berechnungen verwendet. Dabei sind lediglich die Werte der äußersten FE der Grundplatte von Interesse. Da sich die Glocken-FE nicht mehr in der zweidimensionalen Ebene befinden, berechnet sich die Verbindungslinie (s) mit den c-Werten und dem Höhenunterschied zweier FE (siehe Abb. 47).

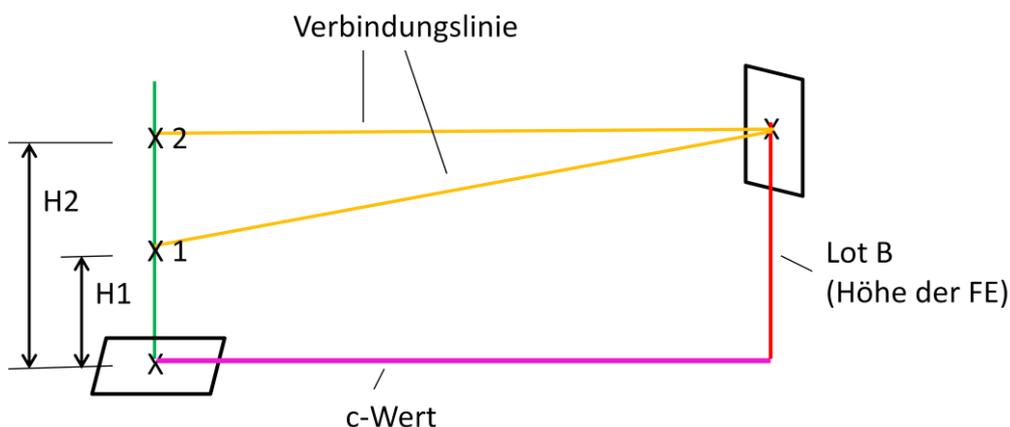


Abbildung 47: Verbindungslinie Glocke – Kaltkopf (eigene Anfertigung)

Beispielrechnung:

Für das erste Flächenelement der Glocke (Höhe H1) ergibt sich eine Verbindungslinie von:

$$s = \sqrt{c^2 + (B - H1)^2}$$

Für das zweite gilt wie folgt:

$$s = \sqrt{c^2 + (B - H2)^2}$$

Dieser Vorgang ist bis zum letzten FE bei einer Höhe von X mm durchzuführen (unterer Teil des Kaltkopfs X = 65, oberer Teil des Kaltkopfs X = 145). Es muss beachtet werden, dass die Höhe H1 des ersten FE der Glocke nur 5 mm beträgt, da immer zur Mitte eines Elements gemessen wird und die Kantenlänge 10 mm ist. Somit ergeben sich die nächsten Höhen durch Addition des zehnfachen Positionsfaktors (z.B. Zweites FE der Glocke hat einen

Positionsfaktor von $\underline{2}-1=1 \rightarrow$ Höhe $H_2= 5+10 = 15$ // Drittes FE der Glocke hat einen Positionsfaktor von $\underline{3}-1=2 \rightarrow$ Höhe $H_3 = 25$).

Abschließend werden noch die Verbindungslinien zwischen den FE der Glocke und den FE der Wärmeübertragungsplatte (WÜP) benötigt. Die FE der Platte bilden von der Größe eine Ausnahme im gesamten Modell, da die Kantenlänge 75 mm beträgt. Dadurch kann die quadratische WÜP in vier und die Glocke aufgrund ihrer Symmetrie in acht identische Bereiche geteilt werden (vgl. Abb. 48). Resultierend muss nur 1/32 der Verlustleistung berechnet werden.

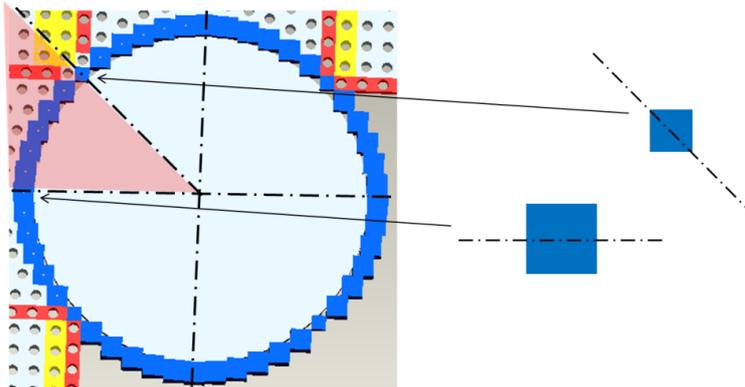


Abbildung 48: Aufteilung der Grundplatte (eigene Anfertigung)

Wie aus Abb. 48 außerdem ersichtlich, werden die äußeren FE halbiert. Da allerdings die komplette Fläche in die Berechnungen einfließt, darf nur der halbe Wärmestrom dieser FE im Gesamtergebnis berücksichtigt werden.

Die Verteilung der FE um den Kaltkopf (Abb. 48 blauer Ring) ist bewusst so gewählt worden, da ein Kreis sehr gut angenähert ist. Einziger Nachteil dieser Anordnung ist, dass in den Winkelhalbierenden FE einer Kantenlänge kleiner als 10 mm nötig sind, die in den Berechnungen selbstverständlich beachtet wurden.

Eine Ausnahme der Berechnungsart bildet die Strahlungsleistung des Deckels. Unter Annahme der Klörperboden sei eine flache Scheibe, erfolgt die Berechnung der wechselseitigen Strahlungsleistung mithilfe des untenstehenden Sonderfalls (Abb. 49).

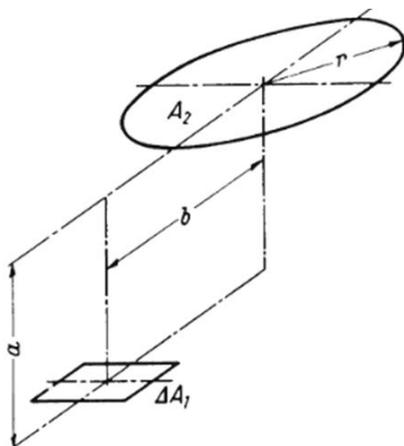


Abbildung 49: Kreisfläche, deren Mittelsenkrechte durch das FE geht (nach VDI, 1994)

Bei Anwendung des in Abb. 49 beschriebenen Falls, ergibt sich eine Verlustleistung von **0,0219 W**. Dazu müssen neben dem Radius der Kreisfläche und der Fläche des FE, noch der Abstand zum FE sowie der Abstand beider Mittelachsen gegeben sein. Aus dem Berechnungsmodell seien somit folgende Werte definiert:

Achsenabstand $b = 0$

Höhenunterschied $a = 793,3$ mm

Radius Deckel $r = 347$ mm

Fläche FE $dA = 22500$ mm²

Wie bei anderen Berechnungen gilt hier weiterhin:

$\varepsilon_2 = 0,4$ (kleiberinfrared, 2015) // $\varepsilon_1 = 0,037$ (VDI, 1994) // $T_2 = 293$ K // $T_1 = 113$ K

Die Einstrahlzahlen sind für diesen Sonderfall nach Gleichung 5.3 zu berechnen.

$$\varphi_{12} = 0,5 - \frac{1 + B^2 - R^2}{2 \cdot \sqrt{B^4 + 2 \cdot B^2 \cdot (1 - R^2) + (1 + R^2)^2}} \quad (5.3)$$

Die Variablen B und R werden wie folgt definiert:

$$B = \frac{b}{a} = \frac{0}{793,3} = 0$$

$$R = \frac{r}{a} = \frac{347}{793,3} = 0,437$$

Durch Einsetzen der Werte ergibt sich eine Einstrahlzahl (φ_{12}) von 0,161 und der reziproke Zusammenhang liefert ein φ_{21} von 0,00955.

Resultierend der Wärmeverlust nach Gleichung (1.19):

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{12} \cdot A_1}{1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot \varphi_{12} \cdot \varphi_{21}} \cdot (T_1^4 - T_2^4) = \mathbf{0,0219W}$$

4.2 Berechnung der Strahlungsverluste

Unter Anwendung der in 4.1 detaillierten Berechnungsverfahren ergeben sich folgende Verlustleistungen. Der im Berechnungsprogramm verwendete Emissionsgrad beträgt für die elektropolierte Grundplatte 0,16. Dieser Wert bezieht sich nach „kleiberinfrared“ auf einen polierten Edelstahl, da keine passenden Werte zu elektropolierten Stählen zu finden sind. Zum Vergleich werden neben den Verlustleistungen aus wechselseitiger Strahlung die Strahlungsverluste ohne wechselseitige Reflexion tabelliert (Tab. 16). Diese lassen sich nach Gleichung 1.16 in Abhängigkeit der Flächen und Emissionsgrade berechnen.

Im Anhang befindet sich jeweils ein Berechnungsbeispiel für den Fall der flächenabhängigen Strahlung sowie für die Verlustleistung unter Berücksichtigung wechselseitiger Reflexionen.

Tabelle 16: Verlustleistungen des Kaltkopfs

Herkunft	Wechselseitige Reflexionen [W]	ohne wechselseitige Reflexionen [W] (flächenabhängig)
<u>Unterer Teil des Kaltkopfs</u>		
Grundplatte	0,183	2,54
Glocke	0,021	2,77
<u>Oberer Teil des Kaltkopfs</u>		
Grundplatte	0,029	0,416
Glocke	0,01	0,422
Summe	0,243	6,148

Tab. 16 zeigt die Strahlungsverluste auf den Kaltkopf. Die Leistungen auf den unteren Teil des Kaltkopfs sind deutlich höher. Das liegt daran, dass die Obermaterialien der beiden Teile verschieden sind und sich damit die Emissionsgrade unterscheiden. Aus dem Datenblatt der Kältemaschine (siehe Anhang 7) ist für den oberen Bereich Kupfer und für den unteren Bereich Edelstahl als Material verwendet worden.

Die in Tab. 17 aufgeführten Strahlungsverluste beziehen sich auf die WÜP.

Tabelle 17: Verlustleistungen der Wärmeübertragungsplatte

Herkunft	Wechselseitige Reflexionen [W]	ohne wechselseitige Reflexionen [W] (flächenabhängig)
Glocke	0,03	0,34
Deckel	0,0219	---
Grundplatte	0,021	0,297
Summe	0,0729	0,637

Die Unterschiede der verschiedenen Berechnungsmethoden sind in den Tab. 16 und 17 deutlich erkennbar, ebenso wie die geringen Strahlungsverluste der Bauteile aus Kupfer (oberer Teil des Kaltkopfs / WÜP). Nach Gleichung 1.16 erfolgt die Berechnung der Verluste ohne Berücksichtigung der wechselseitigen Reflexionen, wobei die Entfernung und die Strahlungswinkel (entspricht den Einstrahlzahlen) der zwei Systemgrenzen missachtet werden.

Weiterhin wurden die Verlustleistungen für den zweiten und dritten Wärmetauscher von Johannes Fischer sowie für die Vorkühlung von Jeronimo Aigner berechnet, die in den folgenden Tabellen (Tab. 18 bis 20) dargestellt sind.

Tabelle 18: Verlustleistungen der Vorkühlung

Herkunft	Verlustleistung [W]
Wärmeleitung und Konvektion	1,21
Strahlung	0,87
Summe	2,08

Tabelle 19: Verlustleistungen des zweiten Wärmetauschers

Herkunft	Verlustleistung [W]
Wärmeleitung	5,36
Strahlung	3,14
Summe	8,5

Tabelle 20: Verlustleistungen der Verflüssigungseinheit

Herkunft	Verlustleistung [W]
Strahlung	1,63
Wärmeleitung von der Grundplatte in den WT	2,25
Konvektion und Strahlung auf außen liegende Teile	18,29
Summe	22,17

Es ist deutlich erkennbar, dass die außerhalb des Reaktors liegenden Bauteile die größten Verlustleistungen verursachen. Diese Tatsache ist allerdings nicht überraschend, da das Hochvakuum im Inneren bereits eine gute Isolationsfähigkeit aufweist. Außen liegende Bauteile sind dem atmosphärischen Druck ausgesetzt, sodass Konvektion ein entscheidender Faktor ist. Wie im Kapitel *Überblick: Isolationsmöglichkeiten in der Kryotechnik* dargestellt, bieten in einer nicht evakuierten Umgebung lediglich Schäume bzw. Perlitschüttungen einen thermischen Schutz, sodass auch Wärmeleitung eine tragende Rolle spielt (vgl. Tab. 18, 19 sowie 1. *Verlustleistungen im Trockeneisaustragsystem*).

Die Addition aller Verlustleistungen ergibt eine Gesamtleistung von:

$$\dot{Q} = 0,47 \text{ W} + 13,8 \text{ W} + 0,39 \text{ W} + 1,011 \text{ W} + 2,44 \text{ W} + 11,12 \text{ W} + 0,0219 \text{ W} + 0,243 \text{ W} + 0,0729 \text{ W} + 8,5 \text{ W} + 22,17 \text{ W} + 2,08 = \mathbf{62,32 \text{ W}}$$

Davon sind folgende Verluste auf Strahlung im Reaktor zurückzuführen:

$$\dot{Q} = 1,011 \text{ W} + 2,44 \text{ W} + 11,12 \text{ W} + 0,0219 \text{ W} + 0,243 \text{ W} + 0,0729 \text{ W} + 3,14 \text{ W} + 1,63 \text{ W} + 0,87 \text{ W} = \mathbf{20,55 \text{ W}}$$

Die Differenz dieser beiden Verlustleistungen von **41,77 W** können mit den in dieser Arbeit beschriebenen Isolationsmöglichkeiten nicht weiter reduziert und müssen als gegeben angenommen werden. Verlustleistungen, verursacht durch thermische Strahlung sind mithilfe eines Strahlungsschilds bzw. einer MLI zu minimieren. Diese Einsparungen gilt es im nächsten Kapitel zu berechnen.

5. Berechnungen mit integrierter Isolation

5.1 Berechnung der Verlustleistung unter Anwendung von Strahlungsschilden

Die vorausgehenden Berechnungen lassen erkennen, dass 33 % der Verluste aus thermischer Strahlung stammen. Durch den Einsatz von Strahlungsschilden wird versucht, diese Verluste auf ein Minimum zu reduzieren. Nach Absprache mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Rödiger ist die Wärmeleistung mit integrierten Strahlungsschilden nach Gleichung 1.15 zu berechnen statt der aufwendigen Berechnung mithilfe eines neuen Modells. Mit Gleichung 2.3 erfolgt die Ermittlung des Emissionsfaktors, der in die Strahlungsformel nach Stefan-Boltzmann 1.15 für den Emissionsgrad (ϵ) einzusetzen ist.

Zur Berechnung sind folgende Werte gegeben:

$\epsilon_{\text{Kupfer}} = 0,037$ // $\epsilon_{\text{Edelstahl}} = 0,4$ // $\epsilon_{\text{Strahlungsschild}} = 0,04$ (poliertes Aluminium nach Kuchling) // $\epsilon_{\text{Grundplatte}} = 0,16$ // $\epsilon_{\text{Alufolie}} = 0,049$ // $T_w = 293 \text{ K}$ // $T_K = 113 \text{ K}$ // Die Fläche A ist je nach Bauteil angepasst: $A_{\text{KKO}} = 0,0279 \text{ m}^2$, $A_{\text{KKU}} = 0,017 \text{ m}^2$, $A_{\text{WÜP(unten/Seite)}} = 0,0198 \text{ m}^2$, $A_{\text{WÜP(oben)}} = 0,0225 \text{ m}^2$, $A_{\text{Kamera}} = 7,87 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, $A_{\text{Gasleitung,lang}} = 0,0518 \text{ m}^2$, $A_{\text{Gasleitung,kurz}} = 0,0236 \text{ m}^2$, $A_{\text{Cu-Litzen}} = 0,0202 \text{ m}^2$, $A_{\text{WT2}} = 0,154 \text{ m}^2$, $A_{\text{WT3}} = 0,081 \text{ m}^2$, $A_{\text{WT1}} = 0,0506 \text{ m}^2$

Exemplarisch sei an dieser Stelle der Emissionsfaktor der Grundplatte und des unteren Teils des Kaltkopfs bei Verwendung von 3 Strahlungsschilden gegeben:

$$F_E = \left(\left(\frac{1}{0,4} + \frac{1}{0,04} - 1 \right) + (3 - 1) \left(\frac{2}{0,04} - 1 \right) + \left(\frac{1}{0,16} + \frac{1}{0,04} - 1 \right) \right)^{-1} = 6,46 \cdot 10^{-3}$$

Da diese Formel für parallele Flächen gleicher Größen gilt und deshalb das Verhältnis der kälteren zur wärmeren Fläche nicht beachtet wird, wird die Verbesserung durch die Strahlungsschilde prozentual vom flächenunabhängigen Wärmeverlust berechnet und so auf den flächenabhängigen Wert übertragen.

Die Anzahl der Strahlungsschilde und ihre Auswirkungen auf den Wärmestrom sind in den folgenden Tabellen (Tab. 21 – Tab. 23) dargestellt. Die Variation der Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der Strahlungsschilde befindet sich im Anhang.

Tabelle 21: Verlustleistungen abhängig von der Anzahl (N) der Strahlungsschilde (Teil 1). Angaben in Watt

N	GP-KKU	GP-KKO	GP-WÜP	Glocke -KKU	Glocke -KKO	Glocke -WÜP
0	0,896	0,353	0,251	1,737	0,4	0,322
1	0,122	0,14	0,1	0,131	0,147	0,119
2	0,066	0,088	0,062	0,068	0,09	0,073
3	0,045	0,064	0,045	0,046	0,065	0,052

Abkürzungen: GP: Grundplatte, KKU/O: Kaltkopf unten/oben, WÜP: Wärmeübertragungsplatte

Tabelle 22: Verlustleistungen abhängig von der Anzahl (N) der Strahlungsschilde (Teil 2). Angaben in Watt

N	KS [W]	GLL [W]	GLK [W]	KL (acht) [W]
0	0,63	4,39	2,39	2,32
1	0,05	0,33	0,18	0,8
2	0,02	0,14	0,09	0,56
3	0,017	0,12	0,06	0,4

Abkürzungen: KS: Kamerasystem, GLL: Gasleitung lang, GLK: Gasleitung kurz, KL: Kupferlitzen

Tabelle 23: Verlustleistungen abhängig von der Anzahl (N) der Strahlungsschilde (Teil 3). Angaben in Watt

N	WT1	WT2	WT3
0	0,62	2,21	1,51
1	0,23	0,81	0,47
2	0,14	0,5	0,28
3	0,1	0,36	0,2

Abkürzungen: WT 1-3: Wärmetauscher 1-3

Die Wärmeverluste in Tab. 23 liefert Gleichung 1.15 für die jeweils mittlere Temperatur. Die in den Tab. 18 bis 20 tabellierten Werte entsprechen den tatsächlich berechneten Werten der Auslegungsprogramme (z.B. AUWÄ).

Die prozentuale Verbesserung bei Erhöhung der Schildanzahl um jeweils Eins ist in den nächsten Tabellen (Tab. 24 - 26) dargestellt.

Tabelle 24: Verbesserung der Isolationsperformanz (Teil 1)

In %	GP- KKU	GP- KKO	GP- WÜP	Glocke -KKU	Glocke -KKO	Glocke -WÜP
1/0	14	40	40	8	37	37
2/1	7	25	25	4	23	23
3/2	5	18	18	3	16	16

Tabelle 25: Verbesserung der Isolationsperformanz (Teil 2)

In %	KS	GLL	GLK	KL
1/0	8	8	8	37
2/1	3	4	4	23
3/2	3	3	3	16

Tabelle 26: Verbesserung der Isolationsperformanz (Teil 3)

In %	WT1	WT2	WT3
1/0	37	37	31
2/1	23	23	19
3/2	16	16	13

Der Aufbau dieser Tabellen sei durch folgendes Beispiel erläutert:

Der Wärmeverlust von der Grundplatte zum unteren Teil des Kaltkopfs (GP-KKU) beträgt beim Einsatz eines Strahlungsschildes nur noch 14 % des Verlusts, der auftritt, wenn kein Strahlungsschild benutzt wird. Beim Einsatz zweier Strahlungsschilde, beträgt der Wärmestrom nur noch 7 % des ursprünglichen Werts.

Durch Übertragung der prozentualen Verbesserungen auf die jeweiligen Wärmeverluste, die mithilfe des Modells sowie vereinfacht nach Stefan-Boltzmann berechnet wurden, folgen die Reduzierungen der verschiedenen Bauteile (vgl. Tab. 27 - 30).

Tabelle 27: Reduzierung der Wärmeverluste der WÜP. Angaben in Watt

Herkunft	Wechselseitige Reflexionen	N=1	N=2	N=3
Glocke	0,03	0,011	0,007	0,005
Deckel	0,0219	0,008	0,005	0,004
Grundplatte	0,021	0,008	0,005	0,004
Summe	0,0729	0,027	0,017	0,013

Tabelle 28: Reduzierungen der Wärmeverluste des Kaltkopfs. Angaben in Watt

Herkunft	Wechselseitige Reflexionen	N=1	N=2	N=3
<u>Unterer Teil des Kaltkopfs</u>				
Grundplatte	0,183	0,026	0,013	0,009
Glocke	0,021	0,002	0,001	0,001
<u>Oberer Teil des Kaltkopfs</u>				
Grundplatte	0,029	0,012	0,007	0,005
Glocke	0,01	0,004	0,002	0,002
Summe	0,243	0,044	0,023	0,017

Tabelle 29: Reduzierungen der Wärmeverluste der Nebenbauteile. Angaben in Watt

Herkunft	Wärmeverlust nach Boltzmann	N=1	N=2	N=3
Kupferlitzen	2,44	0,9	0,56	0,39
Kamerasystem	1,01	0,08	0,03	0,03
Gasleitung lang	6,95	0,56	0,28	0,21
Gasleitung kurz	3,8	0,3	0,15	0,11
Summe	14,2	1,84	1,02	0,74

Tabelle 30: Reduzierungen der Wärmeverluste der Wärmetauscher. Angaben in Watt

Herkunft	Wärmeverlust	N=1	N=2	N=3
WT1	0,87	0,32	0,2	0,14
WT2	3,14	1,17	0,72	0,5
WT3	1,63	0,5	0,31	0,21
Summe	5,64	1,99	1,23	0,85

Die Verlustleistungen der Wärmetauscher sind mit dem Emissionsgrad von Aluminiumfolie (0,049) berechnet worden, da eine vollständige Umwicklung angenommen wurde.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Werden alle Bauteile innerhalb des Reaktors mit Strahlungsschilden umwickelt, verbessert sich die thermische Isolation deutlich, da der Großteil der Strahlung durch die Verbesserung des Emissionsgrades reflektiert wird. Die in den Tabellen dargestellten Reduzierungen deuten darauf hin, dass auch bei einem einzigen Strahlungsschild die Verlustleistung meist nur noch einen Bruchteil des ursprünglichen Werts beträgt. Folglich ist eine Abschirmung mit Strahlungsschilden zu empfehlen.

Da Formel (2.13) für parallele, gleichflächige Ebenen gilt, hier aber prozentual auf die Verluste verschiedenflächiger Bauteile zu schließen ist, ist ein gewisser Fehler der Berechnung naheliegend – die Strahlungsschilde haben in der Realität nicht die berechnete Effektivität. Es wird daher die Annahme getroffen, dass die Anzahl der installierten Schilde in der Realität die Verbesserung hervorruft, die theoretisch ein Strahlungsschild weniger bereits verursacht. Das heißt, beim Einsatz dreier Strahlungsschilde, entspricht der Wärmeverlust dem Wert bei $N = 2$.

Unter dieser Annahme ergibt sich im Folgenden die gesamte Verlustleistung, wenn drei Strahlungsschilde installiert werden.

$$\dot{Q} = 0,017 \text{ W} + 0,023 \text{ W} + 1,02 \text{ W} + 1,23 \text{ W} = \mathbf{2,29 \text{ W}}$$

Ein Vergleich der Verlustleistungen sowohl mit, als auch ohne Strahlungsschilde liefert eine Differenz von $20,55 \text{ W} - 2,29 \text{ W} = \mathbf{18,26 \text{ W}}$. Es werden durch eine einfache Isolation nahezu **89 %** der Strahlungsverluste reduziert.

Weitere Anmerkung:

Die Strahlungsverluste zwischen PCTFE-Körper und Kupferbehälter im Trockeneis-austragsystem sind mit **2,7 W** relativ hoch. Würde man die Innenseite des PCTFE-Körpers mit Aluminiumfolie ($\epsilon = 0,07$ für gewalztes Aluminium nach Kuchling, 2011) bedecken, betrüge die Verlustleistung **1,97 W** (gleiche Berechnung wie in 1.2 *Strahlungsverluste – Variation von ϵ*). Dabei sollte darauf geachtet werden, dass kein Kontakt zwischen den Systemgrenzen existiert, da sonst Wärmeleitung auftritt.

Die Behauptung, die am besten für den Biogasverflüssiger geeignete Isolation gefunden zu haben, ist damit gerechtfertigt. Der Großteil der Wärmeverluste wird durch den Einsatz einer Kombination aus einem Hochvakuum und Strahlungsschilden verhindert. Da metallisierte Folien (vermutlich Kondensatorfolie) zum Einsatz kommen, sind die Kosten gering und eine einfache (De-) Montage garantiert, da diese lediglich in mehreren Schichten um die Bauteile zu wickeln sind.

Es ist zu erwarten, dass die tatsächliche Verlustleistung etwas höher ist, als in dieser Arbeit berechnet wurde. Insbesondere die Berechnung der Strahlungsverluste bedarf einiger Annahmen, die zu einem leicht abweichenden Ergebnis führen.

Über eine gewisse Laufzeit (z.B. ein Monat) muss geprüft werden, ob die reflektierenden Schilde tatsächlich den erwünschten Nutzen mit sich bringen. Ist das der Fall, besteht die Möglichkeit die Effektivität der Isolation zu verbessern, indem Multi-Lagen-Isolation eingesetzt wird – so Herr Kevin Phelan, Spezialist auf dem Gebiet der Kryotechnik (E-Mail befindet sich im Anhang).

Zusammenfassung

Die hohen Temperaturunterschiede bei kryotechnischen Anwendungen erfordern eine gute thermische Isolation, um die Wärmeverluste zu minimieren. Je nach Anforderung der Applikation gibt es viele Isolationsmöglichkeiten, die sich in ihrer Isolierfähigkeit und Faktoren wie Aussehen, Kosten und Eignung unterscheiden. Prinzipiell lassen sich die Isolationsarten in die zwei Bereiche „evakuiert“ und „nicht evakuiert“ einteilen. Für Temperaturen zwischen 77 – 4 K sind evakuierte Isolationen unerlässlich, wohingegen bei Temperaturen zwischen 300 – 77 K eine Vakuumisolation empfohlen wird, aber nicht unbedingt notwendig ist (Atrey, 2014). Der wichtigste Parameter zur Beschreibung der Isolationsfähigkeit ist der sogenannte Wärmedurchgangskoeffizient k (auch U-Wert genannt). Je geringer dieser ist, desto besser die Isoliereigenschaften.

Es ist durchaus möglich sämtliche Anwendungen mit den bestmöglichen Materialien zu isolieren und so vernachlässigbare Wärmeverluste zu generieren. Da die Isolierfähigkeit allerdings mit den verursachten Kosten zunimmt, ist eine klare Definition der Anforderungen zu Beginn notwendig. Es gilt der Grundsatz „*So viel wie nötig, so wenig wie möglich*“.

Die Effektivität einfacher, evakuiertes Isolationen konnte anhand ausführlicher Berechnung nachgewiesen werden.

Literaturverzeichnis

Allen M.S., Augustynowicz S.D., Fesmire J.E, et. al. 2003. Cryogenic Engineering Conference. 1 – 7

Atrey M. 2014. Cryogenic Insulation (Online Vorlesung).
https://www.youtube.com/watch?v=2_MIGplFQX8. Abgerufen am 18.11.2014
https://www.youtube.com/watch?v=2PVnn3_w3MQ. Abgerufen am 18.11.2014
<https://www.youtube.com/watch?v=RbBXiMpDDTY>. Abgerufen am 19.11.2014

Barron R. 1985. Cryogenic Systems. 385 – 458

Calciumsilicat. 2015. Artikel. <http://de.wikipedia.org/wiki/Calciumsilicat>. Abgerufen am 23.02.2015

Emissionsgrade. 2014.
<http://www.kleiberinfrared.de/index.php/de/amanwendungen/emissionsgrade.html>.
Abgerufen am 27.12.2014

Flynn T. 2009. Cryogenic Engineering, Second Edition Revised and Expanded. 445 – 535

Fricke J. 1986. Aerogels. 2 – 6

Hochschule Landshut, 2015. <https://www.haw-landshut.de/die-hochschule/technologiezentrum-energie/forschungsfelder/projekte.html>. Abgerufen am 24.02.2015

James Dewar. 2015. Artikel. http://de.wikipedia.org/wiki/James_Dewar. Abgerufen am 25.02.2015

Kaganer M. 1969. Thermal Insulation in Cryogenic Engineering. 142 – 143

Kalia S. 2013. Polymers at Cryogenic Temperatures. 204 – 212

Knudsen-Zahl. 2015. Artikel. <http://de.wikipedia.org/wiki/Knudsen-Zahl>. Abgerufen am 14.02.2015

Konstruktionsbericht. 2014. Konstruktionsarbeit Wärmeübertragung, Hochschule Landshut Sommersemester 2014

Kryotechnik. 2015. Artikel. <http://de.wikipedia.org/wiki/Kryotechnik>. Abgerufen am 12.02.2015

Kuchling H. 2011. Taschenbuch der Physik. 648 - 649

Lehmann W. Jahr unbekannt. Artikel. Thermische Isolation

MPET. 2015. Artikel.

http://de.wikipedia.org/wiki/Polyethylenterephthalat#Metallisiertes_Polyethylenterephthalat_.28MPET.29. Abgerufen am 17.02.2015

MTM. 2014. Artikel.

http://mtminc.com/reduce_project_risk/multilayer_insulation_installation_avoid/.
Abgerufen am 10.12.2014

Nachtmann K. 2012. Verflüssigung und Speicherung von Biomethan durch das Tieftemperatur- Desublimationsverfahren: Analyse einer neuen Methode zur Herstellung von Flüssigerdgas aus Biogas

NASA. 2014. Artikel Aerogel. http://spinoff.nasa.gov/Spinoff2010/cg_2.htm. Abgerufen am 15.11.2014

Neumann H. 2009. Präsentation. Thermal Insulation.

Pentan-Substitution. 2014. Artikel. http://www.fapu.de/artikel-article.articleid-1718-Artikel-Optimierung_von_Pentan_ge.htm. Abgerufen am 13.10.2014

Perlite Institute. 2014. Artikel. <https://perlite.org/index.html>. Abgerufen am 23.11.2014

Polifke W. 2005. Wärmeübertragung – Grundlagen, analytische und numerische Methoden. 21 – 185

Rödiger T. 2013. Vorlesungsunterlagen Wärmeübertragung Sommersemester 2013

Seime D. 1997. Biogasreinigung bei tiefen Temperaturen. 85

Timmerhaus K. 2013. Cryogenic Process Engineering. 384 – 500

Vakuum. 2015. Artikel. <http://de.wikipedia.org/wiki/Vakuum>. Abgerufen am 13.02.2015

Vakuumstufen. 2015. Artikel. <http://www.riegler.de/page/info-tabellen/vakuum.html>.
Abgerufen am 17.02.2015

VDI. 1994. VDI-Wärmeatlas.

VDI. 2013. VDI-Wärmeatlas.

Wärme. 2015. Definition. www.duden.de. Abgerufen am 12.02.2015

Wärmeleitfähigkeit. 2015. Artikel.

<http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit>. Abgerufen am 12.02.2015

Wärmeübergangskoeffizient. 2015. Artikel.

<http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rme%C3%BCbergangskoeffizient>. Abgerufen am 12.02.2015

Weinbrenner V. 2014. Vorlesungsunterlagen Konstruktion II Wintersemester 2014/2015

Wutz K.J. 2004. 363

Zhang X. 2012. Cryogenics Vol. 52. 810 – 815

Zhou Y. 1990. Cryogenics Vol. 30. 335 – 339

Bildquellen

Aerogel granular. 2015. <http://www.aerogel24.de/out/pictures/master/product/1/aerogel-roh.jpg>.
Abgerufen am 14.02.2015

Aspen aerogels. 2015. <http://www.aerogel.com/products-and-solutions/cryogel-z/>. Abgerufen am
14.02.2015

BBC. 2015.

http://ichef.bbci.co.uk/arts/yourpaintings/images/paintings/rin/large/wmrii_rin_riic_0050_large.jpg.
Abgerufen am 26.02.2015

Der Weg vom Vulkangestein zum Perlit. 2015. <http://www.perlite.net/perlite.jpg>. Abgerufen am
19.02.2015

Dewargefäß. 2015. <http://de.wikipedia.org/wiki/Dewargef%C3%A4%C3%9F>. Abgerufen am
16.02.2015

Elektromagnetisches Spektrum und sichtbares Licht. 2015. http://www.uni-duesseldorf.de/MathNat/Biologie/Didaktik/Fotosynthese_neu/dateien/licht/bilder/licht.jpg.
Abgerufen am 11.02.2015

MLI. 2015. http://de.wikipedia.org/wiki/Multilayer_Insulation. Abgerufen am 15.02.2015

Strömungsgrenzschicht. 2015. http://de.wikipedia.org/wiki/Fluidodynamische_Grenzschicht.
Abgerufen am 12.02.2015

Zelluläre Struktur eines Aerogels. 2015. <http://www.aerogel.org/wp-content/uploads/2009/03/stratoporouscarbonaerogels-mit3.jpg>. Abgerufen am 14.02.2015

Anhang

Anhang 1: Berechnung der Gewichtungen für das Stärkediagramm

technische Kriterien				
	k-Wert	Mechanische Belastung	Einsatztemp.	Gewicht
U-Wert		1	1	1
Mechanische Belastung	3		2	1
Einsatztemp.	3	2		1
Gewicht	3	3	3	
Summe	9	6	6	3
Gewichtung in %	37,5	25,0	25,0	12,5
wirtschaftliche Kriterien				
	Anschaffungskosten	Montageeinfachheit	Energiekosten	Wartungshäufigkeit
Anschaffungskosten		2	1	1
Montageeinfachheit	2		1	1
Energiekosten	3	3		2
Wartungshäufigkeit	3	3	2	
Summe	8	8	4	4
Gewichtung in %	33,3	33,3	16,7	16,7

Legende:
 3 = wichtiger als
 2 = genau so wichtig
 1 = unwichtiger als

Abbildung A1: Berechnung der Gewichtungen

Um die Gewichtung (in %) eines Kriteriums zu berechnen, sind jeweils die Werte der Abszisse mit den Werten der Ordinate zu vergleichen und zu entscheiden, welches dieser beiden wichtiger ist. Es wird wie in der Legende beschrieben, bewertet.

Beispiel: k-Wert ist wichtiger als mechanische Belastbarkeit → 3 Punkte

Die Gewichtung lässt sich berechnen, indem die Summe jedes Kriteriums durch die Summe aller Werte geteilt wird.

Beispiel: Gewichtung k-Wert = $9 / (9+6+6+3) = 0,375 = 37,5 \%$

Anhang 2: MLI-Installationsbeispiel der Firma Meyer Tools & MFG Inc., Illinois/USA

Gegeben sei ein einfacher Kessel (Abb. A2), der mit einer 15 lagigen MLI isoliert werden soll.

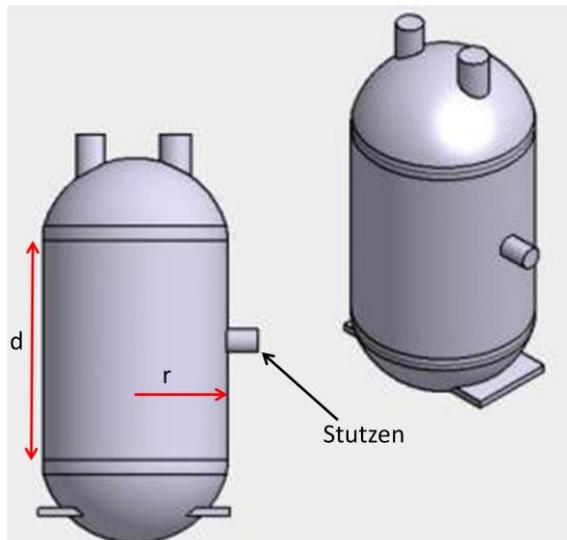


Abbildung A2: Kessel (modifiziert nach Meyer Tool)

1. Schritt:

Um den zylindrischen Teil wird ringsherum MLI mit einer Länge $L = 2r\pi + 2 \text{ Inch}^{14}$ gewickelt. Die Überlänge ist nötig, damit die Lagen überlappt werden können. Wird an der Position des Stutzens ein Kreuz in die MLI geschnitten, kann diese auf den Stutzen geschoben werden.

Das Überlappen wird zur übersichtlicheren Darstellung stichpunktartig erklärt:

- beim ersten Ende werden die obersten 10 Lagen abgeschält, sodass die unteren 5 direkt an den Kessel geklebt werden können (metallisiertes Mylar-Klebeband)
 - das zweite Ende wird um den Kessel gewickelt
 - die untersten 5 Lagen des zweiten Endes werden im Überlappbereich entfernt
 - die mittleren 5 Lagen des zweiten Endes werden überlappend mit den obersten 5 Lagen des ersten Endes verklebt
 - die oberen 5 Lagen des zweiten Endes sowie die mittleren 5 Lagen des ersten Endes werden entfernt
- jeweils 5 Lagen sind überlappt und verklebt

In Abb. A2 wird der Überlappbereich nach den genannten Hinweisen gezeigt.

¹⁴ 1 Inch = 25,4 mm

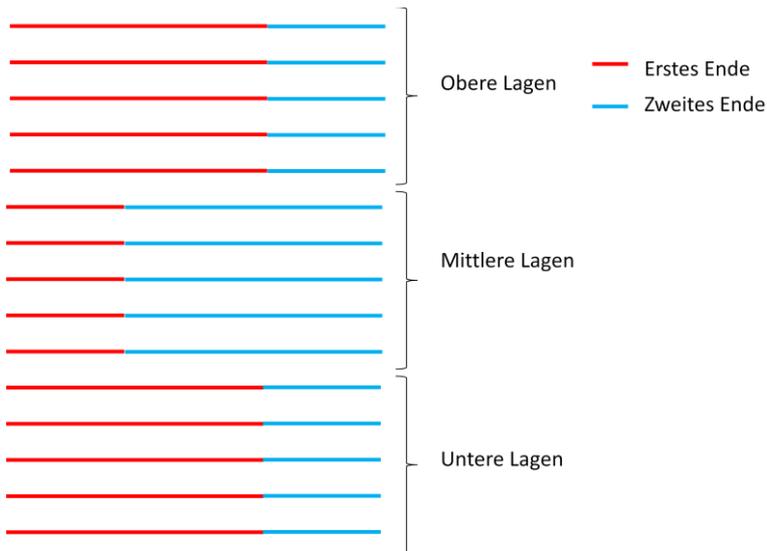


Abbildung A3: Überlappbereich (eigene Anfertigung)

2. Schritt:

Die Rohre auf der Deckelseite werden analog zum Stutzen mithilfe eines Querschnitts gewickelt. Für Boden und Deckel werden Mäntel mit einer Übergröße von mehr als 2 Inch gefertigt, damit bei Bedarf überschüssiges Material entfernt werden kann sowie zum Überlappen. Die Deckelseite kann aufgrund der Schwerkraft sukzessiv erst bearbeitet und dann überlappt werden. Am Boden muss in situ gearbeitet werden, d.h. es darf erst vor Ort geschnitten und überlappt werden.

Anhang 3: Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der Strahlungsschilde

Die tabellierten Emissionsfaktoren wurden nach Gleichung 2.3 berechnet. Der Emissionsgrad der Strahlungsschilde beträgt $\epsilon = 0,04$ (poliertes Aluminium nach Kuchling, 2011).

Tabelle A1: Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der Strahlungsschilde

N	P.E. → E.	P.E. → Cu	E. → Cu	E. → E.	E. → WT3
0	0,129	0,031	0,035	0,25	0,046
1	0,018	0,012	0,013	0,019	0,014
2	0,009	0,008	0,008	0,01	0,008
3	0,006	0,006	0,006	0,007	0,006

Abkürzungen:

P.E.: polierter Edelstahl mit $\epsilon = 0,16$

E.: Edelstahl mit $\epsilon = 0,4$

Cu: Kupfer mit $\epsilon = 0,037$

WT3: Wärmetauscher 3 (Methanverflüssiger) mit $\epsilon = 0,049$

In Tab. A2 ist eine Materialzuordnung zu den berechneten Bauteilen zu sehen. Abhängig vom Außenmaterial unterscheiden sich die Emissionsgrade. Die Strahlungsleistung ohne Isolation des dritten Wärmetauschers wurde mit einem Emissionsgrad von $\epsilon = 0,049$ berechnet. Dies entspricht einer Umwicklung mit Aluminiumfolie.

Tabelle A2: Emissionsgrade der Bauteile

Bauteil	Außenmaterial	Emissionsgrad ϵ
Grundplatte	Edelstahl poliert	0,16
Glocke	Edelstahl	0,4
Kaltkopf oben	Kupfer	0,037
Kaltkopf unten	Edelstahl	0,4
WÜP	Kupfer	0,037
Kamerasystem	Edelstahl	0,4
Kupferlitzen	Kupfer	0,037
Gasleitungen	Edelstahl	0,4
WT 1	Kupfer	0,037
WT 2	Kupfer	0,037
WT 3	Aluminium	0,049

Anhang 4: Berechnungsbeispiel – Strahlungsverluste ohne wechselseitige Reflexion

Grundplatte → Kalktkopf unterer Teil

Gegebene Variablen:

$\epsilon_{\text{Grundplatte}} = \epsilon_2 = 0,16$ // $\epsilon_{\text{Kalktkopf}} = \epsilon_1 = 0,4$ // Radius Grundplatte $R = 347$ mm // Durchmesser Kalktkopf unterer Teil $D = 86,75$ mm // Höhe Kalktkopf $H = 62,5$ mm // $T_{\text{Grundplatte}} = 293$ K // $T_{\text{Kalktkopf}} = 113$ K

Mit Gleichung 1.16 lässt sich der **flächenabhängige** Emissionsgrad berechnen, nachdem die Flächen ermittelt wurden. Die Fläche der Grundplatte reduziert sich um die Fläche des Kalktkopfs, da diese einen Teil verdeckt.

$$\text{Fläche Grundplatte: } A_2 = R^2 \cdot \pi - D^2 \cdot 0,25 \cdot \pi = (347\text{mm})^2 \cdot 3,14 - (86,75\text{mm})^2 \cdot 0,25 \cdot 3,14 = 0,372 \text{ m}^2$$

$$\text{Mantelfläche Kalktkopf: } A_1 = D \cdot \pi \cdot H = 86,75 \text{ mm} \cdot 3,14 \cdot 62,5 \text{ mm} = 0,017 \text{ m}^2$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{0,4} + \left(\frac{1}{0,16} - 1\right) \frac{0,017\text{m}^2}{0,372\text{m}^2}} = 0,365$$

Nach Gleichung 1.15 ergibt sich damit ein Wärmeverlust von,

$$\dot{Q} = 0,365 \cdot 0,017\text{m}^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \cdot ((293\text{K})^4 - (113\text{K})^4) = \mathbf{2,54 \text{ W}}$$

Anhang 5: Berechnungsbeispiel – Strahlungsverluste mit wechselseitigen Reflexionen

Grundplatte → Kalktkopf unterer Teil

Gegebene Variablen:

Senkrecht = 13,49 mm // Abstand = 59,44 mm // $\delta = 101,25^\circ$ // FE-Höhe (Kalktkopf) = 57,5 mm // $\epsilon_{\text{Grundplatte}} = \epsilon_2 = 0,16$ // $\epsilon_{\text{Kalktkopf}} = \epsilon_1 = 0,4$ // $T_{\text{Grundplatte}} = 293$ K // $T_{\text{Kalktkopf}} = 113$ K // $A_{\text{Kalktkopf}} = A_1 = 169,2$ mm² (wird ein Kreis mit dem Durchmesser von 86,75 mm durch ein 16-Eck angenähert, beträgt die Kantenlänge 16,92 mm // $A_{\text{Grundplatte}} = A_2 = 100$ mm²

Mithilfe des Kosinussatzes lässt sich zunächst der c-Wert berechnen:

$$c - \text{Wert} = \sqrt{(13,49\text{mm})^2 + (59,44\text{mm})^2 - 2 \cdot 13,49\text{mm} \cdot 59,44\text{mm} \cdot \cos(101,25)} \\ = 63,47 \text{ mm}$$

Daraus ergibt sich nach Pythagoras (vgl. Abb. A3) eine Verbindungslinie (s) von,

$$s = \sqrt{(63,47\text{mm})^2 + (57,5\text{mm})^2} = 85,64 \text{ mm}$$

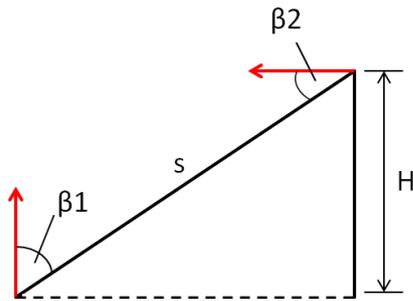


Abbildung A4: Geometrische Beziehungen

Die Winkel α und β lassen sich mit trigonometrischen Beziehungen berechnen.

$$\beta_1 = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{57,5\text{mm}}{85,64\text{mm}}\right) = 47,8^\circ$$

$$\beta_2 = 90^\circ - \beta_1 = 42,2^\circ$$

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi \cdot 169,2 \text{ mm}^2} \cdot \frac{\cos(47,8) \cdot \cos(42,2)}{(85,64\text{mm})^2} \cdot 100 \text{ mm}^2 \cdot 169,2 \text{ mm}^2 = 0,00216$$

Der reziproke Zusammenhang liefert:

$$\varphi_{21} = \frac{169,2 \text{ mm}^2}{100 \text{ mm}^2} \cdot 0,00216 = 0,00365$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot 0,4 \cdot 0,16 \cdot 0,00216 \cdot \left(\frac{169,2}{10^6} \text{m}^2\right)}{1 - (1 - 0,4) \cdot (1 - 0,16) \cdot 0,00216 \cdot 0,00365} \cdot ((293\text{K})^4 - (113\text{K})^4) =$$

$$= \mathbf{0,000009558 \text{ W}}$$

Diese Strahlungsleistung gilt für ein Flächenelement der Grundplatte in Kombination eines FE des Kaltkopfs. Die Summe der einzelnen Kombinationen ergibt die gesamte Verlustleistung.

Anhang 6: E-Mail Herr Phelan vom 15.10.2014

„Hallo Herr Jaufmann,

Wir brauchen erst mal gar nichts außer den Vakuum selber zur thermischen Isolation. Ein Paar Lagen Aluminium Folie werden aber nicht schaden. Haushaltsfolie ist nicht ganz ideal, wird aber völlig ausreichen. Falls Alu-Folie tatsächlich etwas bringt, können wir Multi-Lagen-Folie einsetzen. Mehr Aufwand wird eher schaden.

Viele Grüße,
Kevin Phelan“

Anhang 7: Datenträger

Auf dem beiliegenden Datenträger befinden sich alle Berechnungsprogramme und CAD-Daten zur Bestimmung der Strahlungsverluste wechselseitiger Reflexionen. Zusätzlich sind einige Datenblätter vorhanden.

Anhang 8: Multi-Lagen-Isolierung