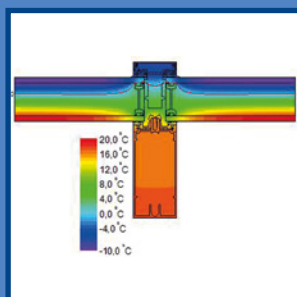
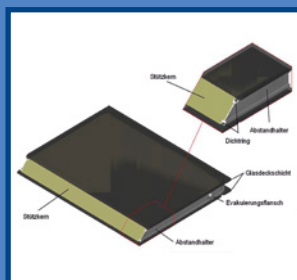
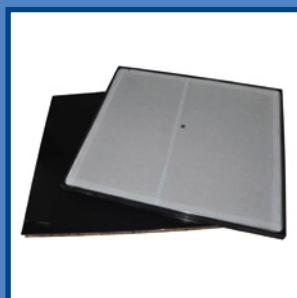


Tanja Skottke

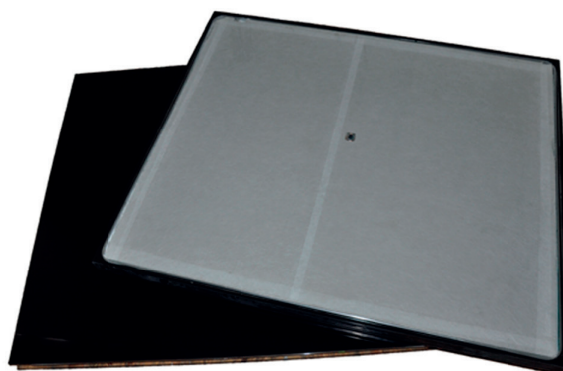
Vakuumdämmelemente mit Glasdeckschichten



BAUKONSTRUKTIONEN + BAUPHYSIK | BAND 4

Wolfgang M. Willems (Hrsg.), Tanja Skottke

Vakuumdämmelemente mit Glasdeckschichten



Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9906-1

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9907-8

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2017
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Fax 07 11 9 70-25 08
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de
URL www.baufachinformation.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Vorbemerkung und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2008 bis 2016 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung der Technischen Universität Dortmund.

Hier konnte ich neben der Tätigkeit in der Lehre meine Energie fast vollkommen in die Forschung und damit letztendlich auch meine Dissertation stecken.

Ich möchte an dieser Stelle all den Menschen danken, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Beginnen möchte ich mit meinem Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems, dem ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die Bereitschaft zur Diskussion und die wertvollen Ratschläge danken möchte.

In diesem Zusammenhang möchte ich auch dem Zweitgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schmidt und dem Vorsitzenden der Prüfungskommission Herrn Prof. Dr.-Ing. Mike Gralla danken.

Weiterhin möchte ich den Kollegen der TU Dortmund für die zugebrachten Arbeiten und die Toleranz in angespannten Zeiten danken. Dank gilt hier auch Herrn Dipl.-Ing. Christoph Rempe für seine Hilfe bei der Durchführung von Versuchen sowie seine unerschöpflichen Ideen.

Darüber hinaus gilt ein großer Dank meinen Eltern, meiner Schwester Vivien, meiner Freundin Rebecca und ganz besonders meinem Mann Christian und meiner Tochter Louisa, die mich in all den Jahren in jeglicher Hinsicht unterstützt und stets motiviert haben.

Dortmund, den 26. Dezember 2016

Tanja Skottke

Vakuumdämmelemente mit Glasdeckschichten

Von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dortmund genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Tanja Skottke

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mike Gralla

1. Gutachter: Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schmidt

Tag der Verteidigung: 24. August 2016

Dortmund 2016

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	IV
1. Einleitung und Ziel der Arbeit	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Ziel der Arbeit	3
2. Vacuum Insulated Glass Sandwich (VIGS)	5
2.1 Aufbau Vacuum Insulated Glass Sandwich	5
2.2 Evakuierungsflansch	20
2.3 Wärmeleitfähigkeit und thermische Optimierung des Randverbundes	24
2.3.1 Allgemein	24
2.3.2 Wärmeleitfähigkeit im ungestörten Bereich	24
2.3.3 Wärmeverluste im Randbereich	26
3. Grundlagen zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit eines VIGS	35
3.1 Allgemein	35
3.2 Gasströmung: Stofftransport durch Diskontinuitäten	36
3.2.1 Definition Gasströmung	36
3.2.2 Diskontinuitäten am VIGS	38
3.3 Permeation: Stofftransport durch den Festkörper	39
3.3.1 Definition Permeation	39
3.3.2 Permeation am VIGS	41
3.4 Ausgasverhalten von Werkstoffen	42
3.4.1 Definition Ausgasung	42
3.4.2 Gasabgabe im VIGS	42
3.5 Evakuierungseinrichtung und -Messtechnik	44
3.5.1 Drehschieberpumpe	44
3.5.2 Heliumleckdetektor	45
3.6 Messverfahren zur Bestimmung des Stofftransports durch die Hülle eines VIGS	46
3.6.1 Dichtheitsprüfung	46

3.6.2	<i>Messung des Stofftransports durch Diskontinuitäten</i>	48
3.6.3	<i>Messung des Stofftransports in Form von Permeation</i>	49
3.7	Dauerhaftigkeit von Vakuumdämmelementen	51
4.	Experimentelle Untersuchung zur Leckagerate an einem VIGS	55
4.1	Allgemein	55
4.2	Experimentelle Untersuchungen zum Stofftransport durch Diskontinuitäten bzw. Leckkanäle	57
4.2.1	<i>Versuchsaufbau und Durchführung</i>	57
4.2.2	<i>Stofftransport durch Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Abstandhalter“</i>	62
4.2.3	<i>Stofftransport durch Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Glas zu Dichtring“</i>	77
4.3	Experimentelle Untersuchung zum Stofftransport durch den Festkörper	87
4.3.1	<i>Versuchsaufbau und Durchführung</i>	87
4.3.2	<i>Stofftransport durch den Festkörper</i>	90
5.	Auswertung und Diskussion zur Gesamtleckagerate und Dauerhaftigkeit eines VIGS	96
5.1	Auswertung und Diskussion zu den Untersuchungsergebnissen einer Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen	96
5.1.1	<i>Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse</i>	96
5.1.2	<i>Bewertung der Einflussgrößen</i>	101
5.1.3	<i>Konsequenz für die Ausführung</i>	117
5.2	Auswertung und Diskussion zu den Untersuchungsergebnissen einer Leckagerate infolge Permeation	118
5.2.1	<i>Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse .</i>	118
5.2.2	<i>Bewertung der Einflussgrößen</i>	119
5.2.3	<i>Konsequenz für die Ausführung</i>	134
5.3	Gesamtleckagerate eines VIGS	135
5.4	Resultierende Dauerhaftigkeit eines VIGS	138

6. Zusammenfassung und Ausblick	140
Literaturverzeichnis	145

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Lateinische Zeichen

A	$[\text{dm}^2]$	Wandfläche
\bar{c}	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	Teilchengeschwindigkeit
c_0	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right]$	Gaskonzentration an der Oberfläche der Probe
c_{Probe}	$\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right]$	Gaskonzentration in der Probe
D	$\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right]$	Diffusionskoeffizient
d	$[\text{mm}, \text{dm}]$	Dicke
d_{perm}	$[\text{dm}]$	Permeationslänge
$K_{\text{perm.}}$	$\left[\frac{\text{dm}^2}{\text{s}} \right]$	Permeabilität
$L_{\text{DichtringVersuchskörper}}$	$[\text{m}]$	Länge des Dichtrings im Versuchskörper
$L_{\text{DichtringVIGS}}$	$[\text{m}]$	Länge des Dichtrings im VIGS
$L_{\text{KontaktVersuchskörper}}$	$[\text{m}]$	Länge der Kontaktfläche „Glas zu Dichtring“ sowie „Dichtring zu Abstandhalter“ am Versuchskörper
$L_{\text{KontaktVIGS}}$	$[\text{m}]$	Länge der Kontaktfläche „Glas zu Dichtring“ sowie „Dichtring zu Abstandhalter“ am VIGS
L_{Perm}	$[\text{m}]$	Permeationsstrecke
M	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right]$	molare Masse der betrachteten Gasart
m	$[\text{kg}]$	Masse
p	$[\text{mbar}]$	Innendruck
Δp	$[\text{mbar}]$	zulässiger Druckanstieg im VIGS
p_{Gasraum}	$[\text{atm}]$	Druck des Gases im Gasraum (=Begasungsdruck)
q_{perm}	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	Permeationsrate/Permeationsgasstrom
\bar{q}_{perm}	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{m}^2 \cdot \text{bar}} \right]$	Permeationsleitfähigkeit

q_{pV}	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	Leckagerate
$q_{pV,\text{ges.}}$	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten und Permeation / Gesamtleckagerate
$q_{pV,\text{Disk,Stahl}}$	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Stahl“
$q_{pV,\text{Disk,Glas}}$	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Glas“
$q_{pV,\text{Perm}}$	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	Leckagerate infolge der Permeation durch den Dichtring
$q_{pV,\text{zul.}}$	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	zulässige Gesamtleckagerate um eine Haltbarkeit von 25 Jahren zu erreichen
$q_{pV,\text{zul.,Diskontinuitäten}}$	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	zulässige Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für den Versuchskörper für eine Lebenserwartung von 25 Jahren
$q_{pV,\text{zul.,Permeation}}$	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	zulässige Leckagerate infolge Permeation für den Versuchskörper für eine Lebenserwartung von 25 Jahren
$q_{pV,\text{zul.,VIGS}}$	$\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	zulässige Leckagerate für das kleinformatige VIGS für eine Lebenserwartung von 25 Jahren
R	$\left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$	molare Gaskonstante
R_{VIGS}	$\left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$	Wärmedurchgangswiderstand
S	$\left[\frac{\text{dm}^3}{\text{s}} \right]$	Saugleistung
$S_{0,\text{He}}$	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$	Saugvermögen für Helium am Saugstutzen des Leckdetektors
t	[s, h]	Zeit
T	[K, °C]	Temperatur
t_{grenz}	[s]	Lebenserwartung des Versuchskörpers

t_i	[s]	Induktionszeit
U	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	Wärmedurchgangskoeffizient
V	[dm ³]	Volumen
V_0	[m ³]	Volumen des Versuchskörpers
V_{VIGS}	[dm ³]	lichtes Volumen des Versuchskörpers

Griechische Zeichen

α	[K ⁻¹]	Temperaturausdehnungskoeffizient
Δ	[-]	Laplace-Operator
λ	$\left[\frac{W}{m \cdot K} , \frac{mW}{m \cdot K} \right]$	Wärmeleitfähigkeit
λ_{10}	$\left[\frac{mW}{m \cdot K} \right]$	Wärmeleitfähigkeit bei 10°C
σ	[M]	Löslichkeitskoeffizient
τ	[h]	Ansprechzeit Leckdetektor
Ψ	$\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient

1. EINLEITUNG UND ZIEL DER ARBEIT

1.1 Einleitung

Im Zuge der Verschärfung der Energieeinsparvorgaben werden die primärenergetischen Anforderungen für neu zu errichtende Gebäude im Vergleich zum Status quo stets weiter erhöht – so wurden zum 01.01.2016 die Anforderungen der EnEV 2014 für Neubauten um weitere 25% angehoben. Weitere Verschärfungen der Anforderungen vor dem Hintergrund andauernder Diskussionen zum Thema Energieeinsparung und Ressourcenschonung sind für die Folgejahre bereits vorgesehen.

Der Primärenergiebedarf eines Gebäudes wird zum einen von der haustechnischen Anlage und zum anderen von der thermischen Ausführung der Gebäudehülle bestimmt. Der Dämmung des Gebäudes kommt somit bezogen auf Energieeinsparung und Ressourcenschonung neben der Haustechnik eine wesentliche Bedeutung zu. Die zukünftigen Anforderungen können mit den derzeit im Schnitt erforderlichen 14 bis 18 cm dicken Dämmschichtdicken nicht mehr erfüllt werden, sie führen zu einer weiteren Erhöhung der Dämmschichtdicken oder zu der Notwendigkeit hochdämmender Materialien wie beispielsweise der Vakuumdämmung.

Die Vakuumelemente Vakuum-Isolations-Paneel (VIP) und Vacuum Insulating Sandwich (VIS) stellen den derzeitigen wissenschaftlichen und technischen Status quo der Hochleistungsdämmmaterialien dar.

Das Vakuum-Isolations-Paneel (VIP) ist eine folienumhüllte evakuierte Dämmstoffplatte, zumeist bestehend aus pyrogener Kieselsäure – einem nanoporösen Dämmmaterial, das im Hochvakuum im ungestörten Bereich eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 8 mW/(m·K) und unter Atmosphärendruck eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 18 mW/(m·K) aufweist. Das Vacuum Insulation Panel wird neben dem Einsatz in Kühl- und Tiefkühlgeräten zunehmend auch in der Gebäudehülle verbaut. Von Nachteil erweist sich dabei die eingeschränkte Bautaughkeit, einhergehend mit einer begrenzten Lebenserwartung bei gleichzeitig hohen Anschaffungskosten.



Abbildung 1.1: Vakuum-Isolations-Paneel (VIP)



Abbildung 1.2: Vacuum Insulating Sandwich (VIS)

Das Vacuum Insulating Sandwich (VIS) besteht aus einem evakuierten Dämmstoffkern, der von einer gasdicht verschweißten ca. 0,6 bis 4 mm dicken Edelstahldeckschicht umhüllt ist. Die Evakuierung erfolgt über einen in der Hülle angebrachten Evakuierungsflansch (EVF). Die Elemente selber sind stark mechanisch belastbar, wodurch der Einsatz als hochdämmende Böden in der Industrie – für Lager-, Industriehallen und Kühlhäuser – sowie als Fassadenpaneel im Hochbau oder in Loggien und Haustüren möglich ist. Das VIS weist im Hochvakuum im ungestörten Bereich eine Wärmeleitfähigkeit von ca. $6 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf und unter Atmosphärendruck eine Wärmeleitfähigkeit von ca. $18 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Entgegen dem VIP weist das VIS bei sachgemäßer Ausführung und Verbau eine deutlich längere Lebenserwartung von mehreren 100 Jahren auf, was auf das widerstandsfähigere und permeationsdichtere Hüllmaterial zurückzuführen ist. Der Nachteil dieser Elemente ist der hohe Temperatureausdehnungskoeffizient der metallischen Hülle, der bei stark differierenden Temperaturbeanspruchungen der beiden Deckschichten zu unterschiedlichen Verformungen der Elementoberseiten zueinander führt – in den Wintermonaten zieht sich die Außenoberfläche des VIS aufgrund der geringen Temperaturen eher zusammen, während sich die Innenoberfläche bei konstanter Zimmertemperatur ausdehnt. Dieser so genannte Bimetalleffekt kann über die Fläche des VIS zu Verformungen von mehreren Millimetern führen. Diese können zum einen dauerhaft bestehen bleiben und machen damit beispielsweise die flächige Nutzung eines VIS-Untergrundes nicht mehr möglich. Zum anderen können diese unterschiedlichen Verformungen zu einer Beschädigung des biegesteif angeschweißten Membrananschlusses im Randbereich des Elementes führen und damit die vakuumdichte Hülle des VIS zerstören. Unter anderem aufgrund der damit bereits eingetroffenen Bauschäden wurde die Produktion der Elemente zwischenzeitlich eingestellt.



Abbildung 1.3: Dauerhaft verformtes VIS

Insgesamt ist festzuhalten, dass dem Einsatz von hochdämmenden Vakuumelementen im Zuge der Entwicklung der energetischen Anforderungen an Gebäuden eine zentrale Bedeutung zukommt, der Status quo derartiger Elemente mit VIP und VIS jedoch nicht ausgereift ist.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Status quo der Hochleistungsdämmmaterialien, insbesondere für den Einsatz in Pfosten-Riegel-Konstruktionen und Überkopfverglasungen, um ein effizientes und praxistaugliches Element zu erweitern: das Vacuum Insulated Glass Sandwich (VIGS).

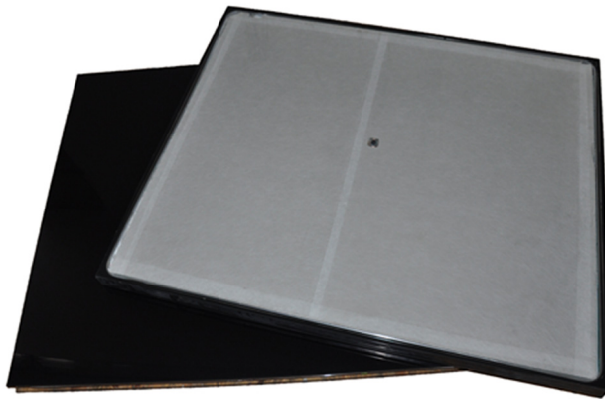


Abbildung 1.4: Vacuum Insulated Glass Sandwich (VIGS) [1]

Neben der eigentlichen Entwicklung des VIGS liegt ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit darin, den Stofftransport in das evakuierte Elementinnere zu untersuchen und auf Grundlage dieser Ergebnisse die Dauerhaftigkeit der VIGS zu bestimmen.

Ergänzt werden diese Arbeitsschritte um die thermische Optimierung der Anschlusskonstruktionen im eingebauten Zustand, um abschließend ein hochwertiges Vakuumdämmelement als Alternative zu den auf dem Markt zur Verfügung stehenden Hochleistungsdämmmaterialien präsentieren zu können.

Die Entwicklung des VIGS-Prototypen als grundlegender Ansatz dieser Dissertation wird in Kapitel zwei der Arbeit dargestellt. Hier wird anfänglich die Vorauswahl geeigneter Materialien für die Elementhülle des VIGS – insbesondere für die Dichtebene – vorgestellt. Ergänzt werden diese grundlegenden Betrachtungen um die Entwicklung des Evakuierungsflansches, über den das Element anfänglich, aber auch im eingebauten Zustand, evakuiert bzw. re-evakuiert werden kann. Des Weiteren werden die thermischen Eigenschaften sowie die Wärmebrückeneinflüsse im Randbereich des Elementes und in der Einbausituation quantitativ bestimmt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden im dritten Kapitel die Grundlagen zur Untersuchung des Stofftransports durch die Elementhülle zwecks Bestimmung der Dauerhaftigkeit vorgestellt. Der Stofftransport durch die Hülle tritt in zwei Formen auf: als Gasströmung durch Diskontinuitäten und als Permeation durch den Festkörper. Zusätzlich werden die Ausgasungseigenschaften der mit dem Vakuum in Kontakt stehenden

Materialien erläutert und entsprechende Maßnahmen beschrieben, um diesen Effekt möglichst gering zu halten.

Die entsprechenden experimentellen Untersuchungen werden in Abhängigkeit des Stofftransports aufeinander aufbauend im vierten Kapitel dargestellt. Im fünften Kapitel werden diese Versuche ausgewertet und die Dauerhaftigkeit der hochdämmenden Fassadenpaneele in Abhängigkeit der Versuchsergebnisse quantitativ bestimmt.

Das sechste Kapitel ist eine Zusammenfassung der Erkenntnisse im Rahmen dieser Arbeit und gibt einen Ausblick auf die mögliche Markteinführung des VIGS und die in diesem Zusammenhang erforderlichen Optimierungsansätze am VIGS.

2. VACUUM INSULATED GLASS SANDWICH (VIGS)

2.1 Aufbau Vacuum Insulated Glass Sandwich

Das Vacuum Insulated Glass Sandwich (VIGS) ist ein hochwärmedämmendes Fassadenpanel für den Einsatz in Pfosten-Riegel-Konstruktionen und Überkopfverglasungen. Es kombiniert die aus den bisherigen Vakuumdämmelementen gewonnenen positiven Eigenschaften – geringe Wärmeleitfähigkeit aufgrund des Vakuums sowie Lastabtragung – und hebt sich von deren Nachteilen – erhöhte Permeationsleitfähigkeit der Hülle, eingeschränkte Praxistauglichkeit, hohe Kosten – ab.

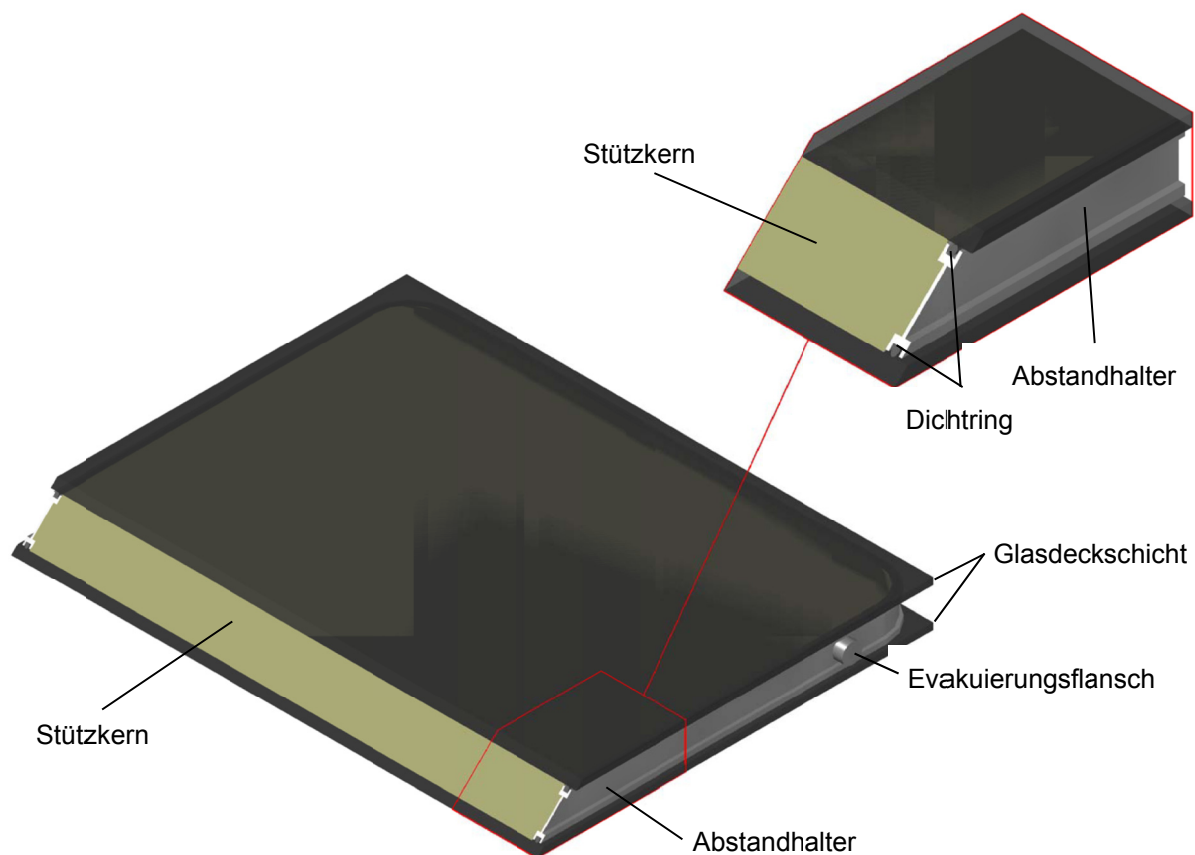


Abbildung 2.1: Prinzipskizze Vacuum Insulated Glass Sandwich (VIGS)

Das Element besteht insofern aus einem Stützkern im Elementinnern, der evakuiert wird, und einer belastbaren Hülle mit geringer Permeationsleitfähigkeit (siehe Abbildung 2.1).

Wesentliche Kriterien bei der Auswahl des Hüllmaterials sind die somit die Permeationseigenschaften und die Oberflächenbeschaffenheit.

Die Permeation beschreibt den Stofftransport durch einen Festkörper. Materialien mit einer geringen Permeationsleitfähigkeit weisen einen erhöhten Widerstand auf gegen das Bestreben von Gasen, den Festkörper zu durchdringen. Bezogen auf die VIGS-Hülle sind derartige Materialien somit zu bevorzugen, um das Eindringen von Gasen in das evakuierte Elementinnere möglichst gering zu halten.

In Zusammenhang mit der Oberflächenbeschaffenheit zweier in Kontakt stehender Materialien kann es in Abhängigkeit der Ebenheit der jeweiligen Oberflächen zu einem entsprechend erhöhten Stofftransport durch die Kontaktfläche kommen. Bezogen auf die VIGS-Hülle sind somit Materialien zu bevorzugen, die eine mikroskopisch ebene Oberfläche aufweisen, um das Potential eventueller Leckkanäle in den Kontaktflächen auf ein Minimum zu reduzieren.

Ein weiteres Kriterium bei der Auswahl der Hüllmaterialien für ein VIGS ist die Steifigkeit. Im evakuierten Zustand sind die Hüllmaterialien infolge der Druckdifferenz zwischen evakuiertem Elementzwischenraum und außen vorhandenem Atmosphärendruck einer Flächenlast von 100 kN/m^2 ausgesetzt. Verformungen der VIGS-Hülle infolge dieser Flächenlast müssen minimal sein, damit sie das Erscheinungsbild der Fassade nicht beeinträchtigen bzw. die dichtende Eigenschaft der Hülle nicht schädigen. Diese Bedingung kann entweder durch eine ausreichende Steifigkeit der Hüllmaterialien erreicht werden oder durch eine ausreichende Steifigkeit des Stützkernmaterials. Das Stützkernmaterial muss zudem eine offenzellige Struktur aufweisen, damit es evakuiert werden kann. Für Hüllmaterial und Stützkern gilt des Weiteren, dass diese Materialien nicht in das Elementinnere ausgasen dürfen.

Auf Grundlage dieser Randbedingungen besteht das VIGS im Detail aus permeationsdichten Glasdeckschichten, einem formstabilen und diffusionsdichten umlaufenden Abstandhalter aus Metall und einem Dichtring als dichtende Kontaktebene zwischen den beiden Hüllmaterialien. Der Stützkern ist eine druckstabile offenzellige Platte aus pyrogener Kieselsäure.

Im Folgenden wird die Wahl der einzelnen Bestandteile der VIGS-Hülle näher erläutert.

Glasdeckschichten

Die Glasdeckschichten des VIGS machen das eigentliche Dämmelement zu einem Fassadenpaneel, das direkt ohne weitere Hülle bzw. weitere Arbeitsschritte in der Industrie oder auf der Baustelle in die Fassade eingesetzt werden kann.

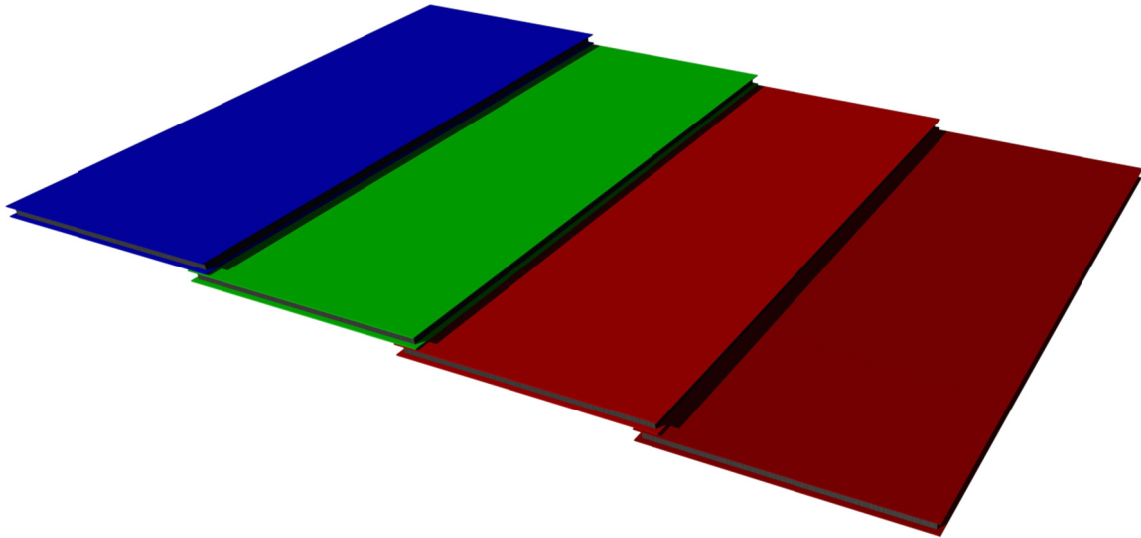


Abbildung 2.2: Farbige gestaltete Glasdeckschichten eines VIGS

Aufgrund des Einsatzes als Fassendpaneel ist für die Glasdeckschichten ein Sicherheitsglas erforderlich – aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist in diesem Fall ein Einscheibensicherheitsglas (ESG) dem Verbundsicherheitsglas (VSG) vorzuziehen.

Als Glasdeckschicht des VIGS wird ein zu Einscheibensicherheitsglas verarbeitetes Floatglas mit einer Dicke von 6 mm verwendet.

Tabelle 2.1: Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient verschiedener fester Stoffe bei -20 °C bis 100 °C

Zeile	Fester Stoff	Längenausdehnungskoeffizient α in $[K^{-1}]$
1	Floatglas	ca. $9,00 \cdot 10^{-6}$ [2]
2	Aluminium	ca. $2,32 \cdot 10^{-5}$ [3]
3	Stahl, rostfrei	ca. $1,44 - 1,60 \cdot 10^{-5}$ [3]

Wie in Tabelle 2.1 dargestellt, verfügt Glas gegenüber Metallen über einen kleinen Ausdehnungskoeffizienten. Ein kleiner Ausdehnungskoeffizient bedeutet eine sehr gute Temperaturwechselbeständigkeit [4]. Diese Eigenschaft ist für den Einsatz des Glases als Deckschicht in einem VIGS von besonderer Bedeutung, damit die beiden VIGS-Deckschichten, die im eingebauten Zustand unterschiedlichsten Temperaturbedingungen ausgesetzt sein können, sich nicht derart unterschiedlich zueinander verformen, dass das Element beschädigt werden würde. Wie im ersten Kapitel bereits erläutert, ist der hohe Ausdehnungskoeffizient des hochlegierten Stahls der VIS-Hülle Ursache für dauerhafte Verformungen am Element sowie an den damit einhergehenden Bauschäden. Durch den Einsatz des sich geringer ausdehnenden Floatglases als Deckschicht am VIGS können dieses Verhalten und die damit einhergehenden Konsequenzen vermieden werden.

Die Anforderungen an die Ebenheit der Glasoberfläche wird von dem gewählten Einscheibensicherheitsglas nur begrenzt eingehalten – es weist herstellbedingt nicht die Geradheit auf wie normal gekühltes Glas [5]. Die Unebenheiten werden beeinflusst von der Dicke, den Maßen und dem Seitenverhältnis der jeweiligen Glasscheiben. Die Maximalwerte der Verwerfungen liegen in einem Bereich von 0,003 bis 0,005 mm/mm für generelle Verwerfungen bzw. 0,5 bis 1,0 mm/300 mm für örtliche Verwerfungen [5].

Ein negativer Einfluss auf die Durchlässigkeit bzw. auf die Permeation infolge der nach DIN EN 12150-1 [5] erlaubten generellen oder örtlichen „Verwerfungen“¹ konnte in den durchgeführten experimentellen Untersuchungen (siehe Kapitel 4) jedoch nicht bestätigt werden. Des Weiteren sind Unebenheiten im Bereich der Kanten bezogen auf die Dauerhaftigkeit des VIGS-Randverbundes nicht relevant.

Um die klaren Floatglasscheiben architektonisch ansprechender zu gestalten und um das Stützkernmaterial im Elementinnern zu verdecken, werden die Deckschichten des VIGS mit einer Beschichtung versehen. Diese Beschichtung muss die oben genannten Anforderungen an die Ebenheit erfüllen und darf nicht ausgasen. Ausgeschlossen werden somit manuell aufgetragene Beschichtungssysteme sowie Beschichtungen auf Basis von Silikonen oder Lacken.

Verwendet wird eine keramische Farbe, die entweder im Emaillier- oder im Siebdruckverfahren aufgebracht wird.

Keramische Farben werden während der Herstellung von thermisch vorgespannten Gläsern in die Oberfläche eingebrannt – in diesem Zusammenhang wird die Farbe bei ca. 650 °C innerhalb weniger Sekunden auf das Glas aufgeschmolzen. Durch diesen Einbrennvorgang werden die Farben kratzfest, witterungs- und UV-beständig. Die Schichtdicke beträgt 10 – 100 µm.

Die einzelnen Beschichtungsverfahren laufen wie folgt ab:

a) Emaillierung:

Die Emaillierung wird aufgebracht im Walz-, Gieß- oder Sprühverfahren. Bei allen drei Verfahren resultieren unregelmäßige Schichtdicken, was bei dem Einsatz der Scheiben in opaken Fassadenpaneelen nicht relevant ist, den Einsatz dieses Verfahrens für die Herstellung von VIGS-Deckschichten jedoch begrenzt und entsprechende detailliertere Untersuchungen fordert (siehe Kapitel 4 bzw. Kapitel 5).

b) Siebdruckverfahren:

Der Siebdruck wird über ein engmaschiges Sieb gleichmäßig mit einem Rakel auf die Glasoberfläche aufgebracht. Bezogen auf die geforderte Ebenheit der Beschichtung ist

¹ unter einer „Verwerfung“ wird hier entsprechend DIN EN 12150-1 eine Verformung der Glasoberfläche verstanden

dieses Verfahren von der Theorie her besser geeignet. Detaillierte Untersuchungen erfolgen in Kapitel 4 bzw. Kapitel 5.

Der Nachteil der eingebrannten Farbe ist eine reduzierte Biegefestigkeit – die Biegefestigkeit einer ESG-Scheibe mit eingebrannter Farbe beträgt nur noch 70 N/mm^2 .

Abstandhalter

Neben den Anforderungen an die Dauerhaftigkeit muss der Abstandhalter des VIGS hohen Druckbeanspruchungen standhalten. Im Zustand der Herstellung kommt es aufgrund einer anfänglichen Fixierung des Elementes über den gesamten Rand, insbesondere im Bereich des Abstandhalters, zu einer vertikalen Last in Höhe von ca. $2,86 \text{ kN/m}$.

Im eingebauten Zustand beträgt diese Last aufgrund des außerhalb des evakuierten VIGS herrschenden Atmosphärendrucks ca. $2,00 \text{ kN/m}$, die von außen auf den Abstandhalter wirkt.

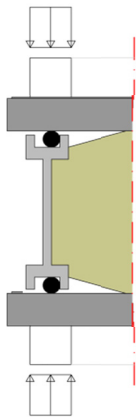


Abbildung 2.3: Beanspruchung des Abstandhalters bei der Herstellung

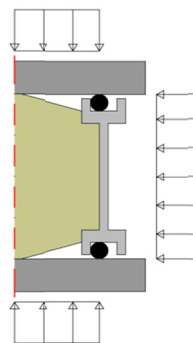


Abbildung 2.4: Beanspruchung des Abstandhalters am evakuierten VIGS

Gleichzeitig muss der Abstandhalter den thermischen Anforderungen entsprechen, d.h. die Wärmebrückenwirkung im Randbereich der Elemente muss möglichst gering sein. Neben der Auswahl eines Materials mit möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit ist der Querschnitt aus thermischer Sicht in seinen Abmessungen möglichst filigran auszuführen.

Aufgrund der geforderten Dauerhaftigkeit sind Materialien mit einer geringen Permeationsleitfähigkeit – wie beispielsweise Glas oder Metalle – zu bevorzugen.

Bezogen auf die Beanspruchung des Abstandhalters infolge des Atmosphärendrucks ist von der Verwendung von Glas als Abstandhalter jedoch abzusehen. Entsprechende Vorversuche mit einem Glassteg als Abstandhalter, der über ein Glaslot mit den beiden Deckschichten verbunden war, haben gezeigt, dass dieser nicht in der Lage ist, die zweiachsige Beanspruchung infolge des Atmosphärendrucks aufzunehmen. Glaslot und Glassteg wurden im Rahmen der Vorversuche unter der Last des Atmosphärendrucks beschädigt.

Somit sind die sonst auch üblicherweise in der Vakuumtechnik verwendeten permeationsdichten und belastbaren Metalle zu verwenden.

Bei der Auswahl eines für den VIGS-Abstandhalter geeigneten Metalls sind folgende Aspekte zu beachten:

- Baustahl

Die typischen Baustähle in der Art S 235 und S 355 sind aufgrund der herstellbedingten kontinuierlichen Ausgasung von Kohlenstoffmonoxid und der Neigung zur Korrosion nur für den Hochvakuumbereich bis 10^{-6} mbar geeignet. Vor ebendiesem Hintergrund wird von dem Einsatz von Baustahl im VIGS abgesehen. [4]

- Edelstahl

Hinsichtlich seiner Oberflächenstruktur ist Edelstahl korrosionsbeständiger verglichen mit den üblichen Baustählen und somit für die Vakuumtechnik besser geeignet. Um einen umlaufenden Rahmen für das Element herzustellen, muss der Edelstahlstrang mindestens an einer Stelle geschweißt werden. Vor diesem Hintergrund sollte bei der Wahl des Edelstahls auf einen geringen Kohlenstoffgehalt geachtet werden oder stabilisierte Güten bevorzugt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen und den bisherigen Produktionsbedingungen wurde jedoch von der Verwendung des Edelstahls als Abstandhalter im VIGS abgesehen. [4]

- Titan

Titan ist ein dehnbares, korrosions- und temperaturbeständiges Material mit geringer Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 21,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) und vergleichsweise geringem Temperatúrausdehnungskoeffizienten ($\alpha = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). [2] Es neigt beim Schweißen ohne spezielle Schutzvorrichtungen aufgrund der Affinität zu atmosphärischen Gasen zur Reaktion und Versprödung. [6] Herstellungsbedingt ist das Material zudem sehr teuer. Aus eben diesen beiden Gründen wurde von der Verwendung des Titans als Abstandhalter im VIGS abgesehen.

- Kupfer

Kupfer ist ein temperaturbeständiges Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 401 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) und hohem Temperatúrausdehnungskoeffizienten ($\alpha = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). [2] Es neigt unter Wärmebehandlung (Auftreten von Wasserstoff) zur Reaktion: Der im Kupfer vorhandene Sauerstoff reagiert mit dem Wasserstoff der warmen Luft zu Wasser und die Wasserbildung zerstört wiederum das Kupfergefüge. Kupfer wird als metallische Dichtung bis zu einer Temperatur von ca. 450°C eingesetzt, speziell im Ultrahochvakuumbereich als Kupfer mit abgesenktem Sauerstoffgehalt (OFHC-Kupfer = Oxygen Free High Conductivity)). [4] Von dem Einsatz als Abstandhalter im VIGS wurde

vor dem Hintergrund der Reaktionen und dem erforderlichen Aufwand während eines Schweißvorgangs abgesehen.

- Gold und Silber

Gold ist ein Reinelement und korrodiert nicht. Seine Duktilität, die hohe Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 317 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) und der hohe Temperatúrausdehnungskoeffizienten ($\alpha = 14,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) machen dieses Material für den Einsatz als Abstandhalter im VIGS jedoch nicht brauchbar. [2]

Silber ist ebenfalls reaktionsträge und weist eine hohe Duktilität sowie eine hohe Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 429 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) und einen hohen Temperatúrausdehnungskoeffizienten ($\alpha = 19,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) auf. [2] Auch hier wird aus eben diesen Gründen von diesem Material als Abstandhalter abgesehen.

Üblicherweise werden diese beiden Materialien in der Vakuumtechnik als Dichtmaterial im Ultrahochvakuum eingesetzt. [4]

- Indium

Indium ist wie Gold und Silber ein duktileres Material. Es reagiert aufgrund seiner Oxidschicht nicht, nur bei hohen Temperaturen. Die Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 81,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) ist eher gering im Vergleich zu anderen Materialien. Dennoch eignet es sich aufgrund der Duktilität als Dichtmaterial – wie es üblicherweise in der Vakuumtechnik eingesetzt wird. [4] Von dem Einsatz als Abstandhalter im VIGS wird insbesondere aufgrund der Duktilität abgesehen.

- Aluminium

Aluminium ist ein temperaturbeständiges Material mit hohem Temperatúrausdehnungskoeffizienten ($\alpha = 23,1 \text{ K}^{-1}$) und hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). [7] Zur Korrosion kommt es bei Raumtemperatur nur oberflächlich. Aluminium neigt beim Schweißen aufgrund der porösen Aluminiumoxidschicht auf der Oberfläche ohne Schutzvorrichtung zur Reaktion mit der Atmosphäre und zur Porenbildung in der Schweißnaht. [4], [8] Aluminium wurde bis in die 1990er-Jahre als üblicher Fenster-Abstandhalter eingesetzt.

Bezogen auf die oben aufgeführten Eigenschaften der in der Vakuumtechnik üblicherweise eingesetzten Metalle hat sich Edelstahl grundsätzlich als das am besten geeignetste Material herausgestellt. Im Rahmen der Forschung an der TU Dortmund mit Projektpartnern aus der Fensterbranche wurde bisher jedoch nur Aluminium als Abstandhalter für das VIGS verwendet, weil Aluminiumabstandhalter bis in die 1990er-Jahre übliche Fensterabstandhalter waren, es noch Werkzeuge zur Herstellung entsprechender Aluminiumstränge gibt und das Material im Vergleich zu Edelstahl zudem leichter und wirtschaftlicher ist.

Bezogen auf die Geometrie des Abstandhalters hat sich anhand thermischer Berechnung mit einem Finite-Elemente-Programm ein I-Profil mit einer geringen Stegdicke als thermisch beste Lösung ergeben (siehe Kapitel 2.3). Eine Nut jeweils am oberen und unteren Ende des I-Profils dient der Aufnahme der Dichtebenen, um die beiden Hüllmaterialien Aluminium und Glas permeationsdicht miteinander zu verbinden.

Die statischen Berechnungen haben gezeigt, dass die Stegdicke infolge des Atmosphärendrucks mindestens 2 mm dick sein muss. Die folgende Abbildung zeigt den zum Einsatz kommenden Abstandhalter aus Aluminium:

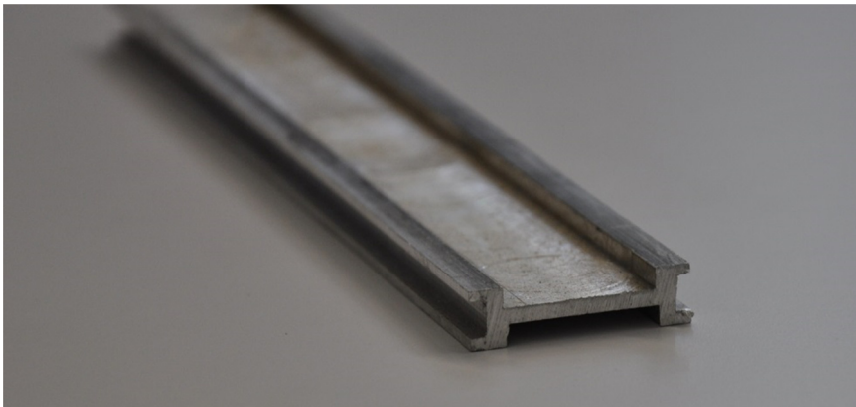


Abbildung 2.5: I-Profil als VIGS-Abstandhalter

Alternativ wurden thermische und statische Berechnungen zu einem Hohlprofil durchgeführt, bei dem die Stege jeweils nur 1 mm dick sind. Dieses Profil ähnelt den gängigen Abstandhaltern, die bei der Fensterproduktion verwendet werden (siehe auch Abbildung 2.6).

[1]

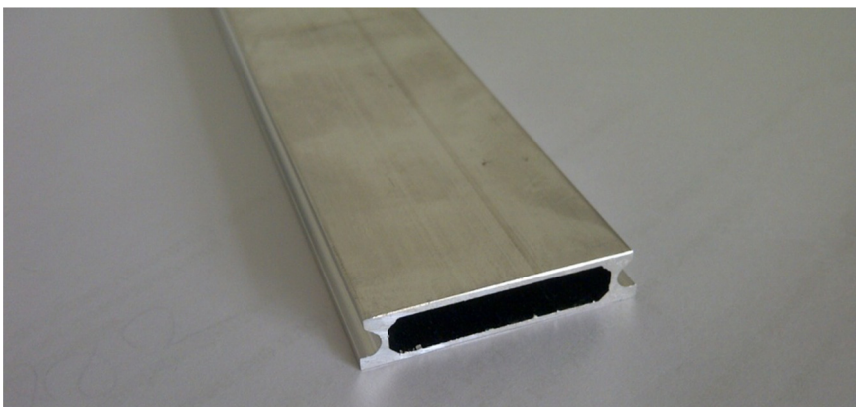


Abbildung 2.6: Hohlprofil als VIGS-Abstandhalter

Die Biegeversuche für die Eckausbildung des Abstandhalters mit Hohlprofil weisen starke Verformungen im Bereich der Nut auf. Durch eine Füllung der Hohlkammer mit einem harten Material zu annähernd 100% können die Verformungen vermieden werden, in Zusammenhang mit dieser Maßnahme kommt es aber zu Mikrorissen in den Ecken, die wiederum dazu führen, dass ein Stofftransport von der Atmosphärenseite zur evakuierten

Seite durch den Abstandhalter möglich wird. Der Austausch der harten Füllung gegen eine weiche Füllung verhindert die Mikrorisse, lässt aber wieder Verformungen zu, die eine dichte Verbindung der VIGS-Hülle gerade in den Eckbereichen wesentlich beeinträchtigen würden. Der Arbeitsaufwand einer Nachbehandlung der Verformungen in den Eckbereichen des Abstandhalters in Zusammenhang mit einer industriellen Fertigung ist nicht tolerierbar. Vor diesem Hintergrund wird das oben gezeigte I-Profil bevorzugt.

Das Schweißen des Aluminiumrahmens zu einem umlaufend vakuumdicht abschließenden Abstandhalter erfolgt in Abhängigkeit der Länge bzw. der Größe des VIGS mit einer oder zwei Schweißnähten.

Ein alternatives Kleben des Rahmens mit Ultra-Hochvakuumkleber erweist sich aufgrund auftretender horizontaler Beanspruchungen (Beispiel: Atmosphärendruck) als nicht geeignet. Unter diesen Beanspruchungen kommt es bei der Klebnaht noch während der Evakuierung zu Mikrorissen bis hin zur vollkommenen Auftrennung der Naht.

Dichtebene

Für den diffusionsdichten Anschluss zwischen den Elementdeckschichten und dem Abstandhalter wurden zunächst die folgenden Verfahren in Erwägung gezogen:

- Schweißen (Ultraschallschweißen, Schweißen mit Laser)/Löten mit Glaslot
- Klebung
- Dichtring (in Nut)

Das Verfahren des Schweißens bzw. Lötens mit einem Glaslot ist im Zusammenhang mit einem VIGS nicht geeignet, weil die zu verbindenden Materialien, Aluminium und Quarzglas, unterschiedliche Temperatúrausdehnungskoeffizienten (s.o.) aufweisen. Die damit verbundenen unterschiedlichen Verformungen der in Kontakt stehenden Materialien würden zu Rissen in der starren Verbindung führen.

Zudem kann es bei Auftreten eines hohen Temperaturgradienten über den Elementquerschnitt im eingebauten Zustand und entsprechend unterschiedlichen Längenänderungen der beiden Glasdeckschichten zu Relativbewegungen in den Kontaktflächen kommen, die von der starren Verbindung der beiden Hüllmaterialien nicht aufgenommen werden können und welche somit beschädigt werden würden. Von diesen Verfahren ist somit abzusehen. (vgl. Abbildung 2.7)

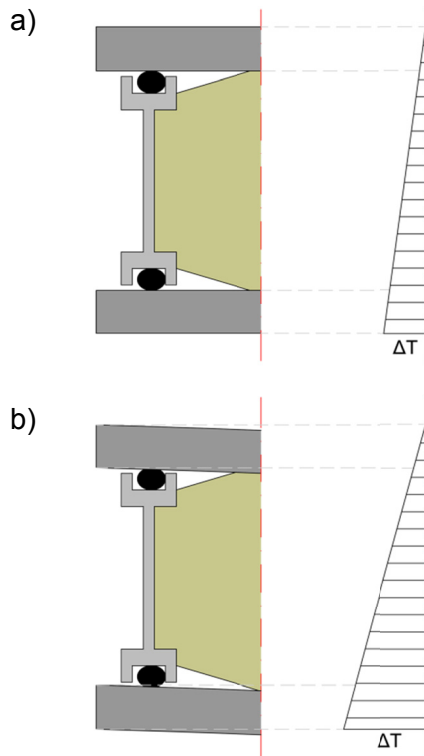


Abbildung 2.7: Schubweiche Verbindung der VIGS-Deckschichten am Beispiel eines kleinen Temperaturgradienten (a) und eines hohen Temperaturgradienten (b) mit entsprechender Verformung der Glasdeckschichten

Das Verfahren der Klebung findet in der Vakuumtechnik zunehmende Bedeutung. Für die Verbindung von Deckschicht und Abstandhalter eignet es sich dennoch nicht, weil zwischen beiden Materialien eine schubfeste Verbindung bestehen würde, die wie unter den beim Verfahren Schweißen bzw. Löten bereits genannten Umständen ebenfalls beschädigt werden würde. Auch von diesem Verfahren ist somit abzusehen.

Das Verfahren der Dichtstoffe hat allgemein das Anwendungsziel, die Diffusion infolge gasförmiger und bzw. oder flüssiger Medien durch Fugen oder sonstige Diskontinuitäten zu vermeiden. Ein Dichtmaterial, das die Diffusion zu 100% unterbindet, gibt es jedoch nicht.

In Zusammenhang mit einem Vakuumdämmelement, bei dem eine Innendruckzunahme von mehr als 100 mbar ausreicht, um die hochdämmende Eigenschaft des Elementes nahezu aufzuheben, müssen hochwertige Dichtstoffe eingesetzt werden.

Zudem sollte der Dichtstoff für ein Vakuumdämmelement, insbesondere für das VIGS, aufgrund seiner Einbaubedingung – als Dichtebene zwischen Glas und metallischem Abstandhalter – einen niedrigen Schubmodul aufweisen, um die Spannungen bei Beanspruchungen der Dichtung infolge Relativbewegungen von Glas und Abstandhalter gering zu halten. Eine derartige schubweiche Verbindung der einzelnen Bestandteile kann somit eine Beschädigung der Dichtebene infolge unterschiedlicher Längenausdehnungen von Abstandhalter und Deckschicht vermeiden. Der Einsatz von Dichtstoffen ist somit zu bevorzugen.

In der Vakuumtechnik werden als Dichtstoffe primär eingesetzt:

- Elastomere
- Thermoplaste
- Duroplaste

Elastomere basieren auf fadenförmigen Makromolekülen, die durch mehr oder weniger stark vernetzte chemische Bindungen verknüpft sind. Aufgrund der gummiähnlichen Eigenschaften lassen sie sich ideal elastisch verformen. Zu den Elastomeren gehören die Werkstoffe Perbunan, Viton[®], Kalrez[®], Chemraz[®] und Silikon. [4]

Wie bei den Elastomeren sind bei den Thermoplasten die Makromoleküle fadenförmig gestaltet. Die Länge der Ketten bestimmt die Eigenschaften des Materials: bei kurzen Fäden ist das Material klebrig weich, bei langen Fäden ist das Material zähweich, elastisch oder gummiartig (abhängig von Art und Menge des Weichmacherzusatzes). Unter Normaltemperatur sind Thermoplaste mehr oder weniger hart, bei höheren Temperaturen ab ca. 100 °C werden sie plastisch verformbar. [4] Für den Einsatz in einem Fassadenelement, bei dem hohe Temperaturen auftreten können, sind sie somit nur bedingt geeignet.

Die Fadenmoleküle der Duroplaste sind räumlich vernetzt. Dieses Dichtmaterial ist auch bei höheren Temperaturen hart. Als Duroplaste werden in der Vakuumtechnik Epoxidharze eingesetzt. Diese sind, abhängig von der Herstellung, bis 100 °C (kalthärtend) oder 180 °C (warm härtend) beständig. Die Gasabgabe ist vergleichbar mit der von Teflon[®] und Hostaflon[®]. [4] Aufgrund der Härte sind Duroplaste für den Einsatz als schubweiche Verbindung zwischen Glaseckschicht und metallischem Abstandhalter in einem VIGS ungeeignet.

Mit den gummiähnlichen Eigenschaften und der Temperaturbeständigkeit erweisen sich somit Elastomere als die am besten geeigneten Dichtringe für ein VIGS.

Insbesondere das in der Vakuumtechnik zumeist eingesetzte **Viton[®]** ist aufgrund der in Relation zu anderen Dichtstoffen geringen Permeationsleitfähigkeit, den moderaten Kosten sowie der UV-, Feuchte- und Temperaturbeständigkeit als Dichtring für das VIGS zu bevorzugen.

Die Materialien Kalrez[®] und Aflas[®] weisen ähnliche Eigenschaften wie Viton[®] auf, sind jedoch kostenintensiver in der Anschaffung. Im Rahmen der Dissertation wird das günstigere **Aflas[®]** als alternatives Dichtmaterial zu Viton[®] untersucht.

Die hier betrachteten Dichtmaterialien benötigen einen Anpressdruck, um ihre maximale Dichtfunktion aufbauen zu können. Bezogen auf den Einbau des Dichtmaterials im VIGS wird es einem Anpressdruck infolge des Atmosphärendrucks ausgesetzt. Durch die

Abschrägung der Kanten des Stützkernmaterials im Randbereich wird der resultierende Anpressdruck auf den Dichtring erhöht.

Stützkern

Die Glasdeckschichten des VIGS sind im eingebauten Zustand einer Gleichflächenlast infolge des Atmosphärendrucks von 100 kN/m^2 ausgesetzt. Grundsätzlich erfüllt der Stützkern hier den Zweck, die Glasdeckschichten und den Abstandhalter zu stützen bzw. auf Abstand zu halten und eine Durchbiegung dieser infolge der Flächenlast zu verhindern.

Die Durchbiegung der Hüllmaterialien ist somit abhängig von den Stauchungseigenschaften bzw. der Druckfestigkeit des Stützkerns. Eine geringe Druckfestigkeit des Stützkernmaterials führt zu einer Durchbiegung der Glasdeckschichten in Elementmitte, die wiederum dazu führen kann, dass sich die Ecken der Glasdeckschichten aufgrund von Drillmomenten nach oben wölben und es in diesen Bereichen zu einer Belüftung des VIGS kommt.

Neben der Druckfestigkeit ist die Offenzelligkeit ein entscheidendes Auswahlkriterium des Stützkernmaterials für den Einsatz in einem VIGS.

Aufgrund dieser geforderten Offenzelligkeit sind für den Einsatz als Stützkern in einem VIGS die folgenden Dämmstoffe geeignet:

- pyrogene Kieselsäure
- gepresste Glasfaser
- offenzelliges XPS
- offenzelliges PUR

Die beiden letztgenannten Materialien stehen derzeit nicht oder nicht den Anforderungen entsprechend auf dem Markt zur Verfügung.

Die pyrogene Kieselsäure ist ein drucksteifes, offenzelliges Material, das im Vakuum (ab 10 mbar) eine Wärmeleitfähigkeit von ca. $5 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$ aufweist.

Die gepresste Glasfaser ist ebenfalls ein druckfestes, offenzelliges Material, das im Vakuum (ab 0,01 mbar) eine Wärmeleitfähigkeit von ca. $3 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$ aufweist.

Mit zunehmendem Innendruck bis hin zum Atmosphärendruck unterscheiden sich die Wärmeleitfähigkeiten dieser beiden Materialien wesentlich, wie in der folgenden Abbildung veranschaulicht:

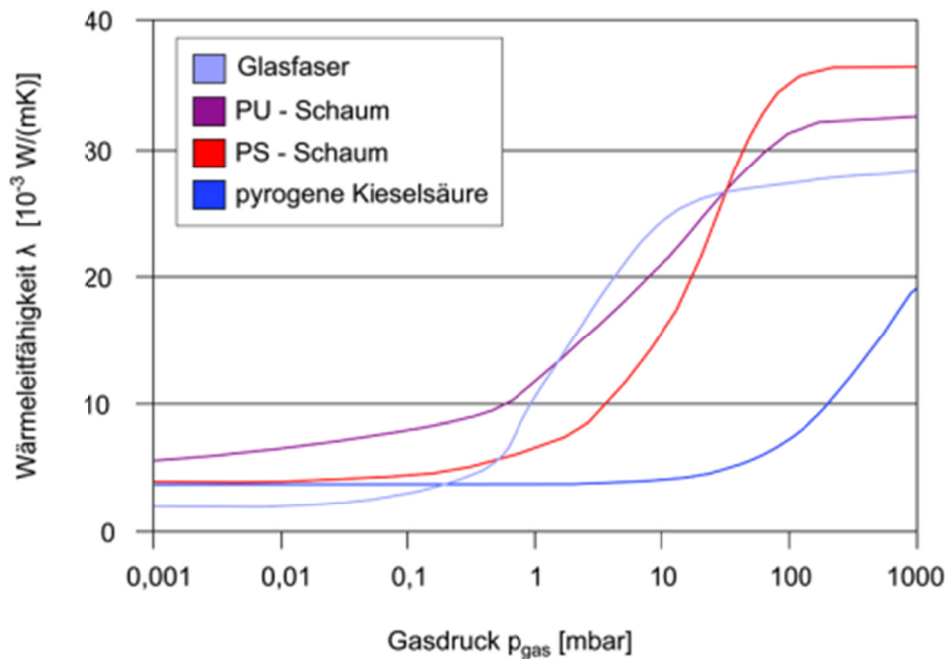


Abbildung 2.8: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stützkernmaterialien in Abhängigkeit des vorherrschenden Innendruckes bei einem Außendruck von 1 bar und einer Umgebungstemperatur von 20°C in Anlehnung an [9]

Im Fall einer Belüftung des Dämmelementes wären die Wärmeverluste über ein VIGS mit Glasfaser um ca. 90 % höher verglichen mit denen eines VIGS basierend auf einem Stützkern aus pyrogener Kieselsäure. Demgegenüber sind die Anschaffungskosten der pyrogenen Kieselsäure um ca. ein zehnfaches höher im Vergleich zur Glasfaser.

Das Verhalten der beiden Stützkernmaterialien wird im Folgenden für den Lastfall „Atmosphärendruck“ experimentell untersucht. [10] Abbildung 2.9 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Durchbiegung der VIGS bei dem Einsatz pyrogenen Kieselsäure bzw. gepresster Glasfaser. Für den Versuch wurden jeweils ein 500 x 500 mm großes VIGS mit Glasfaser-Stützkern und ein 500 x 500 mm großes VIGS mit Stützkern aus pyrogener Kieselsäure hergestellt. Vor der Evakuierung wurde mittig oberhalb der Glasdeckschicht ein Wegaufnehmer angebracht, um dort die maximale Durchbiegung aufzunehmen. Über den Wegaufnehmer wurde die Durchbiegung der oberen Glasdeckschicht während der Evakuierung kontinuierlich mit einer Genauigkeit von 0,1 mm ermittelt. Aus physikalischen Gründen ist davon auszugehen, dass sich die untere Glasdeckschicht analog verhält.

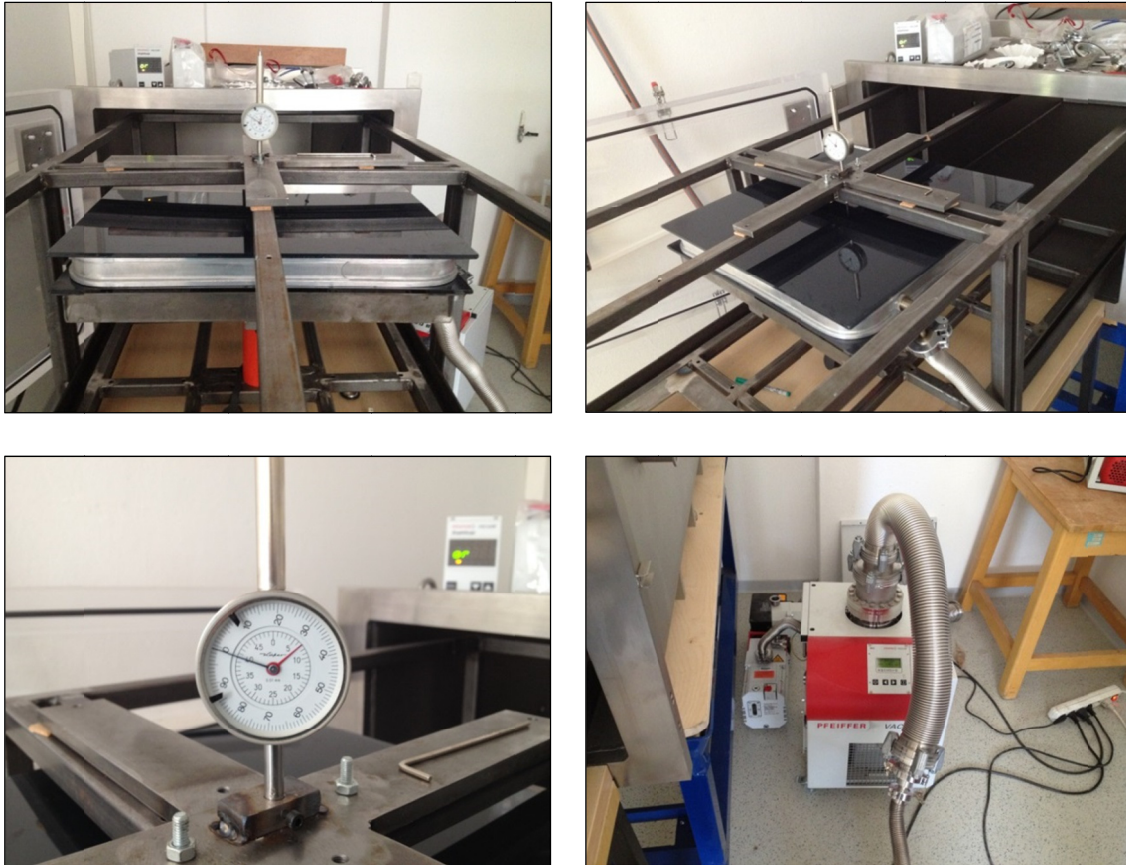


Abbildung 2.9: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Durchbiegung der Glasdeckschichten [10]

Die folgende Tabelle zeigt den Aufbau der unterschiedlichen Prüfkörper:

Tabelle 2.2: Aufbau Prüfkörper 500 x 500 mm zur Untersuchung der Durchbiegung der Glasdeckschichten

Zeile	Probe	Glasdeckschicht		Stützkernmaterial	
		Emaile	Siebdruck	Kieselsäure	Glasfaser
1	GE-SK-1	X		X	
2	GS-SK-1		X	X	
3	GE-SG-1	X			X
4	GS-SG-1		X		X

Zusätzlich zur Variation des Stützkernmaterials wurden hier die beiden oben genannten Beschichtungsarten variiert.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Untersuchung:

Tabelle 2.3: Ergebnisse der Durchbiegungsuntersuchungen der Glasdeckschichten am Probekörper 500 x 500 mm [10]

Zeile	Probe	Einzelkomponenten des VIGS		Maximale Durchbiegung der Glasdeckschichten [mm]
		Glasdeckschicht	Stützkern	
1	GE-SK-1	Emaile	Kieselsäure	0,01
2	GS-SK-1	Siebdruck	Kieselsäure	0,10
3	GE-SG-1	Emaile	Glasfaser	6,46
4	GS-SG-1	Siebdruck	Glasfaser	7,91

Eine explizite Festsetzung zur maximal zulässigen Durchbiegung der einzelnen Scheiben eines Fassadenpaneels gibt es nicht. DIN EN 16612 [11] verweist lediglich auf Grenzwerte in anderen Normen, Regelwerken und Richtlinien, in denen wiederum keine signifikanten Anforderungen entsprechend dem Aufbau des VIGS zu finden sind. Grundsätzlich wird hier festgelegt, dass eine Durchbiegung kleiner 1 mm anzustreben ist, damit diese am eingebauten Fassadenpaneel mit dem menschlichen Auge nur gering bis gar nicht wahrnehmbar ist.

Die Messergebnisse zeigen, dass diese Anforderung lediglich mit der pyrogenen Kieselsäure realisierbar ist. Hier liegen die Durchbiegungen unter 1 mm.

Die Durchbiegungen der VIGS-Glasdeckschichten mit einem Stützkern aus gepresster Glasfaser liegen im Mittel bei ca. 7 mm.

Des Weiteren kommt es unter dem Einsatz der gepressten Glasfaser mehrfach zu der oben bereits beschriebenen Durchbiegung der Deckschicht in der Elementmitte, die dazu führt, dass sich die Ecken der Deckschichten abheben und das Element belüftet wird.

Entsprechende weitere Untersuchungen zu einer Überhöhung des Glasfaser-Stützkerns in der Elementmitte zeigen, dass die Durchbiegung in eben dieser Elementmitte auch durch zusätzliche Glasfaserschichten in Millimeter-Schritten nicht steuerbar ist. Zudem ist eine solche zusätzliche Schichtung bezogen auf den Arbeitsaufwand bei einer industriellen Fertigung unwirtschaftlich.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wird trotz der höheren Anschaffungskosten pyrogene Kieselsäure als Stützkernmaterial im VIGS verwendet.

Die Abkantung des Stützkernmaterials am Rand dient wie oben beschrieben der erforderlichen höheren Belastung des Dichtrings und schützt außerdem im Bereich der Kontaktflächen „Stahl zu Dichtring“ bzw. „Dichtring zu Glas“ vor Verschmutzung durch einzelne Partikel des Stützkernmaterials.

2.2 Evakuierungsflansch

Die Herstellung der Elemente erfolgt über einen Evakuierungsflansch (EVF), der in dem Abstandhalter integriert ist. An diesen wird nach dem Zusammenbau des Elementes über einen Evakuierungsstutzen eine Evakuierungspumpe angeschlossen, die im Elementinnern ein Vakuum im Bereich von einem Zehntel Millibar erzeugt.



Abbildung 2.10: Evakuierungsflansch im Abstandhalter

Während der Evakuierung wird eine Kugel, die später den Evakuierungsflansch verschließt (als innerer Deckel), durch einen Magneten am Evakuierungsstutzen auf Abstand gehalten (Abbildung 2.11). Sobald der angestrebte Enddruck erreicht ist, wird die Kugel von dem Magneten gelöst, von dem Unterdruck des Elementinnern angezogen und verschließt den Evakuierungsflansch. Um diesen möglichst permeationsdicht zu schließen, lagert die Kugel auf einem Dichtring aus Viton®. Ein weiterer Deckel (äußerer Deckel), der von außen auf den Flansch geschraubt wird, sorgt für den erforderlichen Anpressdruck der Kugel an den Dichtring (Abbildung 2.12). Für die Re-Evakuierung kann der äußere Deckel wieder abgeschraubt und der Evakuierungsstutzen aufgeschraubt werden (Abbildung 2.11).

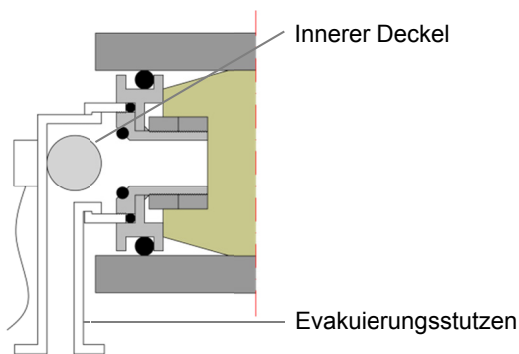


Abbildung 2.11: Prinzip des Evakuierungsflansches - Evakuierungsstutzen auf dem Evakuierungsflansch

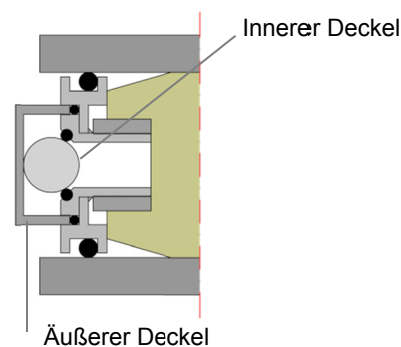


Abbildung 2.12: Prinzip des Evakuierungsflansches – Evakuierungsflansch mit Deckel verschlossen

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den Evakuierungsstutzen und den verschlossenen Evakuierungsflansch im eingebauten Zustand:



Abbildung 2.13: Evakuierungsstutzen für die Evakuierung des VIGS während der Herstellung bzw. für den Fall einer Re-Evakuierung



Abbildung 2.14: Evakuierungsflansch mit Deckel

Nach Einbau des VIGS in die Fassade ist der Evakuierungsflansch nicht sichtbar. Für eine gegebenenfalls erforderliche Re-Evakuierung kann dieser zugänglich gemacht werden und über den Evakuierungsstutzen mit einer Vakuumpumpe verbunden werden.

Für die Integration des Evakuierungsflansches in den Abstandhalter wurden mehrere Optionen untersucht. Das Einschweißen des Flansches erweist sich hier aufgrund der geringen Stegdicke als schwierig bzw. nicht umsetzbar. Deshalb konzentrierten sich diese Möglichkeiten vielmehr auf das Einschrauben und das Einkleben des Flansches mit Ultrahochvakuumkleber.

Das Kleben ermöglicht theoretisch die Verbindung mit geringster Permeation, dennoch ist die Klebnaht – wie oben bereits zum Thema Abstandhalter und Dichtebene beschrieben – sehr anfällig bezogen auf mechanische Beanspruchungen, die jedoch gerade beim Verschließen des Flansches nach der Evakuierung auftreten. Durch das Abdrehen des Evakuierungsstutzens und das Aufdrehen des Deckels treten so hohe Beanspruchungen auf, dass die Klebnaht beeinträchtigt wird.

Das Einschrauben des Evakuierungsflansches wird somit bevorzugt.

Die folgende Abbildung zeigt die Evakuierung eines VIGS unter den bisherigen Laborbedingungen:

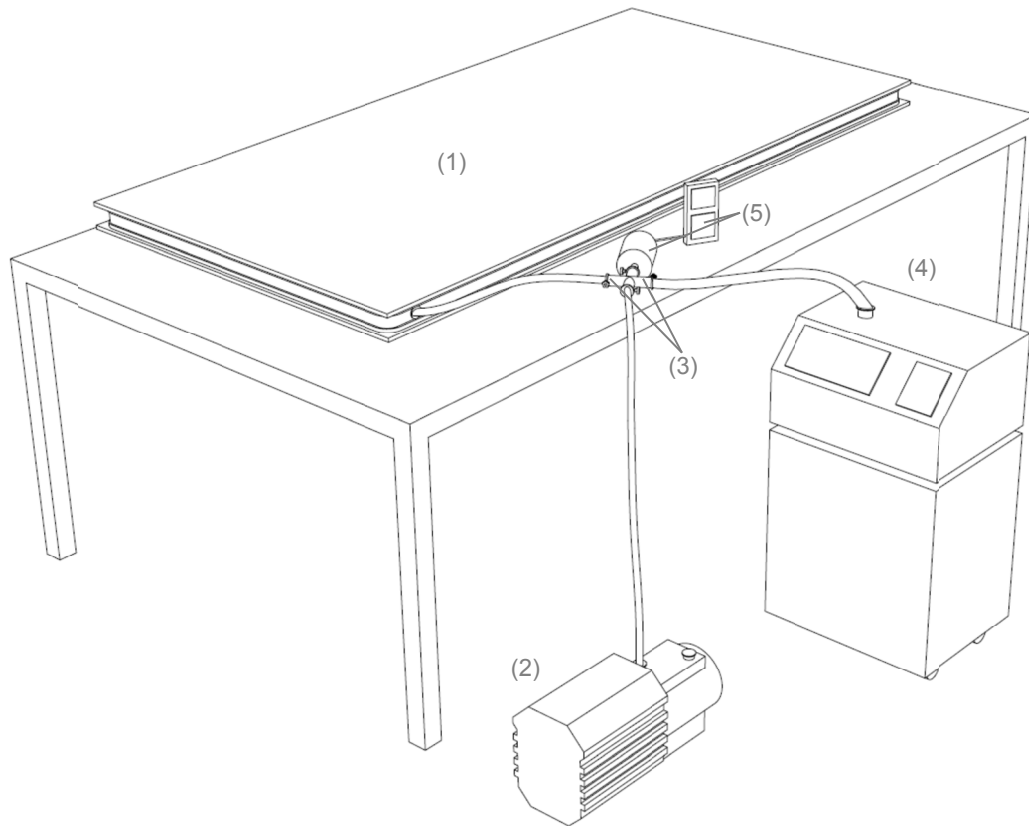


Abbildung 2.15: Herstellung des VIGS unter Laborbedingungen [12]

Bei der Herstellung des VIGS (1) wird das Element zunächst über eine Drehschieberpumpe (2) bis zum Grobvakuum evakuiert (Abbildung 2.15). Dafür wird der oben beschriebene Evakuierungsstutzen auf den Evakuierungsflansch aufgeschraubt und die Kugel mittels eines Magneten von dem Flansch weggezogen bzw. für die Dauer der Evakuierung weggehalten. Nach Erreichen des Grenzwertes einer Drehschieberpumpe wird ein Schieber (3) zwischen VIGS und Drehschieberpumpe geschlossen und ein weiterer Schieber (3) zwischen VIGS und Feinvakuumpumpe (4) geöffnet. Diese evakuiert das Element bis in den Feinvakuumbereich. Nach Erreichen des angestrebten Elementinnendrucks wird zunächst der Magnet der Kugel gelöst, so dass der Flansch verschlossen wird, der Schieber zur Feinvakuumpumpe geschlossen, der Anschlussstutzen abmontiert und der Deckel des Flansches aufgeschraubt.

Die Druckmessung erfolgt kontinuierlich über eine Druckmesseinrichtung (5), die unmittelbar in der Nähe des Evakuierungsflansches mittels eines Kreuzstücks in die Evakuereinrichtung integriert ist.

Der Druck im Element ist über kabellose Drucksensoren des Fraunhofer Instituts messbar. Die ca. 4 mm dicken Sensoren mit einem Durchmesser von ca. 25 mm können problemlos in den Stützkern integriert werden (siehe Abbildung 2.16). Durch Anhalten eines Transponders während bzw. nach der Evakuierung, zeigt dieser den herrschenden Innendruck bis zu einem Druckbereich von 1 mbar an.



Abbildung 2.16: Drucksensor im VIGS und Transponder des Fraunhofer Instituts

Dieses Innendruckmesssystem wurde bereits in Langzeittests an VIPs getestet.

2.3 Wärmeleitfähigkeit und thermische Optimierung des Randverbundes

2.3.1 Allgemein

Ein VIGS weist aufgrund des evakuierten Stützkerns in Elementmitte (ungestörter Bereich) grundsätzlich eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf. Bezogen auf das gesamte Element und den Einbau in die Fassade müssen die Querleitungseffekte im Randbereich des Elementes mit berücksichtigt werden.

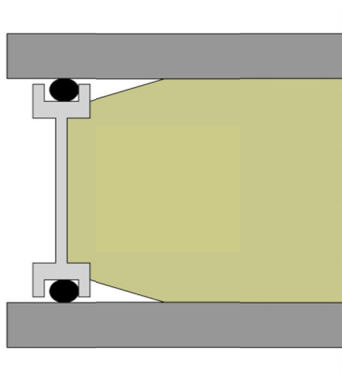


Abbildung 2.17: Querschnitt des VIGS-Abstandhalters

Wie im vorangegangenen Kapitel 2.1 bereits beschrieben, wird der Abstandhalter als I-Profil mit einem 2 mm dicken Steg umgesetzt, mit einer Nut jeweils an Oberseite und Unterseite zwecks Aufnahme des Dichtrings (siehe Abbildung 2.17).

2.3.2 Wärmeleitfähigkeit im ungestörten Bereich

Der Aufbau des VIGS setzt sich im ungestörten Bereich aus zwei Glasdeckschichten und dem dazwischen angeordneten Stützkern aus pyrogener Kieselsäure zusammen. Die Kieselsäure besitzt im angestrebten Feinvakuumbereich eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 5 mW/(m · K).

Rechnerisch ergeben sich für den geschichteten Querschnitt die folgenden thermischen Kennwerte:

Tabelle 2.4: Rechnerisch ermittelte Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangswiderstand des VIGS im ungestörten Bereich (ohne Einfluss des Randbereiches) bei einem Unterdruck von 10^{-2} mbar für eine Stützkerndicke von ca. 40 mm

Zeile	Stützkern	Glasdeckschicht [mm]	$\lambda_{\text{ev. Stützkern}}$ [W/(m · K)]	λ_{VIGS} [W/(m · K)]	R_{VIGS} [(m ² · K)/W]
1	Kieselsäure	2 x 6mm	0,005	0,007	5,78

Das VIGS als Ganzes kann zum einen als Baustoff, ohne die Berücksichtigung der einzelnen Schichten (λ_{VIGS}), und zum anderen als ein aus mehreren Schichten zusammengesetztes Bauteil betrachtet werden (R_{VIGS}). Eine experimentelle Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit

der VIGS kann entweder mit einem Einplatten- oder Zweiplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät erfolgen oder größenbedingt mit einer Wärmeflussplatte und gezielter Temperierung der Probenoberflächen.

Die Untersuchungen zu den Alterungseigenschaften eines VIGS basieren auf einem kleinformatigen Prototypen mit den Abmessungen 500 x 500 x 52 mm. Im Detail setzt er sich aus zwei Glasdeckschichten mit 6 mm Dicke zusammen, einem Stützkern aus gepresster Glasfaser und einem Stahlabstandhalter mit Viton[®]-Dichtringen.

Dieser Prototyp wurde in einer Klimakammer Temperaturen von -10 °C bis 100 °C und Feuchteeinwirkungen von 10% bis 100% ausgesetzt.

Die Wärmeleitfähigkeit des Prototypen wurde vor und nach jeder Klimabelastung mit einem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät der Firma Lambda-Messtechnik gemessen.

Durch die Messung des Wärmestroms und der zugehörigen Temperaturdifferenz im stationären Zustand wird die Wärmeleitfähigkeit der Probe bestimmt. [13]

Gemäß den Vorgaben der DIN EN 52612 [14] wird die Wärmeleitfähigkeit einer Probe bei drei verschiedenen Mitteltemperaturen gemessen – die den üblichen Bautabellen zu entnehmenden Angaben der Wärmeleitfähigkeiten basieren auf einer Wärmeleitfähigkeit, die bei 10 °C gemessen wird.

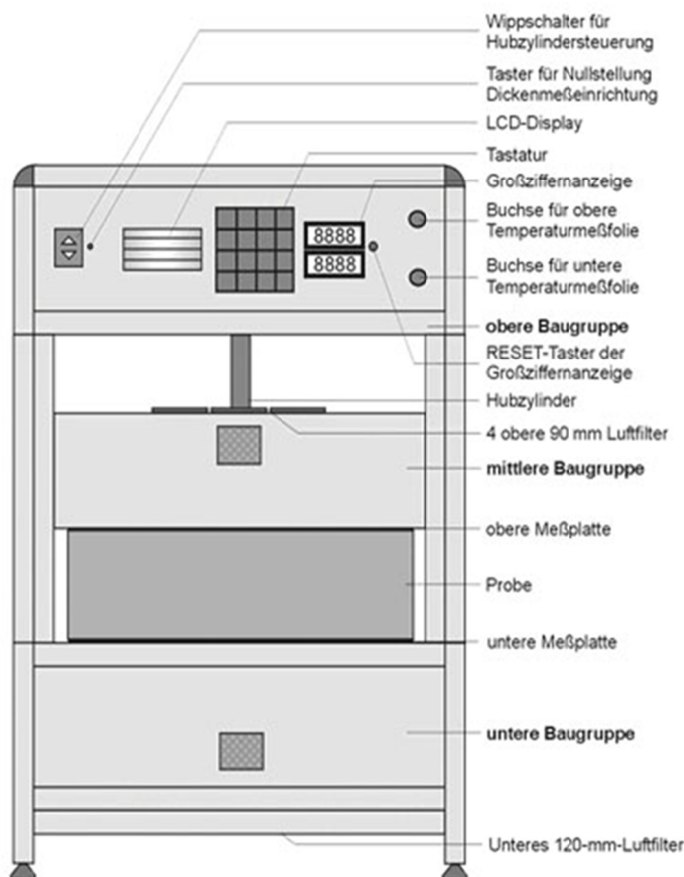


Abbildung 2.18: Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät der Firma Lambda-Messtechnik GmbH Dresden [13]

Die entsprechend ermittelten Wärmeleitfähigkeiten λ_{10} und die jeweils angesetzten Lagerbedingungen in der Klimakammer sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 2.5: Experimentell ermittelte λ_{10} -Messwerte der Proben im künstlich gealterten Zustand im ungestörten Bereich [15]

Zeile	Lagerung	λ_{10} [mW/(m · K)]
1	Ohne Lagerung in Klimakammer, nach Herstellung	3,6
2	5 Tage bei -10°C und 10% relativer Feuchte	3,8
3	5 Tage bei 10°C und 100% relativer Feuchte	3,6
4	5 Tage bei 20°C und 10% relativer Feuchte	3,6
5	5 Tage bei 20°C und 100% relativer Feuchte	3,5
6	5 Tage bei 80°C und 10% relativer Feuchte	3,7
7	5 Tage bei 80°C und 100% relativer Feuchte	3,9
8	14 Tage bei Wechselbeanspruchung: 8h 10°C und 20% relativer Feuchte, 8h 80°C und 60% relativer Feuchte	3,5

Die experimentellen Untersuchungen zur Alterung der kleinformatigen VIGS zeigen keinen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit der VIGS infolge der unterschiedlichen hygrischen oder thermischen Beanspruchungen. Von einem Alterungseinfluss aufgrund klimatischer Einflüsse ist auf Grundlage dieser Untersuchungen der kleinformatigen Prototypen nicht auszugehen.

2.3.3 Wärmeverluste im Randbereich

Der metallische Abstandhalter aus Aluminium weist mit einem $\lambda = 235 \text{ W/(m · K)}$ im Vergleich zu anderen Materialien eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit auf. Um diesen Einfluss möglichst zu minimieren, muss die Geometrie des Abstandhalters thermisch optimiert werden. Diese Optimierung mit Quantifizierung der Wärmebrückeneinflüsse im Randbereich beziehungsweise in der Einbausituation erfolgt auf Grundlage der *Finite-Elemente-Methode*.

Als entsprechende Software wurde das Programm *flixo pro* eingesetzt. Das Programm in der 7. Ausführung ist validiert gemäß EN ISO 10211 [16] validiert und für die Analyse sowie Optimierung von Anschlusskonstruktionen geeignet. Mit dem Programm können wichtige wärmetechnische Kennwerte der Fassade gemäß EN ISO 10077-2 [17] und EN ISO 12631 [18] bestimmt und grafisch dargestellt werden. Das Programm gibt unter anderem den U-Wert im ungestörten Bereich als auch den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ aus. [19]

Um den Einfluss des stark Wärme leitenden Aluminiums im Randbereich quantifizieren und bewerten zu können, wird der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient benötigt. Um diesen am VIGS möglichst zu minimieren, ist der Abstandhalterquerschnitt möglichst weit zu reduzieren.

Begrenzt wird die Reduzierung des Querschnitts durch den erforderlichen Querschnitt um dem hohen Anpressdruck der anfänglichen Fixierung im Randbereich sowie im eingebauten Zustand dem Atmosphärendruck in Höhe von 100 kN/m^2 standzuhalten. Statische Berechnungen fordern hier einen Stegquerschnitt von 2 mm (siehe auch Kapitel 2.1).

Simuliert wird das VIGS im eingebauten Zustand – eingebaut in das Pfosten-Riegel-System THERM⁺ der Firma RAICO Bautechnik GmbH. Für dieses System stehen drei Grundmaterialien für Pfosten und Riegel zur Verfügung:

- Aluminium
- Stahl
- Holz

Die thermisch optimierte Standardeinbausituation sieht einen Dämmblock im Bereich des Elementstoßes bzw. unterhalb der äußeren Fugenabdeckung vor. In den folgenden Details und Berechnungen wird jeweils die Dämmblock 21-Variante des RAICO Therm⁺-Systems betrachtet (Abbildung 2.17).



Abbildung 2.19: Dämmblock Varianten für ein thermisch optimiertes Pfosten-Riegel-System [28]

Die RAICO Therm+ Konstruktion aus Aluminium gibt es als A-V- und als A-I-System. Sie unterscheiden sich in Form und Einsatzbereich. Beide Systeme können als wärmedämmte Fassade, Passivhaus-Fassaden, SG-Fassaden und als Fassade mit Einbruchhemmung eingesetzt werden. Die A-I Profile sind außerdem für geneigte Glasdächer bis 2° Neigung geeignet. Die A-V Variante ist besonders geeignet für filigrane und rationelle Vorhangfassadenlösungen, mit reduzierten Dichtungsansichten auf der Innenseite. [20]

Die Aluminiumprofile stehen als Rechteckprofile, Dehnprofile und T-Profile in unterschiedlichen Breiten zur Verfügung.

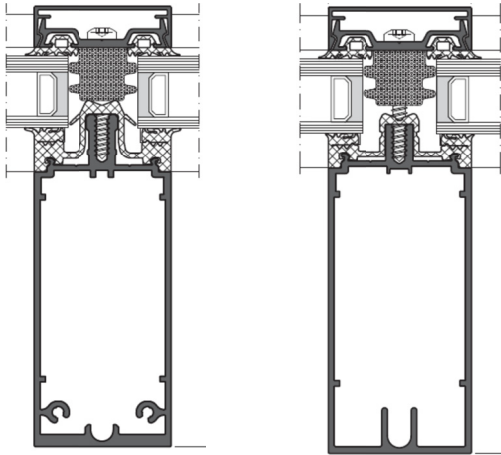


Abbildung 2.20: A-I- und A-V-System der Pfosten-Riegel-Konstruktion aus Aluminium der Firma RAICO [21]

Die RAICO Therm+ Konstruktion S-I aus Stahl kann als wärmege­dämmte Fassade, Passivhaus-Fassade, SG-Fassade, Fassade mit Einbruchhemmung und für geneigte Glasdächer bis 2° Neigung eingesetzt werden. Der Einsatz als Brandschutzfassade ist möglich. [22]

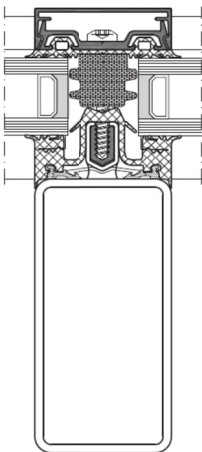


Abbildung 2.21: S-I-System der Pfosten-Riegel-Konstruktion aus Stahl der Firma RAICO [21]

Die RAICO Therm+ Konstruktion aus Holz gibt es als H-V- und als H-I-System. Die Ausführungen unterscheiden sich in Form und Einsatzbereich. H-V-Systeme werden vergleichbar zum System RAICO Therm+ A-V eingesetzt, H-I-Systeme vergleichbar zu RAICO Therm+ S-I-Systemen. [22]

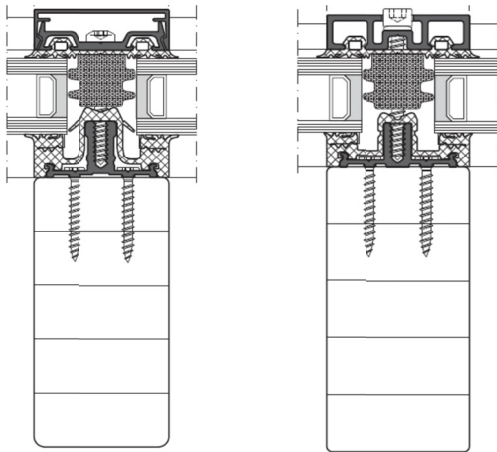


Abbildung 2.22: H-I- und H-V-System der Pfosten-Riegel-Konstruktion aus Holz der Firma RAICO [21]

Das Basissystem der Holzfassade gibt es in den Systembreiten 50, 56 und 76 mm.

Zwecks Untersuchung der thermischen Eigenschaften der Abstandhaltergeometrie werden die Simulationen zunächst nur am Pfosten-Riegel-System aus Aluminium untersucht. Die Berechnungen basieren auf einem A-V-System der Breite 50 mm.

Die Tabelle 2.7 zeigt quantitativ den thermischen Einfluss der Querschnittreduzierung von einem Vollprofil auf ein I-Profil mit statisch erforderlicher Stegdicke von 2 mm sowie einer weiteren – nur hier in der Theorie durchgeführten – Reduzierung auf eine Stegdicke von 1 mm. Des Weiteren wird ein Austausch des Stegmaterials betrachtet – das Aluminium mit einer Wärmeleitfähigkeit von $160 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ wird gegen Edelstahl mit einer Wärmeleitfähigkeit von $30 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ausgetauscht.

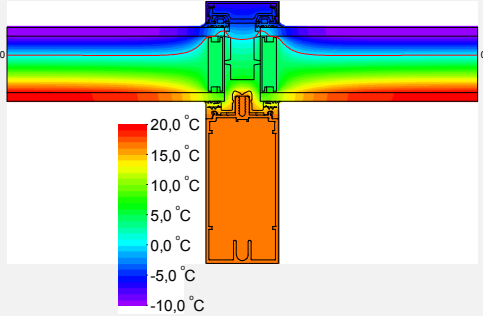
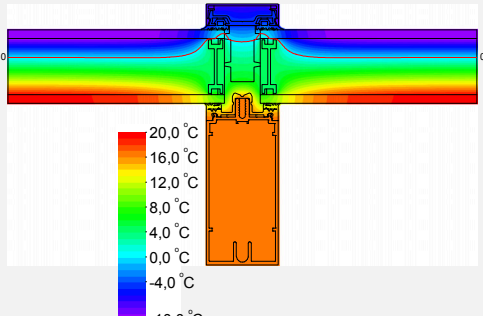
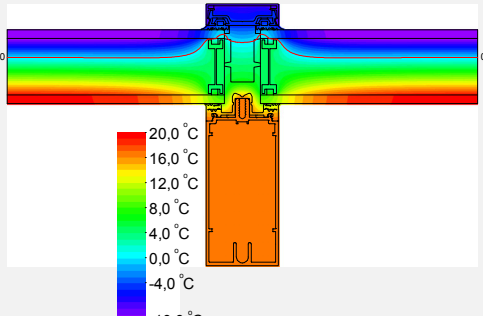
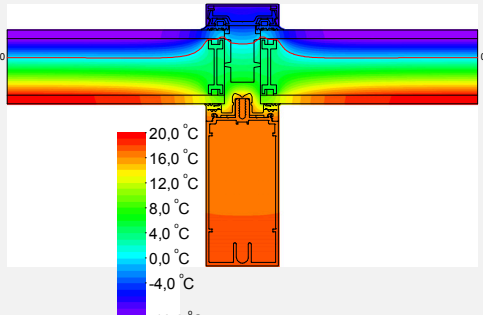
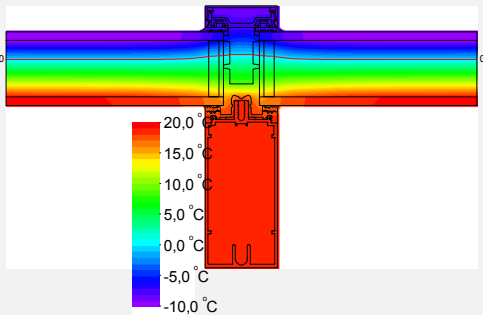
Ergänzt werden diese Ansätze um die Betrachtung eines VIP-Fassadenpanels, eingebaut in die oben beschriebene Aluminium-Pfosten-Riegel-Konstruktion.

Die einzelnen Konstruktionen sind in der folgenden Tabelle vorweg dargestellt (Tabelle 2.6).

Tabelle 2.6: Darstellung der Konstruktionen zur thermischen Optimierung des Abstandhalters

Zeile	Konstruktion	Aufbau der Konstruktion																					
1	VIGS-Fassadenpaneel Abstandhalter: Al-Vollprofil (d = 10 mm)	<table><thead><tr><th>Material</th><th>λ[W/(m·K)]</th></tr></thead><tbody><tr><td>Aluminium</td><td>237,00</td></tr><tr><td>Aluminiumlegierungen</td><td>160,00</td></tr><tr><td>Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)</td><td>0,24</td></tr><tr><td>Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)</td><td>0,25</td></tr><tr><td>Natronglas (inkl. Floatglas)</td><td>1,00</td></tr><tr><td>Stahl</td><td>50,00</td></tr><tr><td>Unbelüftete Hohlräume</td><td></td></tr><tr><td>Viton</td><td>0,18</td></tr><tr><td>evakuierte Kieselsäure</td><td>0,00</td></tr></tbody></table>	Material	λ [W/(m·K)]	Aluminium	237,00	Aluminiumlegierungen	160,00	Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,24	Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,25	Natronglas (inkl. Floatglas)	1,00	Stahl	50,00	Unbelüftete Hohlräume		Viton	0,18	evakuierte Kieselsäure	0,00	
Material	λ [W/(m·K)]																						
Aluminium	237,00																						
Aluminiumlegierungen	160,00																						
Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,24																						
Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,25																						
Natronglas (inkl. Floatglas)	1,00																						
Stahl	50,00																						
Unbelüftete Hohlräume																							
Viton	0,18																						
evakuierte Kieselsäure	0,00																						
2	VIGS-Fassadenpaneel Abstandhalter: Standard-Al-I-Profil (Stegdicke 2 mm)	<table><thead><tr><th>Material</th><th>λ[W/(m·K)]</th></tr></thead><tbody><tr><td>Aluminium</td><td>237,000</td></tr><tr><td>Aluminiumlegierungen</td><td>160,000</td></tr><tr><td>Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)</td><td>0,240</td></tr><tr><td>Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)</td><td>0,250</td></tr><tr><td>Natronglas (inkl. Floatglas)</td><td>1,000</td></tr><tr><td>Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch</td><td>30,000</td></tr><tr><td>Unbelüftete Hohlräume</td><td></td></tr><tr><td>Viton</td><td>0,180</td></tr><tr><td>evakuierte Kieselsäure</td><td>0,005</td></tr></tbody></table>	Material	λ [W/(m·K)]	Aluminium	237,000	Aluminiumlegierungen	160,000	Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,240	Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,250	Natronglas (inkl. Floatglas)	1,000	Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch	30,000	Unbelüftete Hohlräume		Viton	0,180	evakuierte Kieselsäure	0,005	
Material	λ [W/(m·K)]																						
Aluminium	237,000																						
Aluminiumlegierungen	160,000																						
Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,240																						
Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,250																						
Natronglas (inkl. Floatglas)	1,000																						
Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch	30,000																						
Unbelüftete Hohlräume																							
Viton	0,180																						
evakuierte Kieselsäure	0,005																						
3	VIGS-Fassadenpaneel Abstandhalter: Al-I-Profil (Stegdicke 1 mm)	<table><thead><tr><th>Material</th><th>λ[W/(m·K)]</th></tr></thead><tbody><tr><td>Aluminium</td><td>237,000</td></tr><tr><td>Aluminiumlegierungen</td><td>160,000</td></tr><tr><td>Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)</td><td>0,240</td></tr><tr><td>Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)</td><td>0,250</td></tr><tr><td>Natronglas (inkl. Floatglas)</td><td>1,000</td></tr><tr><td>Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch</td><td>30,000</td></tr><tr><td>Unbelüftete Hohlräume</td><td></td></tr><tr><td>Viton</td><td>0,180</td></tr><tr><td>evakuierte Kieselsäure</td><td>0,005</td></tr></tbody></table>	Material	λ [W/(m·K)]	Aluminium	237,000	Aluminiumlegierungen	160,000	Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,240	Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,250	Natronglas (inkl. Floatglas)	1,000	Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch	30,000	Unbelüftete Hohlräume		Viton	0,180	evakuierte Kieselsäure	0,005	
Material	λ [W/(m·K)]																						
Aluminium	237,000																						
Aluminiumlegierungen	160,000																						
Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,240																						
Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,250																						
Natronglas (inkl. Floatglas)	1,000																						
Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch	30,000																						
Unbelüftete Hohlräume																							
Viton	0,180																						
evakuierte Kieselsäure	0,005																						
4	VIGS-Fassadenpaneel Abstandhalter: Edelstahl-I-Profil (Stegdicke 2 mm)	<table><thead><tr><th>Material</th><th>λ[W/(m·K)]</th></tr></thead><tbody><tr><td>Aluminiumlegierungen</td><td>160,000</td></tr><tr><td>Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)</td><td>0,240</td></tr><tr><td>Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)</td><td>0,250</td></tr><tr><td>Natronglas (inkl. Floatglas)</td><td>1,000</td></tr><tr><td>Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch</td><td>30,000</td></tr><tr><td>Unbelüftete Hohlräume</td><td></td></tr><tr><td>Viton</td><td>0,180</td></tr><tr><td>evakuierte Kieselsäure</td><td>0,005</td></tr></tbody></table>	Material	λ [W/(m·K)]	Aluminiumlegierungen	160,000	Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,240	Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,250	Natronglas (inkl. Floatglas)	1,000	Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch	30,000	Unbelüftete Hohlräume		Viton	0,180	evakuierte Kieselsäure	0,005			
Material	λ [W/(m·K)]																						
Aluminiumlegierungen	160,000																						
Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,240																						
Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,250																						
Natronglas (inkl. Floatglas)	1,000																						
Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch	30,000																						
Unbelüftete Hohlräume																							
Viton	0,180																						
evakuierte Kieselsäure	0,005																						
5	VIP-Fassadenpaneel (in Anlehnung an [23])	<table><thead><tr><th>Material</th><th>λ[W/(m·K)]</th></tr></thead><tbody><tr><td>Aluminiumlegierungen</td><td>160,000</td></tr><tr><td>Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)</td><td>0,240</td></tr><tr><td>Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)</td><td>0,250</td></tr><tr><td>Natronglas (inkl. Floatglas)</td><td>1,000</td></tr><tr><td>Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch</td><td>30,000</td></tr><tr><td>Polysulfid</td><td>0,400</td></tr><tr><td>Purenit</td><td>0,080</td></tr><tr><td>Unbelüftete Hohlräume</td><td></td></tr><tr><td>Vacucomp S, Vacucomp P1, Vacucomp P2 (1)</td><td>0,008</td></tr></tbody></table>	Material	λ [W/(m·K)]	Aluminiumlegierungen	160,000	Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,240	Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,250	Natronglas (inkl. Floatglas)	1,000	Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch	30,000	Polysulfid	0,400	Purenit	0,080	Unbelüftete Hohlräume		Vacucomp S, Vacucomp P1, Vacucomp P2 (1)	0,008	
Material	λ [W/(m·K)]																						
Aluminiumlegierungen	160,000																						
Butylkautschuk (Isobuten-Kautschuk)	0,240																						
Ethylen-Propylenedien, Monomer (EPDM)	0,250																						
Natronglas (inkl. Floatglas)	1,000																						
Nichtrostender Stahl, ferritisch oder martensitisch	30,000																						
Polysulfid	0,400																						
Purenit	0,080																						
Unbelüftete Hohlräume																							
Vacucomp S, Vacucomp P1, Vacucomp P2 (1)	0,008																						

Tabelle 2.7: Einfluss der Querschnittreduzierung und der Materialauswahl auf den linearen Wärmedurchgangskoeffizient des Randverbundes

Zeile	Konstruktion	Linearer Wärmedurchgangskoeffizient Ψ [W/(m · K)]	
1	Al-Vollprofil (d = 10 mm)	0,350	
2	Standard: Al-I-Profil (Stegdicke 2 mm)	0,347	
3	Al-I-Profil (Stegdicke 1 mm)	0,346	
4	Edelstahl-I-Profil (Stegdicke 2 mm)	0,327	
5	Konventionelles Fassadenpaneel im Randbereich	0,128	

Vergleicht man die Ergebnisse der Zeilen 2 und 5 wird deutlich, dass die Wärmeverluste im Randbereich des VIGS mit $0,347 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ gegenüber dem VIP-Fassadenpaneel mit $0,128 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ relativ hoch sind. Eine thermische Optimierung des Standardabstandhalters durch Reduzierung der Stegdicke auf 1 mm ist nicht zielführend. Mit einem Austausch des Abstandhaltermaterials von Aluminium gegen das geringer Wärme leitende Edelstahl, würde eine Reduzierung der linearen Wärmeverluste im Randbereich von ca. 5% resultieren. Der zugehörige Ψ -Wert ist mit $0,327 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ jedoch immer noch ein Vielfaches des Ψ -Wertes der konventionellen VIP-Lösung. Der Edelstahlabstandhalter wäre dennoch bei einer gegebenenfalls zukünftigen industriellen Serienfertigung vorzuziehen.

Abschließend wird somit als Querschnitt für den Abstandhalter die Geometrie aus Tabelle 2.7. Zeile 2 – ein I-Profil mit einer 2 mm dicken Stegdicke – festgelegt, mit der Empfehlung, bei Einführen einer industriellen Serienfertigung Edelstahl als Abstandhaltermaterial zu verwenden.

Mit dem oben festgelegten Standardabstandhalter aus Aluminium und einer Stegdicke von 2 mm werden nun noch einmal die unterschiedlichen Pfosten-Riegel-Konstruktionen betrachtet. Das oben bereits untersuchte Pfosten-Riegel-System aus Aluminium wird hier wie bereits erläutert als A-V-System mit einer Breite von 50 mm angesetzt.

Das Pfosten-Riegel-System aus Stahl und das System aus Holz werden ebenfalls mit einer Breite von 50 mm angesetzt.

Die drei folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse dieser Betrachtung.

Tabelle 2.8: Pfosten-Riegel-Fassade aus Aluminium mit Dämmblock und VIGS als Fassadenpaneel (1 = Deckleiste, 2 = Pressleiste, 3 = Pressleistendichtung, 4 = VIGS, 5 = Schraube, 6 = Pfostendichtung, 7 = Pfosten; Darstellung begrenzt auf gestörten Bereich) [1]

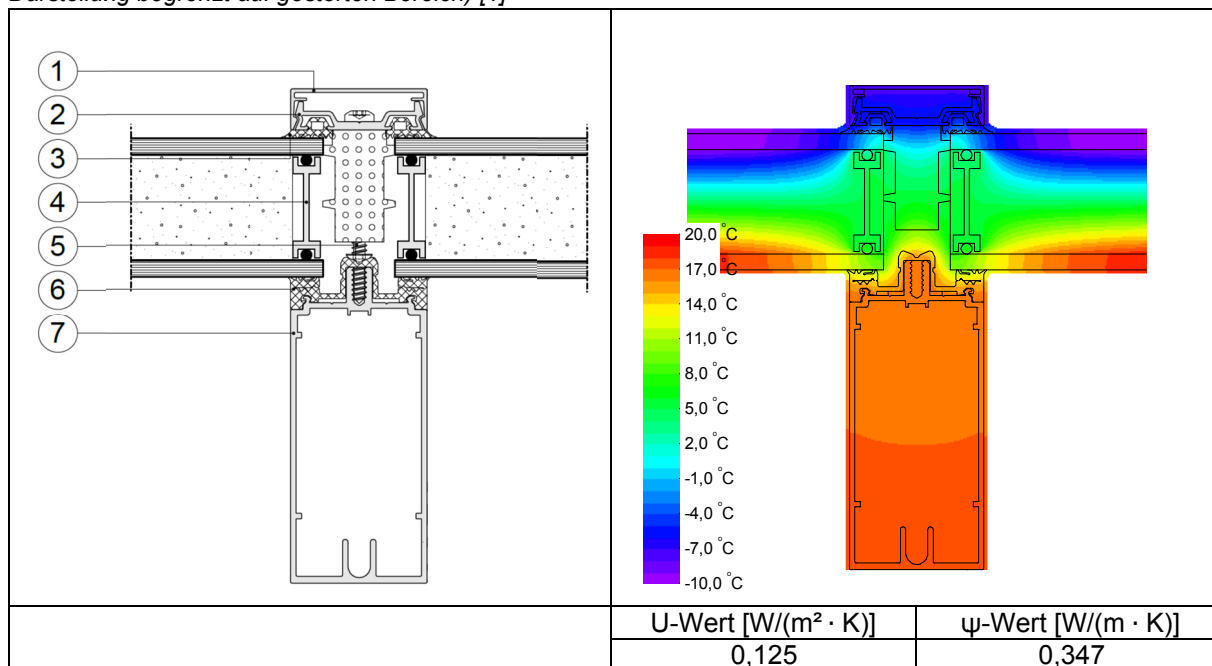


Tabelle 2.9: Pfosten-Riegel-Fassade aus Stahl mit Dämmblock und VIGS als Fassadenpaneel (1 = Deckleiste, 2 = Pressleiste, 3 = Pressleistendichtung, 4 = VIGS, 5 = Schraube, 6 = Pfostendichtung, 7 = Pfosten; Darstellung begrenzt auf gestörten Bereich) [1]

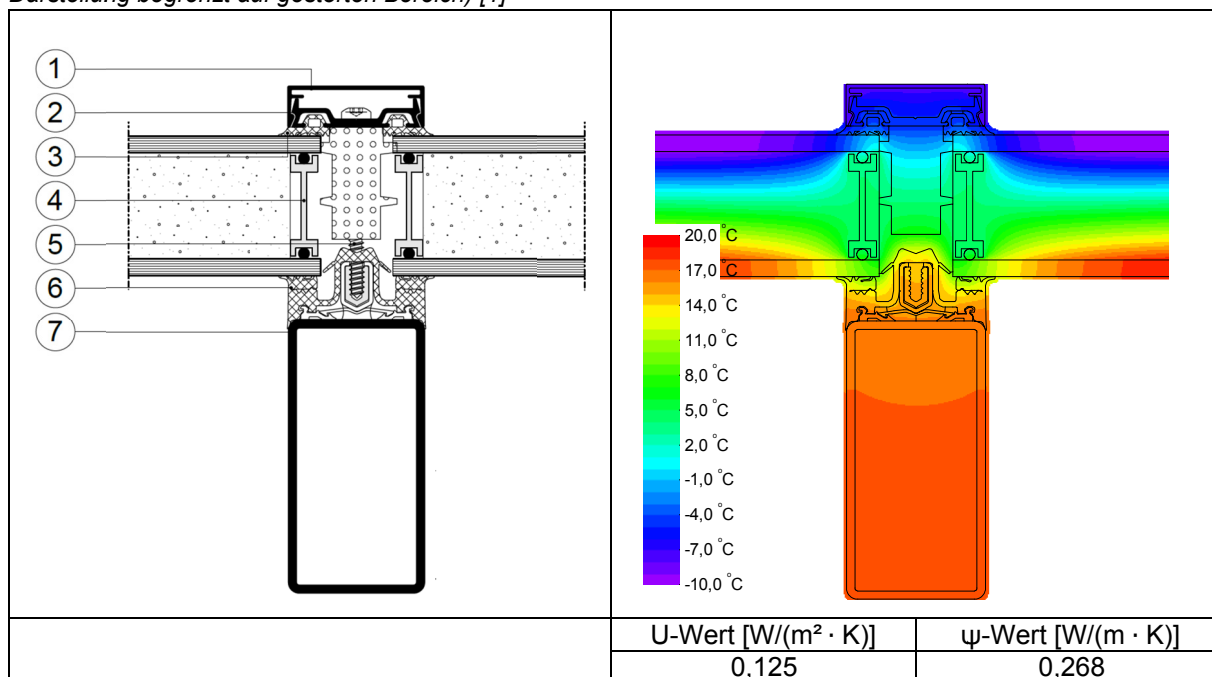
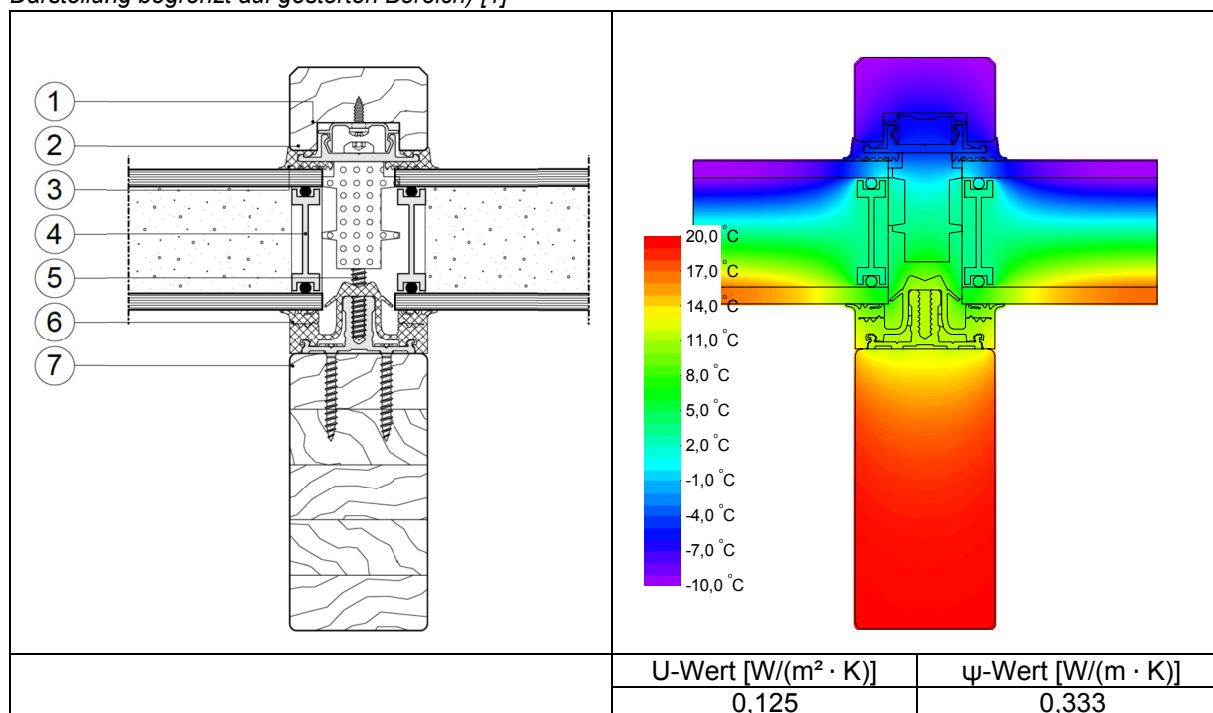


Tabelle 2.10: Pfosten-Riegel-Fassade aus Holz mit Dämmblock und VIGS als Fassadenpaneel (1 = Deckleiste, 2 = Pressleiste, 3 = Pressleistendichtung, 4 = VIGS, 5 = Schraube, 6 = Pfostendichtung, 7 = Pfosten; Darstellung begrenzt auf gestörten Bereich) [1]



Ein Kompendium mit VIGS-Anschlussdetails in einem Pfosten-Riegel-System wurde in Zusammenhang mit einem Abschlussbericht zu einem Forschungsvorhaben erstellt und veröffentlicht. [1]

3. GRUNDLAGEN ZUR UNTERSUCHUNG DER DAUERHAFTIGKEIT EINES VIGS

3.1 Allgemein

Die hochdämmende Eigenschaft der VIGS wird im Wesentlichen bestimmt durch den im Innern des Elementes herrschenden Druck.

Das Vakuum im Innern des VIGS wird mit einem Druck von 0,1 mbar als Feinvakuum eingestuft. Im Feinvakuum bewegen sich ca. $1,0 \cdot 10^{16}$ bis $1,0 \cdot 10^{13}$ Moleküle pro cm^3 während sich auf der anderen Seite des Hüllmaterials unter Atmosphärendruck (1.013,25 mbar) ca. $2,7 \cdot 10^{19}$ Moleküle bewegen. Aufgrund des Differential- und Partialdruckunterschiedes zwischen dem Vakuum im Innern des Elementes und dem Atmosphärendruck auf der Außenseite gibt es ein Bestreben der einzelnen Moleküle, von der Seite der größeren Konzentration auf die Seite der geringeren Konzentration zu wandern.

Bezogen auf die Bestandteile des VIGS müssen vor diesem Hintergrund drei Arten des Stofftransports unterschieden werden:

- konstruktiv bedingter Stofftransport durch Diskontinuitäten in den Kontaktflächen der einzelnen Hüllmaterialien,
- materialbedingter Stofftransport durch den Festkörper,
- materialbedingte Ausgasung der Festkörper

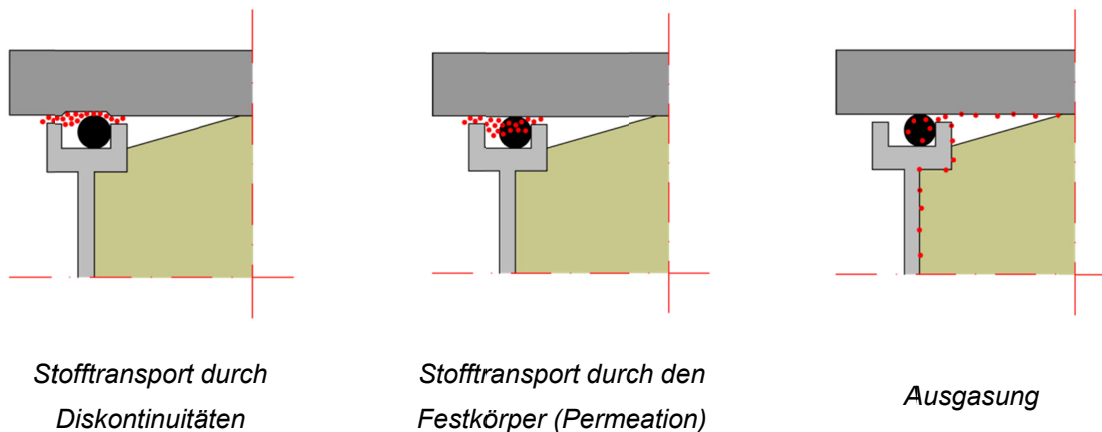


Abbildung 3.1: Stofftransport durch die Elementhülle eines VIGS und Ausgasung der unter Vakuum befindlichen Materialien

Aufgrund dieses Stofftransports kommt es zu einem Druckanstieg im Elementinnern, der mit einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des gesamten Elementes und damit einer reduzierten Dauerhaftigkeit einhergeht.

Im Folgenden werden die drei Arten des Stofftransports insbesondere bezogen auf das VIGS, detailliert erläutert sowie entsprechende Messverfahren einschließlich Messgeräte und die resultierende Dauerhaftigkeit beschrieben.

3.2 Gasströmung: Stofftransport durch Diskontinuitäten

3.2.1 Definition Gasströmung

Die folgenden Betrachtungsansätze beziehen sich auf eine Gasströmung in einer „Rohrleitung“, die hier gleichgesetzt wird mit einem Leckkanal. [24] Die Gasströmung ist dabei definiert als eine Strömung eines Gases in einer Zeit durch ein Bauteil, dessen Stromgröße abhängig ist von dem Druck selbst, der Druckdifferenz, der Art des Gases und der Temperatur. [24]

Die Rohrleitung bzw. der Leckkanal stehen im Folgenden für eine Fehlstelle in der ansonsten gasdichten Hülle eines evakuierten Raumes, die dazu führt, dass es zu einem ungehinderten, konstanten Gasstrom von der Seite höheren Drucks zur Seite niedrigeren Drucks kommt. Diese Fehlstelle wird im Weiteren bezogen auf die VIGS-Hülle als *Diskontinuität* bezeichnet.

Die zugehörige Leckagerate q_{pV} kann in Zusammenhang mit stationären Pumpen, die das Elementinnere evakuieren, in Abhängigkeit ihrer Saugleistung S und des jeweilig erreichbaren Enddrucks p innerhalb der beschädigten Hülle wie folgt beschrieben werden:

$$q_{pV} = p \cdot S \quad [25] \quad (3.1)$$

Mit	q_{pV}	Leckagerate [mbar · dm ³ /s]
	p	Druck [mbar]
	S	Saugleistung [dm ³ /s]

Mittels der Zustandsgleichung für ideale Gase und der Umrechnung der Saugleistung in Abhängigkeit von Volumen und Zeit kann diese Gleichung wie folgt umgeschrieben werden:

$$q_{pV} = \frac{p \cdot V}{t} = \frac{m}{t} \cdot \frac{R \cdot T}{M} \quad [26] \quad (3.2)$$

Mit	q_{pV}	Leckagerate [mbar · dm ³ /s]
	p	Innendruck [mbar]
	V	Volumen [dm ³]
	t	Zeit [s]
bzw.	m	Masse [kg]
	t	Zeit [s]
	R	molare Gaskonstante [J/(mol · K)]
	T	Temperatur [K]
	M	molare Masse der betrachteten Gasart [kg/mol]

Das Strömungsverhalten in dem Leckkanal wird wiederum bestimmt durch die jeweils vorhandenen Druck-, Trägheits- und Reibungskräfte und kann durch die folgenden drei Strömungsarten beschrieben werden [27]:

- molekulare Strömung (Leckagerate $q_{pV} > 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$)
- Übergangsströmung
- laminare Strömung (Leckagerate $q_{pV} < 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$) (auch viskose Strömung genannt)

Die molekulare Strömung ist definiert als eine Strömung, bei der der Stoß einzelner Teilchen untereinander nahezu nicht eintritt. Beeinflusst wird diese Form der Strömung von der thermischen Teilchengeschwindigkeit \bar{c} . Dieser Zustand tritt ein, wenn ein geringer Druck herrscht und somit wenige Teilchen vorhanden sind. [27]

Die Knudsen-Strömung bzw. Übergangs-Strömung ist definiert als eine Strömung, bei der der Zusammenstoß einzelner Teilchen genauso häufig eintritt, wie der Zusammenstoß einzelner Teilchen mit der Wandung. Dieser Zustand ist ein Übergangszustand von molekularer zu laminarer Strömung. [27]

Die laminare (viskose) Strömung bzw. Kontinuumströmung ist definiert als Strömung, bei der es zu sehr vielen Zusammenstößen der einzelnen Teilchen kommt – die mittlere freie Weglänge der Teilchen ist hier kleiner als der Leitungsquerschnitt. Das Gas verhält sich wie ein homogenes Fluid. Dieser Zustand tritt ein, wenn ein hoher Druck herrscht und somit viele Teilchen vorhanden sind. [27]

3.2.2 Diskontinuitäten am VIGS

Infolge von Oberflächenunebenheiten einzelner in Kontakt stehender Materialien einer VIGS-Hülle kann es in den jeweiligen Kontaktebenen zu den oben angesprochenen Diskontinuitäten kommen. Durch diese Diskontinuitäten kommt es dann zu einem Stofftransport von der Seite höheren Drucks in das evakuierte Elementinnere.

Die relevanten hier zu betrachtenden Materialien sind die folgenden:

- Glas: Klarglas, Siebdruck- oder Emaillebeschichtung
- Abstandhalter: Aluminium
- Dichtring: Viton[®] oder Aflas[®]

Neben den natürlich- bzw. herstellbedingten Unebenheiten der Materialien können auch fahrlässig verursachte Schäden an den Oberflächen, wie Kratzer auf der Glasfläche, Risse in dem Dichtring oder gerissene Schweißnähte zu Diskontinuitäten und damit zum Stofftransport führen. Die damit verbundenen Leckkanäle sind unregelmäßig geformt und weisen somit keine einheitlichen Strömungsverhältnisse auf: An der Atmosphärenseite herrschen laminare Strömungsverhältnisse, auf der evakuierten Seite molekulare Strömungsverhältnisse. [28]

3.3 Permeation: Stofftransport durch den Festkörper

3.3.1 Definition Permeation

Als Permeation (lat. für Durchdringung) wird der Stofftransport auf molekularer Ebene durch eine in makroskopischer Hinsicht porenfreie Membran bezeichnet. [29]

Die Permeation besteht aus drei Einzelschritten:

- Adsorption = die gasförmigen Teilchen haften an der Oberfläche des Festkörpers auf der Atmosphärenseite
- Diffusion = der Festkörper wird auf molekularer Ebene von den gasförmigen Teilchen in Richtung niedrigerer Gaskonzentration durchdrungen (Platzwechselprozess)
- Desorption = die gasförmigen Teilchen entweichen dem Festkörper auf der anderen Seite in das evakuierte Innere des Elementes

Die ersten beiden Schritte können in Anlehnung an das *Henrysche* Löslichkeitsgesetz beschrieben werden:

$$c_0 = \sigma \cdot p_{\text{Gasraum}} \quad [30] \quad (3.3)$$

Mit	c_0	Gaskonzentration an der Oberfläche der Probe [M/atm]
	σ	Löslichkeitskoeffizient [M]
	p_{Gasraum}	Druck des Gases im Gasraum (=Begasungsdruck) [atm]

Auf der Außenseite der Vakuumschleife steht ein kontinuierlich hoher Gasdruck an - in Abhängigkeit des Löslichkeitskoeffizienten dringen die Moleküle von dieser Seite höheren Drucks in das Hüllmaterial bzw. aus dem Hüllmaterial in das evakuierte Elementinnere.

Grundlage des zweiten Schrittes sind die Fickschen Gesetze, hier insbesondere das zweite Ficksche Gesetz:

$$\frac{\partial c_{\text{Probe}}}{\partial t} = D \cdot \Delta c_{\text{Probe}} \quad [30] \quad (3.4)$$

Mit	c_{Probe}	Gaskonzentration in der Probe [mol/m ³]
	t	Zeit [s]
	D	Diffusionskoeffizient [cm ² /s]
	Δ	Laplace-Operator [-]

Der Diffusionskoeffizient ist abhängig von dem jeweils betrachteten Material, das durchdrungen wird und dem durchdringenden Gas. Da der Diffusionskoeffizient ein temperaturabhängiger Wert ist, ist auch der Zustand der Permeation temperaturabhängig.

Die Teilchenwanderung erfolgt über Zwischengitterplätze im Material, über Fehlstellen des Gitters oder längs der Korngrenzen der Kristallite. [28] Im Vergleich zu der Möglichkeit der

Absorption und Adsorption stehen den Teilchen im Material deutlich mehr Gitterplätze zum Verbleiben zur Verfügung, weshalb die in Summe absorbierte Gasmenge größer ist als die adsorbierte Gasmenge.

Die Leckagerate q infolge der Permeation – auch Permeationsgasstrom genannt – ist wie folgt definiert:

$$q_{perm} = K_{perm.} \cdot \frac{A}{d_{perm}} \cdot (p_1 - p_2) \quad [28] \quad (3.5)$$

Mit	q_{perm}	Permeationsrate/Permeationsgasstrom $\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}}\right]$
	$K_{perm.}$	Permeabilität $[\text{dm}^2/\text{s}]$
	d_{perm}	Permeationslänge (Wanddicke) $[\text{dm}]$
	A	Wandfläche $[\text{dm}^2]$
	$p_1 - p_2$	Druckdifferenz zwischen außen herrschenden Atmosphärendruck und innen herrschendem Vakuum $[\text{mbar}]$

Die Permeationsrate verhält sich somit linear zur Querschnittsfläche und der Druckdifferenz bzw. proportional zur Permeationslänge. [28]

Quantitativ bestimmt werden kann die Permeationsrate bzw. der Permeationsgasstrom durch Messung (siehe Kapitel 3.5) oder über die Permeationsleitfähigkeit $\bar{q}_{perm.}$.

Die Permeationsleitfähigkeit $\bar{q}_{perm.}$ ist der auf die Fläche $A = 1 \text{ m}^2$, die Dicke $d = 1 \text{ mm}$ und die Druckdifferenz $101,3 \text{ kPa}$ bezogene Permeationsgasstrom:

$$\bar{q}_{perm.} = q_{perm} \cdot \frac{d_{perm}}{A} \cdot \frac{1}{p_1 - p_2} \quad [31] \quad (3.6)$$

Mit	$\bar{q}_{perm.}$	Permeationsleitfähigkeit $\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{m}^2 \cdot \text{bar}}\right]$
	q_{perm}	Permeationsrate / Permeationsgasstrom $\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{dm}^3}{\text{s}}\right]$
	d_{perm}	Wanddicke/Permeationslänge $[\text{mm}]$
	A	Wandfläche $[\text{m}^2]$
	$p_1 - p_2$	Druckdifferenz zwischen außen herrschendem Atmosphärendruck und innen herrschendem Vakuum $[\text{kPa}]$

Dieser Wert ist der Literatur für verschiedene Materialien zu entnehmen und ermöglicht damit das Umrechnen auf die Permeationsrate.

Bei der messtechnischen Bestimmung der Permeationsrate wird das zu untersuchende Material dauerhaft mit einem Gas beaufschlagt. Die durchdringende Gasrate stagniert nach einer gewissen Anlaufzeit bzw. Induktionszeit t_i :

$$t_i = \frac{L_{perm}^2}{2 \times D} \quad [s] \quad [28] \quad (3.7)$$

Mit	t_i	Induktionszeit [s]
	L_{perm}	Permeationsstrecke [m]
	D	Diffusionskoeffizient [m ² /s]

Nach Erreichen dieser Induktionszeit ist der 62%ige Endwert der Permeationsrate erreicht. Nach der dreifachen Induktionszeit ist der 99%ige Endwert der Permeationsrate erreicht. [28]

3.3.2 Permeation am VIGS

Der Einfluss der Glasdeckschichten und des metallischen Abstandhalters auf die Gesamt-Permeationsrate von Gasen durch die Elementhülle in das evakuierten VIGS-Innere ist aufgrund der bekannten geringen Permeationsleitfähigkeiten dieser Materialien (siehe Kapitel 2.1) in Summe ebenfalls gering und wird vor diesem Hintergrund vernachlässigt. [31]

Das wesentliche permeable Material in der VIGS-Hülle ist der Dichtring. Entsprechend den Angaben der Literatur weist Viton® bei Raumtemperaturen von 20°C eine Permeationsleitfähigkeit von $\bar{q}_{perm} = 3 \cdot 10^{-3} \frac{mbar \cdot dm^3}{s} \cdot \frac{mm}{m^2 \cdot bar}$ auf und hebt sich damit wesentlich positiv von anderen üblichen Dichtmaterialien wie z.B. Silikongummi mit $\bar{q}_{perm} = 3 \cdot 10^{-1} \frac{mbar \cdot dm^3}{s} \cdot \frac{mm}{m^2 \cdot bar}$ ab. [31]

Viton® gibt es in unterschiedlichen Ausführungen – abgesehen von der Dicke des Rings, die als Permeationslänge in die Berechnung der Permeationsrate q_{perm} rechnerisch eingeht (siehe Gleichung 3.5 der Permeationsgasstrom nimmt proportional zur Permeationslänge ab), stehen die Ringe auch in unterschiedlichen Härten (Shore) zur Verfügung. Der Einfluss dieser Härte auf die Permeationsleitfähigkeit sowie der Einfluss der Dicke werden in Zusammenhang mit den Einbaubedingungen in einem VIGS im Rahmen dieser Arbeit genauer untersucht.

Des Weiteren wird auch das Material Aflas® als mögliche Alternative zu Viton® untersucht. Aflas® wird bei einer Härte von 92 IRHD mit einer geringen Permeationsleitfähigkeit beworben, weshalb diese Eigenschaft näher untersucht werden soll (siehe Kapitel 2.1).

3.4 Ausgasverhalten von Werkstoffen

3.4.1 Definition Ausgasung

Das Ausgasverhalten eines Werkstoffes wird in der Vakuumtechnik auch als *scheinbares Leck* bezeichnet. Es ist kein reales Leck, durch das Gas in den evakuierten Raum strömt, aber dennoch führt es aufgrund einer kontinuierlichen Gasabgabe zu einem reduzierten Enddruck während des Evakuervorgangs.

Die hier betrachtete Ausgasung bezieht sich auf den Zustand der anfänglichen Evakuierung. Hier basiert die Gasabgabe in Form einer Desorption auf dem Bestreben der Materialien im belüfteten Normzustand bei 0 °C und 1.013,25 mbar Moleküle an der Oberfläche zu adsorbieren, insbesondere Wasser-, Stickstoff und Sauerstoffmoleküle. Man spricht in dem Zusammenhang von Monoschichten, wobei davon auszugehen ist, dass im Rahmen einer Belüftung eines Vakuumsystems die Oberflächen mit mehreren Lagen überzogen werden. Diese Monolagen können durch die Evakuierung entfernt werden, allerdings erweist sich dieser Vorgang umso schwieriger, je unebener die Oberfläche des zu evakuierenden Materials ist. [31] Begünstigt wird das Entfernen durch höhere Temperaturen oder ein vorheriges Ausheizen des Materials – je 100 °C Temperaturerhöhung sinkt die Ausgasrate nach dem Ausheizprozess um ca. eine Zehnerpotenz. [31]

Nicht verwechselt werden darf die hier beschriebene Desorption mit der Desorption infolge Permeation.

3.4.2 Gasabgabe im VIGS

Das Ausgasverhalten der Materialien lässt sich mittels Reinigung und Oberflächenbehandlung verringern.

Vor dem Einsatz der Materialien in ein Vakuumdämmelement sind diese mindestens zu reinigen. Üblich ist hier die Reinigung mit in Lösungsmittel getränkten Mikrofasertüchern.

Des Weiteren gibt es die folgenden Reinigungsverfahren [32]:

- Reinigung im Ultraschallbad [33]
- Plasmareinigung [34]
- Ozonreinigung [35]
- CO₂-Schneestrahlen [36]
- Ausheizen [37]
- Wasserstoffarm-Glühen [38]

Bei dem Einsatz von Reinigungsmaterialien ist die Oxidationsfreudigkeit des Aluminiums (Abstandhalter) und die nur bedingte chemische Beständigkeit der Elastomere zu berücksichtigen.

Die Bestandteile des VIGS werden vor dem Zusammensetzen mit Alkohol getränkten Mikrofasertüchern gereinigt. Das Stützkernmaterial des VIGS wird durch Aufheizen bei maximal zugelassener Temperatur vor dem Einsatz in das Element gereinigt. Durch den Aufheizprozess – in diesem Fall in einem separaten Trockenofen – werden absorbierte Wassermoleküle verdampft. Das Ausheizen kann auch während des Evakuierungsprozesses erfolgen, indem der gesamte Versuchskörper in eine Aufheizkammer eingebracht wird oder mit Heizbändern umwickelt wird. Dieser Vorgang hat den Vorteil, dass sich durch die Wärme in dem Hüllmaterial oder dem Stützkern gebundene Atome lösen und über die Evakuierungseinrichtung abgesaugt werden. Zudem werden auch die in der Hülle gebundenen Wassermoleküle verdampft.

Bei der Oberflächenbehandlung muss darauf geachtet werden, dass die Korrosionsbeständigkeit durch die Maßnahmen nicht verloren geht. Es können die folgenden Maßnahmen angewandt werden [32]:

- Glasperlenstrahlen [39]
- mechanisches Polieren und Bürsten [40]
- Elektropolieren [41]
- Plasmapolieren [42]

Die Umsetzung dieser Verfahren ist lediglich für den Abstandhalter möglich, wobei hier jedoch die Geometrie die Umsetzung der Verfahren einschränkt. Bei den Prototypen wurde bisher das mechanische Polieren und Bürsten angewandt.

3.5 Evakuierungseinrichtung und Messtechnik

3.5.1 Drehschieberpumpe

Für die Evakuierung der Versuchskörper im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit wurde die Drehschieberpumpe DUO 20M der Firma Pfeiffer Vakuum GmbH eingesetzt. Eine Drehschieberpumpe dient der Erzeugung eines Vakuums über den Grobvakuumbereich bis in den Feinvakuumbereich.

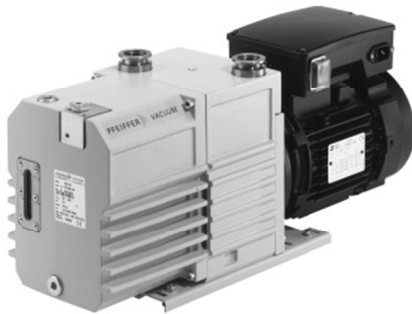


Abbildung 3.2: Drehschieberpumpe der Firma Pfeiffer Vacuum GmbH [43]

Die Drehschieberpumpe ist eine Rotationsverdrängerpumpe. [44]. Der exzentrisch gelagerte Rotor im Innenraum gleitet tangential an der Innenwand des Gehäuses vorbei. In diesem Rotor sind zwei oder mehr Rohrschlitze angebracht, in denen sich beweglich angeordnete Schieber befinden. Diese Schieber gleiten bei Bewegung des Rotors an der Gehäusewand vorbei und teilen die Pumpenkammer somit in sich kontinuierlich ändernde Raumvolumina. Durch eine Vergrößerung einer solchen Kammer wird Gas angesogen, welches bei Verkleinerung der Kammer komprimiert und ausgestoßen wird. Zum Abdichten des Systems als auch zur Schmierung der Lager befindet sich Öl in dem Pumpengehäuse. [44], [45]

3.5.2 Heliumleckdetektor

Mit einem Leckdetektor kann ein Prüfgasstrom quantitativ gemessen werden. Relevant wird eine solche Messung in Zusammenhang mit der quantitativen Bestimmung der Dichtigkeit eines im Vakuum eingesetzten Behälters, insbesondere mit der Ortung gegebenenfalls vorhandener Leckagen an diesem Behälter. Gemessen wird dann ein Prüfgasstrom, der durch ein Leck der eigentlich dichten Hülle des Behälters strömt. Um auch kleinste Leckagen aufspüren zu können, wird in der Regel Helium als Prüfgas eingesetzt. [46]

Im Leckdetektor befindet sich ein Massenspektrometer, über den der Prüfgasstrom ausgewertet wird. Das Massenspektrometer benötigt als Arbeitsgrundlage einen Druck von weniger als 10^{-2} Pa. Vor diesem Hintergrund ist ein Hochvakuumumpumsatz in den Leckdetektor integriert, der diesen Druck erzeugen und auch halten kann. [46]

Bei den folgend aufgeführten Versuchen wurde der Heliumleckdetektor HLT 560 SmartTest Helium-Lecksucher mit Drehschieberpumpe der Firma Pfeiffer Vacuum GmbH eingesetzt.



Abbildung 3.3: Heliumleckdetektor der Firma Pfeiffer Vacuum GmbH

3.6 Messverfahren zur Bestimmung des Stofftransports durch die Hülle eines VIGS

3.6.1 Dichtheitsprüfung

Dichtheitsprüfungen dienen der einfachen und schnellen Qualitätssicherung insbesondere in der Industrie, um den Stofftransport aus bzw. in einen Versuchskörper qualitativ oder auch quantitativ bestimmen zu können. [25]

In DIN EN 1779 [47] gibt es einen Leitfaden zur Auswahl eines für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Prüfverfahrens.

Dabei stehen in Abhängigkeit des Weges des Gasstroms die folgenden Verfahren zur Verfügung:

(a) Gasstrom in das Element:

- integrales Vakuumverfahren mit Helium; dient der Messung der Leckagerate. Die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-9} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- partielles Vakuumverfahren mit Helium; dient der Messung der Leckagerate. Die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-9} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- lokales Vakuumverfahren mit Helium; dient der Lokalisation der Leckage. Die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Druckanstiegsmessung; dient der Messung der Leckagerate. Die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$). (abhängig vom Objektvolumen, Prüfzeit und Ausrüstung)
- Druckänderungstest (Glockendruckänderung); dient der Messung der Leckagerate. Die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Strömungsmessung; dient der Messung der Leckagerate; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).

(b) Gasstrom aus dem Element:

- chemische Detektion mit Ammoniak; dient der Lokalisation einer Leckage; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Vakuumglocke, die den Prüfgasdruck – normalerweise Helium – im Objekt ausnutzt; dient der Messung der Leckagerate; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Vakuumglocke; Benutzung einer Sprühpistole auf der gegenüberliegenden Seite; dient der Lokalisation einer Leckage; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Überdruckverfahren (Sammeln des austretenden Gases); dient der Messung der Leckagerate; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$) (abhängig von der Wartezeit).
- Schnüffelpfprüfung; dient der Messung der Leckagerate; die kleinste nachweisbare

Leckagerate beträgt $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).

- Drucklagerungsprüfung („Bombing“-Prüfung); dient der Messung der Leckagerate; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt 10^{-9} bis $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (10^{-8} bis $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Umschlossene Objekte im Vakuumverfahren (extern); dient der Messung der Leckagerate; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Blasennachweis (Eintauchen); dient der Lokalisation einer Leckage; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Blasennachweis (Auftragen von Flüssigkeit); dient der Lokalisation einer Leckage; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Druckabfallprüfung; dient der Messung der Leckagerate; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$). (abhängig vom Objektvolumen, Prüfzeit und Ausrüstung)
- Druckänderungstest (Glockendruckänderung); dient der Messung der Leckagerate; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).
- Strömungsmessung; dient der Messung der Leckagerate; die kleinste nachweisbare Leckagerate beträgt $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$).

Für die oben aufgezeigten Verfahren werden teilweise Leckdetektoren benötigt. Der Nachweis mit einem Leckdetektor kann entweder wie oben beschrieben unter Atmosphärendruck erfolgen, wenn der Versuchskörper mit einem Prüfgas befüllt wird und die durch das Leck ausströmende Prüfgaskonzentration gemessen wird (Überdruckverfahren), oder unter Vakuum, wenn der evakuierte Versuchskörper mit Helium beaufschlagt wird und der durch die Leckagen in den Versuchskörper hineinströmende Prüfgasstrom gemessen wird (Unterdruckverfahren).

Die Randbedingungen der Prüfung auf Leckagen sollten möglichst den Bedingungen des späteren Einbauszustandes des Versuchskörpers entsprechen – insbesondere im Hinblick auf die Umgebungstemperatur und den Weg des Gastransportes (Oberdruck- oder Unterdruckprüfung. [25]

Die Nutzung von Prüfgas im Zusammenhang mit einem Lecktest erfordert in Abhängigkeit der Strömungsart des Gases durch die Leckagen eine Umrechnung der ermittelten Leckagerate, da der Versuchskörper im späteren Einbauszustand in der Regel Luft ausgesetzt ist und nicht dem Prüfgas. [25], [47]

Als Prüfgasstrom wird in der Regel Helium eingesetzt – Helium erfüllt als Edelgas die wesentlichen Anforderungen an das Prüfgas [25]:

- Verträglichkeit mit der Umwelt
- chemische und physikalische Neutralität (keine Reaktion oder Adsorption)
- geringer Gehalt in der normalen Umwelt (Luft)
- empfindlicher und selektiver Nachweis im Vakuum und in der Atmosphäre

Andere Edelgase sind zumeist in größeren Konzentrationen in der Luft enthalten und eignen sich somit nicht so gut für den empfindlichen und selektiven Nachweis oder sie sind nur im Bereich des Massenspektrums nachweisbar. [25]

3.6.2 Messung des Stofftransports durch Diskontinuitäten

Um die Qualität eines VIGS zu untersuchen, sind bei der Wahl des Prüfverfahrens die Bedingungen im späteren Betriebszustand zu berücksichtigen. Für die Untersuchung der Qualität eines VIGS wird somit ein Prüfverfahren mit einem Gasstrom in das Element und einer möglichst hohen Genauigkeit benötigt. Gewählt wird hier das integrale Vakuumverfahren mit Helium. Die kleinste nachweisbare Leckagerate bei diesem Verfahren liegt bei $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. Das Prinzip dieses Verfahrens ist nach DIN EN 1779 [47] die Evakuierung des Versuchskörpers und Beaufschlagung mit einem Prüfgas (normalerweise Helium). Durch die gegebenenfalls vorhandenen Leckagen wird das Prüfgas in das Elementinnere gesogen und von dort in den Leckdetektor, in dem die Heliumkonzentration gemessen und in eine Leckagerate umgerechnet wird.

In DIN EN 1330-8 [48] wird die so genannte Hüllenprüfung als integrale Prüfung aufgezeigt. Der unter Vakuum stehende Prüfkörper wird in eine weiche Hülle eingebracht und diese mit Helium beaufschlagt. Ein Leckdetektor wird an den Prüfkörper angeschlossen, der diesen evakuiert und den kontinuierlich von außen durch die Leckagen eindringenden Prüfgasstrom quantitativ als pV-Strom in Volumenstromeinheiten nachweist. [49]

Aufgrund der unterschiedlichen Induktionszeiten für Gasströmung und Permeation lassen sich Gasströmung und Permeation differenzieren. Bei einer Gasströmung durch ein Porenleck – beim VIGS hervorgerufen durch Diskontinuitäten in den Kontaktflächen der einzelnen Hüllmaterialien oder durch Fehlstellen in der Schweißnaht des Rahmens – kommt es unmittelbar nach einer Gasbeaufschlagung zur Reaktion. Die Reaktion infolge Permeation ist abhängig von Permeationslänge und Permeationskonstante und ist erst Sekunden oder sogar Minuten nach der Beaufschlagung mit dem Prüfgas sichtbar.

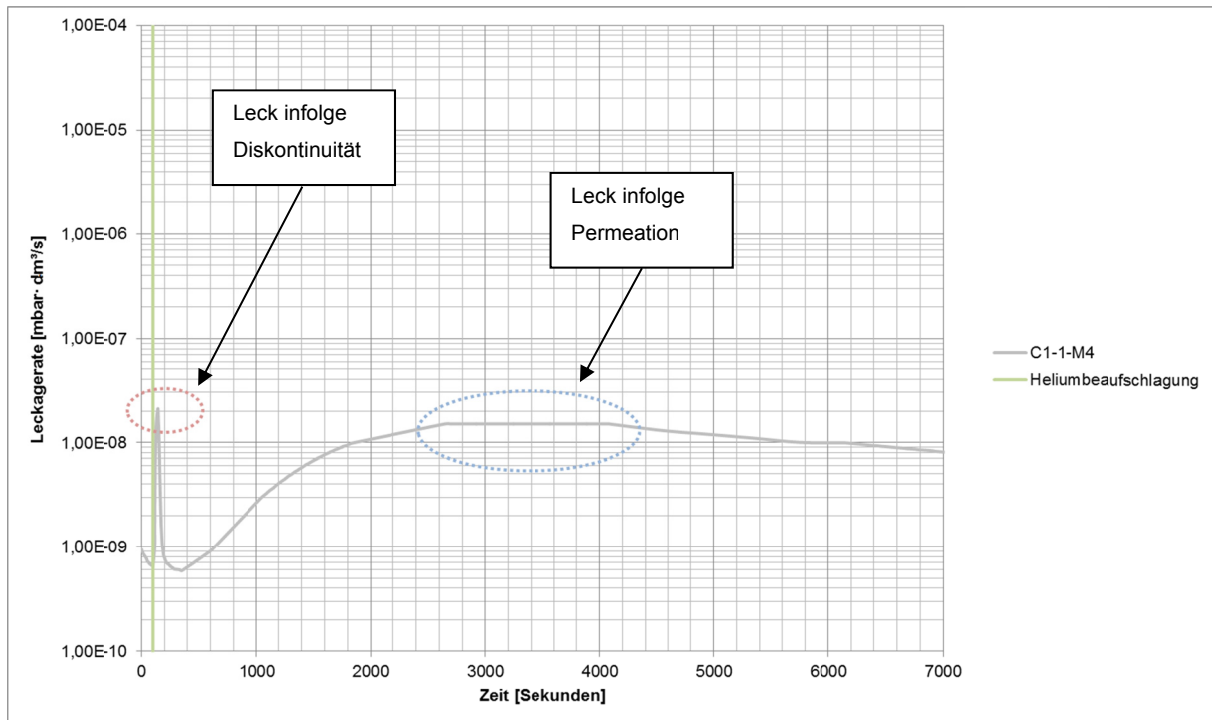


Abbildung 3.4: Messkurve Viton®-Ring nach Heliumbeaufschlagung

3.6.3 Messung des Stofftransports in Form von Permeation

In Anlehnung an dieses Prüfverfahren wird auch die Permeation durch die Hülle des Versuchskörpers untersucht. Da davon auszugehen ist, dass die Hüllmaterialien Glas und Aluminium gegenüber dem Dichtring permeationsdicht sind, müssen nur die Permeationseigenschaften des Dichtrings untersucht werden. Die Prüfung erfolgt hier in abgewandelter Form nach DIN 53536 [50] – einem Prüfverfahren zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit durch Kautschuk und Elastomere. Der Probekörper wird zwischen zwei Kammern gespannt und eine Kammer mit dem Prüfgas beaufschlagt. Durch die Beobachtung der Druckverhältnisse in beiden Kammern kann eine Aussage zur Dichtigkeit des eingespannten Materials gemacht werden.

Dieses Verfahren bezieht sich jedoch auf flächige Bauteile, nicht auf Ringe.

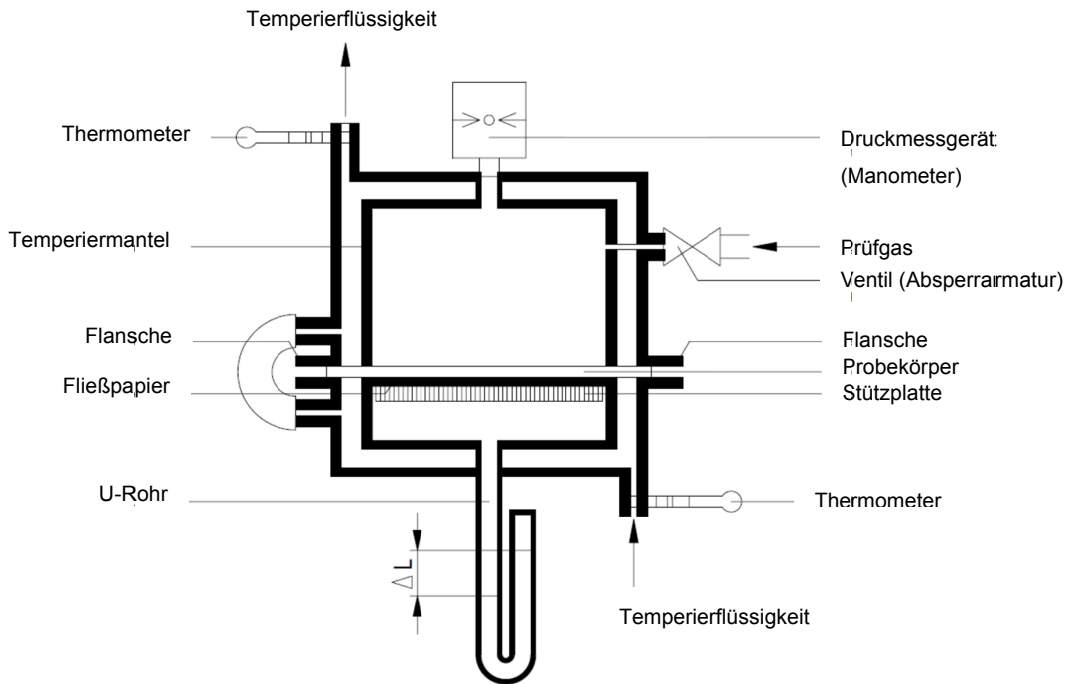


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus in Anlehnung an DIN 53536 [50]

Für die Untersuchung des Dichtrings der VIGS wird dieser als Trennung zweier Kammern eingebaut. Die eine der beiden Kammern wird über den Leckdetektor evakuiert und die andere Kammer mit Helium beaufschlagt. Das infolge Permeation durch den Dichtring wandernde Prüfgas wird über den an der Kammer angeschlossenen Leckdetektor nachgewiesen.

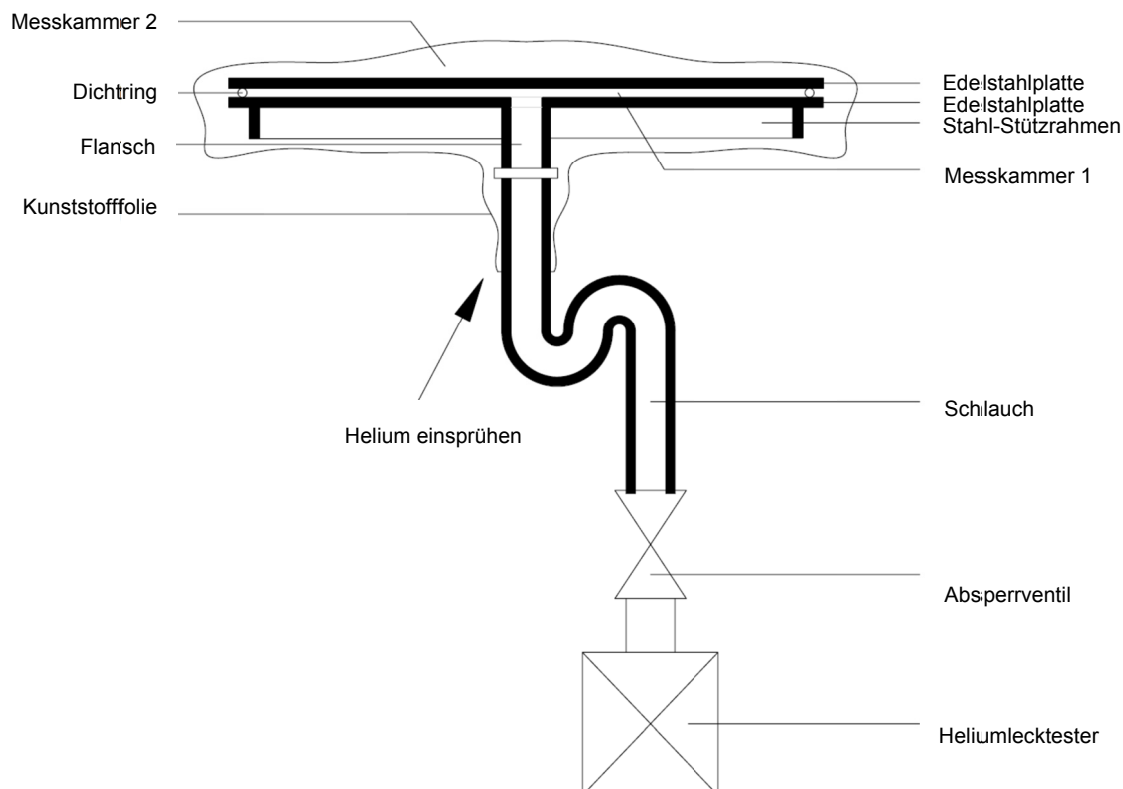


Abbildung 3.6: Prinzipskizze zur Untersuchung der Permeationseigenschaften des Dichtrings

3.7 Dauerhaftigkeit von Vakuumdämmelementen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt wurde, ist es nicht möglich, eine vollkommen luftdichte Hülle für das VIGS umzusetzen. Leckagen treten in Form von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen der einzelnen Materialien und in Form von materialabhängiger Permeation auf.

Die Dauerhaftigkeit des VIGS ist somit abhängig von einer Gesamtleckagerate. Diese setzt sich wie folgt aus der Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in der Kontaktfläche der einzelnen Materialien und der Leckagerate infolge der Permeation durch den Querschnitt der einzelnen Hüllmaterialien zusammen:

$$q_{pV,ges.} = 2 \cdot q_{pV,Disk,Stahl} + 2 \cdot q_{pV,Disk,Glas} + 2 \cdot q_{pV,Perm.} \quad (3.8)$$

Mit	$q_{pV,ges.}$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten und der Permeation [mbar · dm ³ /s]
	$q_{pV,Disk,Stahl}$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Stahl“ [mbar · dm ³ /s]
	$q_{pV,Disk,Glas}$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Glas“ [mbar · dm ³ /s]
	$q_{pV,Perm}$	Leckagerate infolge der Permeation durch den Dichtring [mbar · dm ³ /s]

Die im Rahmen der integralen Prüfung ermittelten Leckageraten infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen und die Leckageraten infolge der Permeation sind aufgrund des Einsatzes von Helium als Prüfgas in Abhängigkeit der Art der Strömung durch die Leckage wie folgt beschrieben zu korrigieren. In Zusammenhang mit einer laminaren Strömung, also einer Leckagerate $> 10^{-4}$ mbar · dm³/s, ist die Viskosität von Helium mit der Viskosität von Luft vergleichbar und die mit Helium nachgewiesene Leckagerate kann äquivalent einer infolge Luft herrschenden Leckagerate angesetzt werden. Bei dem Vorherrschen einer molekularen Strömung, also einer Leckagerate $< 10^{-7}$ mbar · dm³/s, ist das Leckageverhalten in Bezug auf variierende Gase abhängig von dem Verhältnis der Wurzeln ihrer molekularen Massen. Bezogen auf Helium und Stickstoff bedeutet dies eine Korrektur der Helium-Leckagerate um den Faktor $f_s = 1/\sqrt{7}$ bzw. eine Sicherheit gegenüber der Luftleckagerate von annähernd drei. [28] Eine entsprechende Berücksichtigung dieses Ansatzes kann erst nach der Messung bei Erfordernis mit angesetzt werden, weil vorab die Leckagerate für die einzelnen Ringe bzw. die Art der Strömung durch die Leckagen nicht bekannt ist.

Neben der Gesamtleckagerate ist die Dauerhaftigkeit des VIGS abhängig von dem lichten Volumen des Probekörpers und dem zulässigen Druckanstieg Δp im Elementinnern:

$$t_{\text{grenz}} = \frac{\Delta p \cdot V_{\text{VIGS}}}{q_{pV, \text{ges.}}} \quad (3.9)$$

Mit	t_{grenz}	Lebenserwartung des Versuchskörpers [s]
	Δp	zulässiger Druckanstieg [mbar]
	V_{VIGS}	lichtes Volumen des Versuchskörpers [dm ³]
	$q_{pV, \text{ges.}}$	Gesamtleckagerate [mbar · dm ³ /s]

Der zulässige Druckanstieg im VIGS ist abhängig von der tolerierbaren druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit des Stützkernmaterials (siehe auch Kapitel 2.1, Abbildung 2.7). Das VIGS wird grundsätzlich bis zu einem Vakuum von $1 \cdot 10^{-1}$ mbar evakuiert. Die pyrogene Kieselsäure erreicht hier eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,005 W/(m·K). Toleriert wird im Folgenden eine Innendruckzunahme auf 100 mbar mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,0065 W/(m·K), mit der bei einer 4 cm dicken Stützkernebene noch Werte entsprechend dem Passivhausniveau realisierbar sind.

Bezogen auf die bisher geforderte Haltbarkeit von Dämmstoffen über einen Zeitraum von 25 Jahren kann Gleichung 3.11 wie folgt umgestellt werden:

$$q_{pV, \text{zul.}} = \frac{100 \cdot V_{\text{VIGS}}}{25 \cdot 3,15 \cdot 10^7} \quad (3.10)$$

Mit	V_{VIGS}	lichtes Volumen Probekörper [dm ³]
	$q_{pV, \text{zul.}}$	zulässige Gesamtleckagerate um eine Haltbarkeit von 25 Jahren zu erreichen [mbar · dm ³ /s]

Bezogen auf die zulässige Gesamtleckagerate eines VIGS erweisen sich kleinformatige Elemente als maßgebend – mit abnehmenden Elementabmessungen reduziert sich auch die zulässige Gesamtleckagerate. Die kleinsten realistischen VIGS-Abmessungen für den Einsatz als Fassadenpaneel werden hier zu 0,50 x 1,00 x 0,04 m gesetzt. Die entsprechend ermittelte zulässige Leckagerate für eine Dauerhaftigkeit des Paneels von 25 Jahren wird somit als maßgebend betrachtet und als Vergleichswert für die im Folgenden untersuchten Versuchskörper angesetzt.

Entsprechend der Gleichung 3.8 setzt sich die zulässige Gesamtleckagerate für das VIGS aus der Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen und aus der Leckagerate infolge der Permeation durch den Festkörper zusammen. Der jeweilige Anteil der Leckagen an der Gesamtleckagerate kann hier nicht vorab abgeschätzt werden, weshalb kein Grenzwert der zulässigen Leckagerate für die einzelnen Stofftransportwege angegeben werden kann. Die für das oben genannte kleinformatige VIGS ermittelte zulässige Gesamtleckagerate wird somit einmal als Grenzwert für die Leckagen infolge von

Diskontinuitäten und einmal als Grenzwert für die Leckagen infolge der Permeation angesetzt.

Die Leckagerate infolge des Stofftransports durch Diskontinuitäten ist abhängig von der Länge der Kontaktfläche zwischen Glas und Dichtring sowie zwischen Dichtring und Abstandhalter. Über Gleichung 3.10 kann die zulässige Gesamtleckagerate für das oben beschriebene kleinformatige VIGS bestimmt werden. Multipliziert mit dem Verhältnis der Länge der Kontaktflächen am Versuchskörper zur Länge der Kontaktfläche am VIGS ergibt sich dann die zulässige Leckagerate am Probekörper infolge von Diskontinuitäten:

$$q_{pV,zul.,Diskontinuitäten} = q_{pV,zul.,VIGS} \cdot \frac{L_{KontaktVersuchskörper}}{L_{KontaktVIGS}} \quad (3.11)$$

Mit	$q_{pV,zul.,Diskontinuitäten}$	zulässige Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für den Versuchskörper für eine Lebenserwartung von 25 Jahren [mbar · dm ³ /s]
	$q_{pV,zul.,VIGS}$	zulässige Leckagerate für das kleinformatige VIGS für eine Lebenserwartung von 25 Jahren [mbar · dm ³ /s]
	$L_{KontaktVersuchskörper}$	Länge der Kontaktfläche „Glas zu Dichtring“ sowie „Dichtring zu Abstandhalter“ am Versuchskörper [m]
	$L_{KontaktVIGS}$	Länge der Kontaktfläche „Glas zu Dichtring“ sowie „Dichtring zu Abstandhalter“ am VIGS [m]

Durch Einsetzen der Randbedingungen ergibt sich für die folgenden experimentellen Untersuchungen somit der folgende Grenzwert:

$$q_{pV,zul.,Diskontinuitäten} \leq 5,33 \cdot 10^{-7} \text{ [mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s]}$$

Die Leckagerate infolge der Permeation ist abhängig von der Länge des Dichtrings bzw. der Dichtringe. Über Gleichung 3.10 ist die zulässige Gesamtleckagerate für das oben beschriebene kleinformatige VIGS für eine Haltbarkeit von 25 Jahren bekannt. Die halbierte zulässige Gesamtleckagerate multipliziert mit dem Verhältnis der Länge des Dichtrings im Versuchskörper zur Länge des Dichtrings im VIGS ergibt dann die zulässige Leckagerate am Probekörper infolge Permeation:

$$q_{pV,zul.,Permeation} = \frac{q_{pV,zul.,VIGS}}{2} \cdot \frac{L_{DichtringVersuchskörper}}{L_{DichtringVIGS}} \quad (3.12)$$

Mit	$q_{pV,zul.,Permeation}$	zulässige Leckagerate infolge Permeation für den Versuchskörper für eine Lebenserwartung von 25 Jahren [mbar · dm ³ /s]
	$q_{pV,zul.,VIGS}$	zulässige Leckagerate für das kleinformatige VIGS für eine Lebenserwartung von 25 Jahren [mbar · dm ³ /s]

$L_{DichtringVersuchskörper}$ Länge des Dichtrings im Versuchskörper [m]

$L_{DichtringVIGS}$ Länge des Dichtrings im VIGS [m]

Durch Einsetzen der Randbedingungen ergibt sich für die folgenden experimentellen Untersuchungen somit der folgende Grenzwert:

$$q_{pV,zul,Permeation} \leq 5,33 \cdot 10^{-7} [\text{mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}]$$

4. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG ZUR LECKAGERATE AN EINEM VIGS

4.1 Allgemein

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung der Leckagerate an einem VIGS werden die beiden Arten des Gastransportes – Stofftransport durch Diskontinuitäten und Stofftransport in Form von Permeation durch den Festkörper – quantitativ bestimmt. In diesem Zusammenhang werden mehrere umfangreiche, aufeinander aufbauende Versuche durchgeführt, die zum Teil bereits in Kapitel 3 erläutert wurden.

Diese Untersuchungen sind wiederum abhängig von den folgenden Einflussparametern:

- Material des Dichtrings
- Eigenschaften des Dichtrings (Härte und Dicke)
- Beschichtung des Glases
- Geometrie der Nut im Abstandhalter

Die experimentellen Untersuchungen werden in Anlehnung an die Hüllenprüfung durchgeführt (integrale Prüfung nach DIN EN 1330-8 [48], siehe Kapitel 3.6.2):

Der Versuchskörper wird einer Heliumatmosphäre ausgesetzt.

Die Versuche unterscheiden sich in Abhängigkeit des jeweils zu untersuchenden Stofftransports:

- (a) Um den Stofftransport infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen zu untersuchen, erfolgt eine kurzzeitige Heliumbeaufschlagung.
- (b) Um den Stofftransport infolge der Permeation zu untersuchen erfolgt eine lang andauernde Heliumbeaufschlagung bis eine konstante Leckagerate eintritt.

Die Versuchsergebnisse werden in Diagrammen in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Eine im Diagramm vertikal gestrichelte Linie zeigt den Zeitpunkt der Heliumbeaufschlagung. Nach dieser Beaufschlagung kommt es entweder zu einem unmittelbar einsetzenden Anstieg der Leckagerate – aufgrund von größeren Diskontinuitäten in den Kontaktflächen der Hüllmaterialien, denen sich der Dichtring nicht anpassen kann – oder der Dichtring hat sich den Unebenheiten angepasst und die Kurve bzw. die Leckagerate steigt aufgrund der zeitversetzt messbaren Permeation erst später langsam auf ein Maximum an.

Sofern es unmittelbar nach der Heliumbeaufschlagung zu einem Anstieg der Leckagerate kommt, ist dieser nur von kurzer Dauer, da der Versuchskörper dem Helium nur einige Sekunden ausgesetzt ist. Würde der Versuchskörper länger mit dem Helium beaufschlagt werden, würde der Ausschlag ebenfalls länger andauern und der Einfluss der Permeation

käme zeitversetzt noch dazu. Entsprechende Versuchsergebnisse zeigen eine Nicht-Eignung der jeweiligen Dichtringeigenschaftenkombination für den Einsatz im VIGS.

Zusätzlich wird in den Diagrammen die Grenzleckagerate für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit eines kleinformatigen VIGS dargestellt (siehe Kapitel 3.7). Diese Grenze der Dauerhaftigkeit ist mit einer roten horizontalen Linie gekennzeichnet. Die Leckageraten der Versuchskörper sollten möglichst unterhalb dieser Linie liegen.

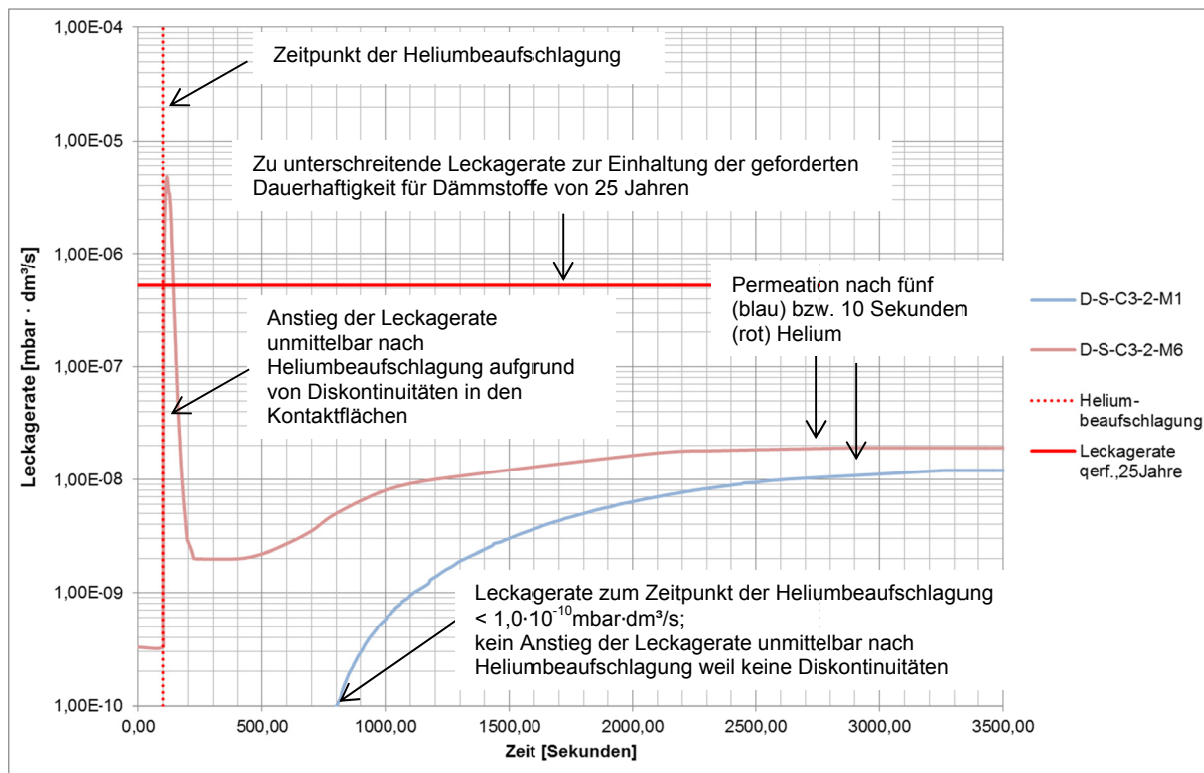


Abbildung 4.1: Erläuterung der Diagramme zu den experimentellen Untersuchungen des Stofftransports durch Diskontinuitäten

Kurvenverläufe, die von den hier exemplarisch dargestellten Kurven abweichen, werden jeweils erläutert.

4.2 Experimentelle Untersuchungen zum Stofftransport durch Diskontinuitäten bzw. Leckkanäle

4.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Vor dem Zusammenbau des Versuchskörpers werden alle Prüfteile gereinigt. Dann wird der Dichtring auf einer unteren Stahlplatte mit den Abmessungen 500 x 500 x 10 mm positioniert. Damit sich die obere Platte bei dem späteren Versuch nicht in der Mitte durchbiegt, wird mittig der unteren Stahlplatte zusätzlich ein Stützkörper gleicher Dicke und Härte wie der zu prüfende Dichtring positioniert.

Im nächsten Schritt wird eine zweite Stahlplatte gleicher Abmessung auf den Dichtring aufgelegt.

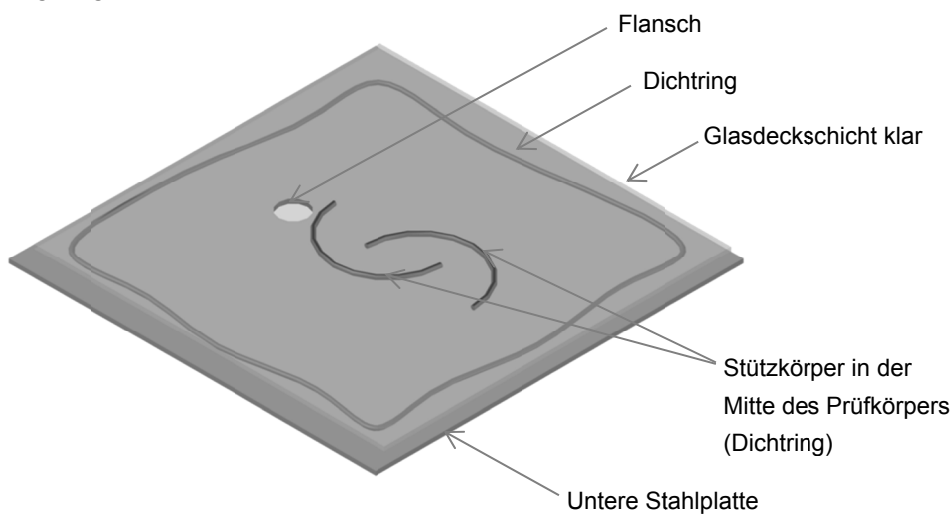


Abbildung 4.2: Untere Stahlplatte des Versuchskörpers mit Dichtring und klarer Glasdeckschicht (ESG)

Diese zweite obere Platte variiert in Abhängigkeit der Versuchsdurchführung hinsichtlich ihrer Ausführung:

- ebene Stahloberfläche (Kapitel 4.2.2)
- klares ESG (Kapitel 4.2.3)
- beschichtetes ESG (Kapitel 4.2.3)

Die ebene Stahloberfläche simuliert die Kontaktfläche zwischen metallischem Abstandhalter und Dichtring, die ESG-Varianten simulieren die Kontaktfläche zwischen Dichtring und Deckschichten des VIGS.

An der unteren Stahlplatte befindet sich ein Flansch über den der Versuchskörper mit einer Vakuumpumpe bzw. einem Heliumlecktester – SmartTest HLT 560 der Firma Pfeiffer Vacuum – verbunden ist.

Der Dichtring muss vor Beginn der Evakuierung mit einer vertikalen Last von mindestens 2 kN/m bezogen auf die Ringlänge [51] beaufschlagt werden, damit dieser seine maximalen

Dichteigenschaften aufbauen kann. Dieser Anpressdruck wird über einen Hydraulikzylinder aufgebaut. Er drückt einen Stahlrahmen von unten gegen die untere Stahlplatte, auf der der Dichtring liegt, und dann den gesamten Versuchskörper gegen einen oberen Stahlrahmen. Die Stahlrahmen sind von den Abmessungen derart ausgeführt, dass sie den Anpressdruck nahezu zu 100% auf den Dichtring weitergeben.



Abbildung 4.3: Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung des Stofftransportes durch Diskontinuitäten

Mittels einer Drehschieberpumpe wird dann im Hohlraum zwischen den Stahlplatten und dem Dichtring ein Grobvakuum aufgebaut.

Durch den anschließenden Einsatz eines Heliumleckdetektors mit einer integrierten Turbopumpe wird der Feinvakuumbereich vertieft. Gleichzeitig wird der Anpressdruck der Stahlplatten an den Dichtring gelöst.

Der Heliumleckdetektor evakuiert bis zu der von ihm real nachweisbaren kleinsten Leckagerate infolge Helium – in der reinen Luft – von $1,0 \cdot 10^{-10}$ mbar \cdot dm³/s. Teilweise werden auch geringere Leckageraten erreicht, deren Genauigkeit jedoch gering ist.

Im Rahmen der Hüllenprüfung wird der Versuchskörper dann einer Heliumatmosphäre ausgesetzt. Aus der den Versuchskörper ummantelnden Hülle wird zunächst sämtliche Luft herausgedrückt, um nach Einbringen des Heliums eine möglichst reine Heliumkonzentration in der Hülle zu haben. Der Versuchskörper wird dann über die erforderliche Beaufschlagungszeit von außen mit Helium beaufschlagt (Tabelle 4.1) und dabei gleichzeitig über den angeschlossenen Heliumleckdetektor im Innenraum kontinuierlich weiter evakuiert. Durch die gegebenenfalls vorhandenen Diskontinuitäten bzw. Leckkanäle in der Hülle des Versuchskörpers wird das Prüfgas zunächst in das Innere des Versuchskörpers und dann weiter bis in den Heliumdetektor gesogen und die entsprechende Leckagerate im Gerät ausgewertet und ausgegeben.

Obwohl die Durchtrittszeit des Prüfgases durch einen Leckkanal aufgrund der großen Strömungsgeschwindigkeit des Gases praktisch zu vernachlässigen ist, muss eine Ansprechzeit des Leckdetektors berücksichtigt werden. Die erforderliche Dauer der Heliumbeaufschlagung ist abhängig von dem Volumen des Versuchskörpers V_0 und dem Saugvermögen $S_{0,He}$ für Helium am Saugstutzen des Leckdetektors und wird beschrieben als Zeitkonstante τ . Diese Konstante steht für eine Leckagerate, die 63% ihres Endwertes erreicht hat:

$$\tau = \frac{V_0}{S_{0,He}} \quad (4.1)$$

Mit	τ	Ansprechzeit Leckdetektor [h]
	V_0	Volumen des Versuchskörpers [m³]
	$S_{0,He}$	Saugvermögen für Helium am Saugstutzen des Leckdetektors [m³/h]

Den 95%igen Endwert der Leckagerate erreicht man nach der dreifachen Zeitkonstante. [46], [49]

Für die hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen müssen die folgenden Helium-Beaufschlagungszeiten eingehalten werden:

Tabelle 4.1: Helium-Beaufschlagungszeiten für die Bestimmung der Leckagerate [Annahme $S_{0,He}=2,5\text{dm}^3/\text{s}$]

Zeile	Dichtring [dm]	V_0 [dm³]	Ansprechzeit τ [s] für 63%-iges Leckageratensignal	Helium-Beaufschlagung [s] für 95%-iges Leckageratensignal
1	0,04	0,62	0,25	0,75
2	0,06	1,04	0,42	1,25
3	0,08	1,45	0,58	1,74

Die Versuche finden bei Raumtemperaturen von 20 °C bis 21°C statt.

Um zu gewährleisten, dass zu Beginn jedes neuen Versuchs der Heliumleckdetektor nicht mit Helium aus einem Vorversuch belastet ist, erfolgt parallel zu der Vorevakuierung über die Drehschieberpumpe eine Regeneration des Leckdetektors vor jeder weiteren Messung.

Die Versuchsergebnisse werden als Leckagerate bzw. Leakagestrom ausgegeben. Mit diesen Werten kann der Einfluss der jeweiligen Ringeigenschaftenkombination auf die Dauerhaftigkeit eines VIGS detailliert betrachtet werden.

In Bezug zu der in Kapitel 3.7 beschriebenen geforderten Dauerhaftigkeit für Dämmstoffe von 25 Jahren bzw. der in absehbarer Zeit unter Umständen geforderten Dauerhaftigkeit von

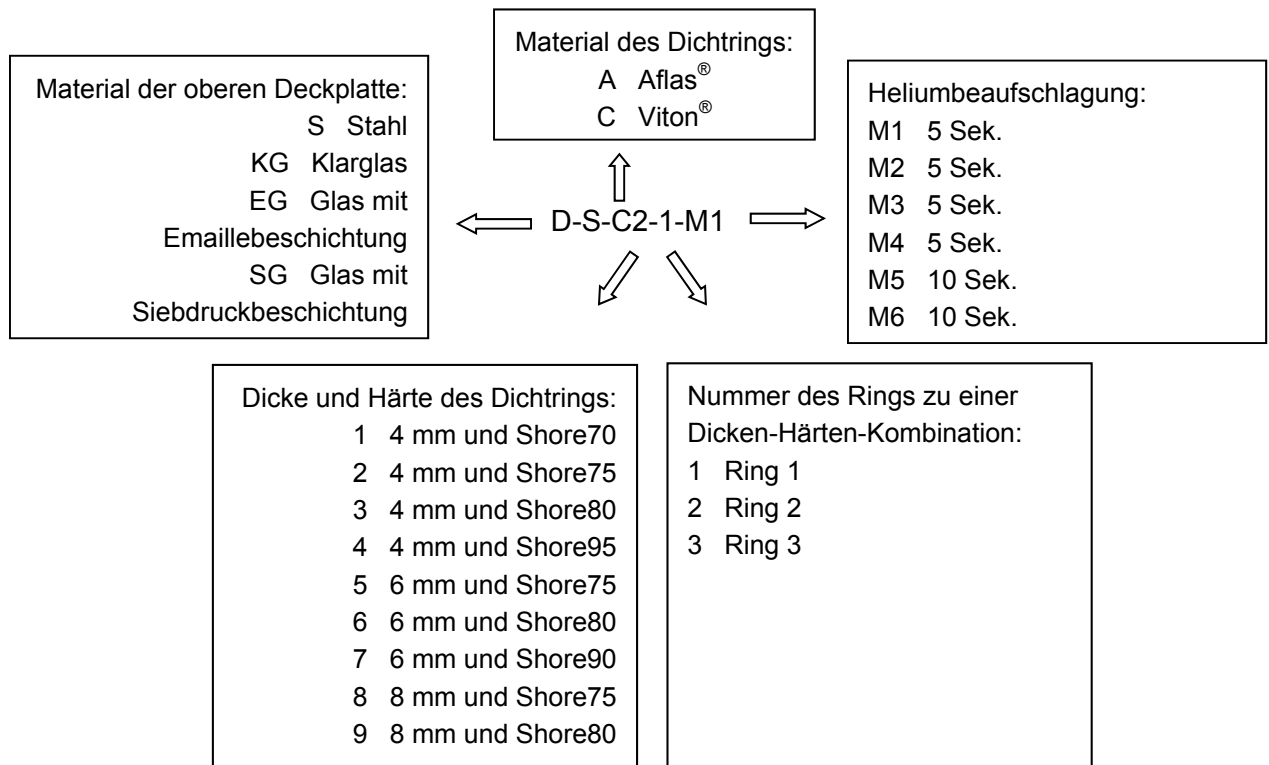
50 Jahren, ergeben sich für die hier betrachteten Versuchskörper mit einer Dichtebenen bzw. zwei Kontaktflächen die folgenden erforderlichen Leckageraten, die zu unterschreiten sind:

- $5,33 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$ ($2,67 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$ für 50 Jahre)

Insgesamt gelten bei den experimentellen Untersuchungen und der Auswertung die folgenden Randbedingungen:

- Abmessungen Versuchskörper: 500 x 500 mm
- Jeder Versuch wird mindestens zweimal mit einer Heliumbeaufschlagungszeit von fünf Sekunden und mindestens zweimal mit einer Beaufschlagungszeit von zehn Sekunden wiederholt.
- Pro Ringart, Härten- und Dickenkombination werden mindestens zwei Ringe getestet.
- Leckageraten kleiner $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$ werden aufgrund erhöhter Ungenauigkeit des Messgerätes in diesem Vakuumbereich als eine Leckagerate $< 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$ dargestellt.
- Dichtringeigenschaftenkombinationen, bei denen Leckageraten auftreten, die die Anforderungen an eine Dauerhaftigkeit von 25 Jahren nicht einhalten (siehe Grenzwerte oben) werden bei den weiteren experimentellen Untersuchungen nicht weiter betrachtet.
- Dichtringeigenschaftenkombinationen, bei denen es direkt nach der Heliumbeaufschlagung zu einem schnellen Anstieg der Leckagerate kommt, sind für den Einsatz in einem VIGS nicht geeignet. Entsprechende Versuchsergebnisse werden für die gesamte Versuchsreihe pro Ring in eine Wahrscheinlichkeit für einen solchen Ausfall umgerechnet.

Die Kennzeichnung der einzelnen Versuche basiert auf der folgenden Grundlage – das ‚D‘ steht hier für den Stofftransport durch Diskontinuitäten:



4.2.2 Stofftransport durch Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Abstandhalter“

Zur Bestimmung der Leckagerate infolge Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Abstandhalter“ werden verschiedene Dichtmaterialien, verschiedene Dichtringdicken und verschiedene Dichtringhärten (Shore) untersucht.

Die untersuchten Kombinationen werden in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 4.2: Übersicht der Versuchsaufbauten zur experimentellen Untersuchung des Stofftransports durch Diskontinuitäten

Zeile	Versuchs- Bezeichnung	Deckschicht				Viton®		Aflas®	
		Stahl	ESG Klar	ESG Siebdruck	ESG Emaillie	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Dicke [mm]	Härte [Shore]
1	D-S-A1	X	---	---	---	---	---	6	90
2	D-S-C1	X	---	---	---	4	70	---	---
3	D-S-C2	X	---	---	---	4	75	---	---
4	D-S-C3	X	---	---	---	4	80	---	---
5	D-S-C4	X	---	---	---	4	90	---	---
6	D-S-C5	X	---	---	---	6	75	---	---
7	D-S-C6	X	---	---	---	6	80	---	---
8	D-S-C7	X	---	---	---	6	80	---	---
9	D-S-C8	X	---	---	---	8	75	---	---
10	D-S-C9	X	---	---	---	8	80	---	---

Da hier nicht alle Versuchsergebnisse dargestellt werden sollen, werden aus jeder Versuchsreihe zu einer Dichtringeigenschaftenkombination zwei Messreihen – eine gute und eine schlechte Messkurve – exemplarisch für die gesamte Reihe ausgewählt und im Diagramm dargestellt. Alle weiteren Ergebnisse werden unter dem Diagramm in einer Tabelle zusammengefasst dargestellt.

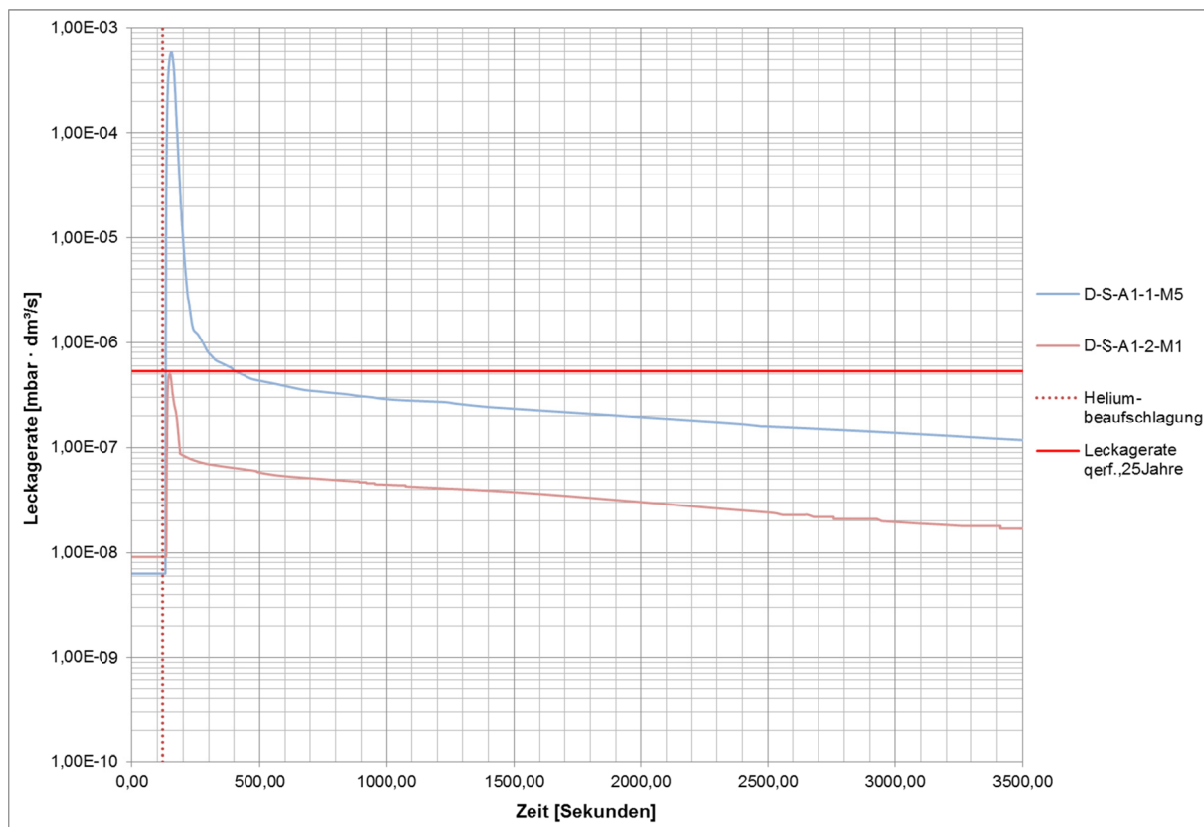
D-S-A1: Ebene Stahlplatte – Aflas® 6 mm, Shore90

Abbildung 4.4: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Aflas®, 6 mm, Shore90, Stahldeckschichten

Die beiden hier dargestellten Messkurven weichen von der oben exemplarisch dargestellten Kurve in Abbildung 4.1 insofern ab, dass der Zustand der Permeation hier nicht erkennbar ist. Die Kurven zum Dichtringmaterial Aflas® fallen nach dem Maximum infolge der Heliumbeanspruchung verglichen mit den Kurven zum Dichtringmaterial Viton® nicht so stark ab. Ab einer Versuchsdauer von ca. 250 Sekunden geht das starke Gefälle in ein geringeres lineares Gefälle über. Durch den langsamen Abbau der Heliumatome fällt die Kurve nicht derart ab, dass das Niveau der Permeation erkennbar wird.

Tabelle 4.3: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Aflas[®], 6 mm, Shore90, Stahldeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm ³ /s]
1	D-S-A1-1-M1	Aflas [®]	6	90	---	100	$5,6 \cdot 10^{-5}$
2	D-S-A1-1-M2	Aflas [®]	6	90	---		$5,4 \cdot 10^{-5}$
3	D-S-A1-1-M4	Aflas [®]	6	90	---		$1,4 \cdot 10^{-4}$
4	D-S-A1-1-M5	Aflas[®]	6	90	---		$5,9 \cdot 10^{-4}$
5	D-S-A1-2-M1	Aflas[®]	6	90	---		$5,0 \cdot 10^{-7}$
6	D-S-A1-2-M2	Aflas [®]	6	90	---		$1,0 \cdot 10^{-4}$
7	D-S-A1-2-M4	Aflas [®]	6	90	---		$1,0 \cdot 10^{-4}$
8	D-S-A1-2-M5	Aflas [®]	6	90	---		$1,4 \cdot 10^{-4}$
9	D-S-A1-3-M1	Aflas [®]	6	90	---		$4,6 \cdot 10^{-5}$
10	D-S-A1-3-M2	Aflas [®]	6	90	---		$6,7 \cdot 10^{-5}$
11	D-S-A1-3-M4	Aflas [®]	6	90	---		$7,4 \cdot 10^{-5}$
12	D-S-A1-3-M5	Aflas [®]	6	90	---		$7,0 \cdot 10^{-5}$

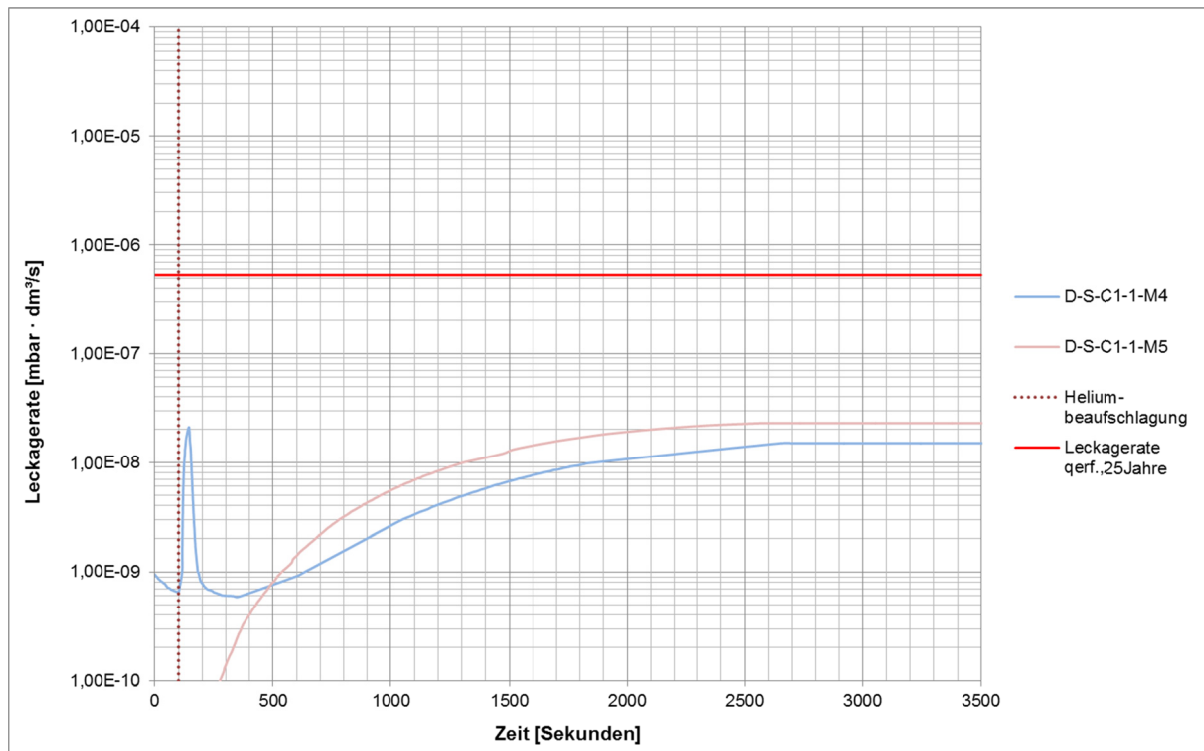
D-S-C1: Ebene Stahlplatte – Viton® 4 mm, Shore70

Abbildung 4.5: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore70, Stahldeckschichten

Tabelle 4.4: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore70, Stahldeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-S-C1-1-M1	Viton®	4	70	✓	50%	$4,0 \cdot 10^{-8}$
2	D-S-C1-1-M2	Viton®	4	70	✓		$< 1,0 \cdot 10^{-10}$
3	D-S-C1-1-M3	Viton®	4	70	✓		$3,4 \cdot 10^{-10}$
4	D-S-C1-1-M4	Viton®	4	70	✓		$2,1 \cdot 10^{-8}$
5	D-S-C1-1-M5	Viton®	4	70	✓		$< 1,0 \cdot 10^{-10}$

Bei der Versuchsreihe mit dem zweiten Ring hat sich gezeigt, dass dieser defekt war. Es kam dreimal zu einem direkten Ausschlag der Leckagerate nach Heliumbeaufschlagung, bei weiteren drei Versuchen konnte das Grobvakuum nicht erreicht werden.

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich somit nur auf den ersten Ring.

Die Leckwahrscheinlichkeit liegt somit bei 50%.

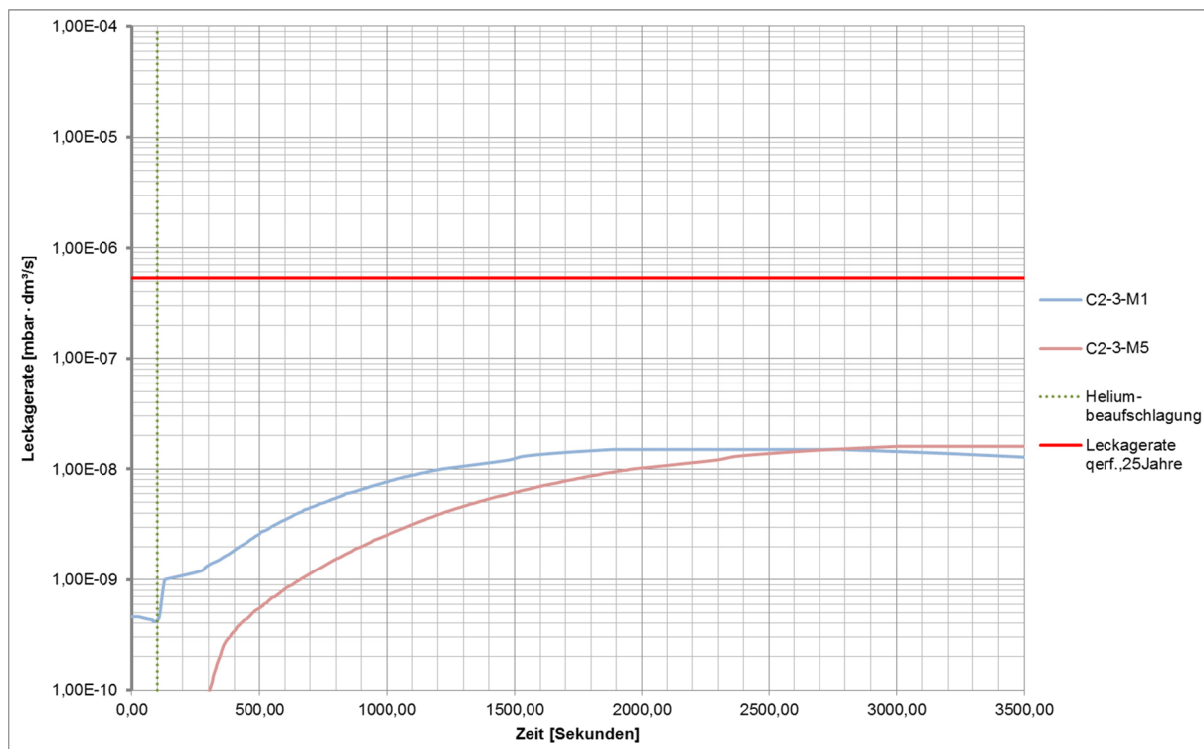
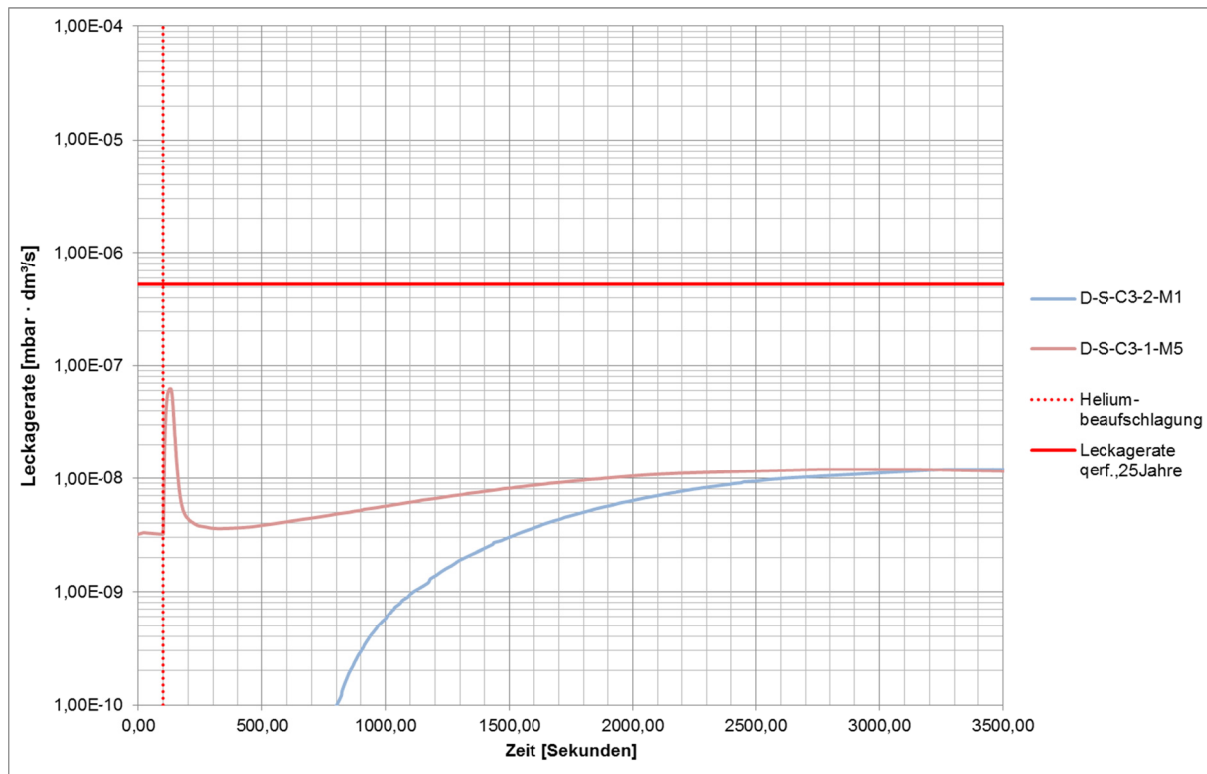
D-S-C2: Ebene Stahlplatte – Viton® 4 mm, Shore75

Abbildung 4.6: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore75, Stahldeckschichten

Tabelle 4.5: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton[®], 4 mm, Shore75, Stahldeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm ³ /s]
1	D-S-C2-1-M1	Viton [®]	4	75	✓	0	$2,8 \cdot 10^{-10}$
2	D-S-C2-1-M2	Viton [®]	4	75	✓		$3,5 \cdot 10^{-10}$
3	D-S-C2-1-M3	Viton[®]	4	75	✓		$1,0 \cdot 10^{-9}$
4	D-S-C2-1-M4	Viton [®]	4	75	✓		$2,8 \cdot 10^{-10}$
5	D-S-C2-1-M5	Viton [®]	4	75	✓		$6,3 \cdot 10^{-10}$
6	D-S-C2-1-M6	Viton [®]	4	75	✓		$2,7 \cdot 10^{-10}$
7	D-S-C2-2-M2	Viton [®]	4	75	✓		$3,0 \cdot 10^{-10}$
8	D-S-C2-2-M3	Viton [®]	4	75	✓		$2,6 \cdot 10^{-10}$
9	D-S-C2-2-M5	Viton [®]	4	75	✓		$3,2 \cdot 10^{-10}$
10	D-S-C2-2-M6	Viton [®]	4	75	✓		$2,8 \cdot 10^{-10}$
11	D-S-C2-3-M1	Viton[®]	4	75	✓		$1,0 \cdot 10^{-9}$
12	D-S-C2-3-M2	Viton [®]	4	75	✓		$5,1 \cdot 10^{-10}$
13	D-S-C2-3-M3	Viton[®]	4	75	✓		$< 1,0 \cdot 10^{-10}$
14	D-S-C2-3-M5	Viton[®]	4	75	✓		$< 1,0 \cdot 10^{-10}$
15	D-S-C2-3-M6	Viton [®]	4	75	✓		$4,9 \cdot 10^{-10}$

D-S-C3: Ebene Stahlplatte – Viton® 4 mm, Shore80**Abbildung 4.7: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore80, Stahldeckschichten****Tabelle 4.6: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore80, Stahldeckschichten**

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-S-C3-1-M2	Viton®	4	80	✓	42	$4,0 \cdot 10^{-8}$
2	D-S-C3-1-M3	Viton®	4	80	✓		$3,0 \cdot 10^{-10}$
3	D-S-C3-1-M4	Viton®	4	80	✓		$7,2 \cdot 10^{-8}$
4	D-S-C3-1-M5	Viton®	4	80	✓		$6,2 \cdot 10^{-8}$
5	D-S-C3-1-M6	Viton®	4	80	✓		$2,4 \cdot 10^{-10}$
6	D-S-C3-2-M1	Viton®	4	80	✓		$< 1,0 \cdot 10^{-10}$
7	D-S-C3-2-M2	Viton®	4	80	✓		$6,0 \cdot 10^{-9}$
8	D-S-C3-2-M3	Viton®	4	80	✓		$< 1,0 \cdot 10^{-10}$
9	D-S-C3-2-M4	Viton®	4	80	✓		$5,6 \cdot 10^{-9}$
10	D-S-C3-2-M5	Viton®	4	80	✓		$4,4 \cdot 10^{-9}$

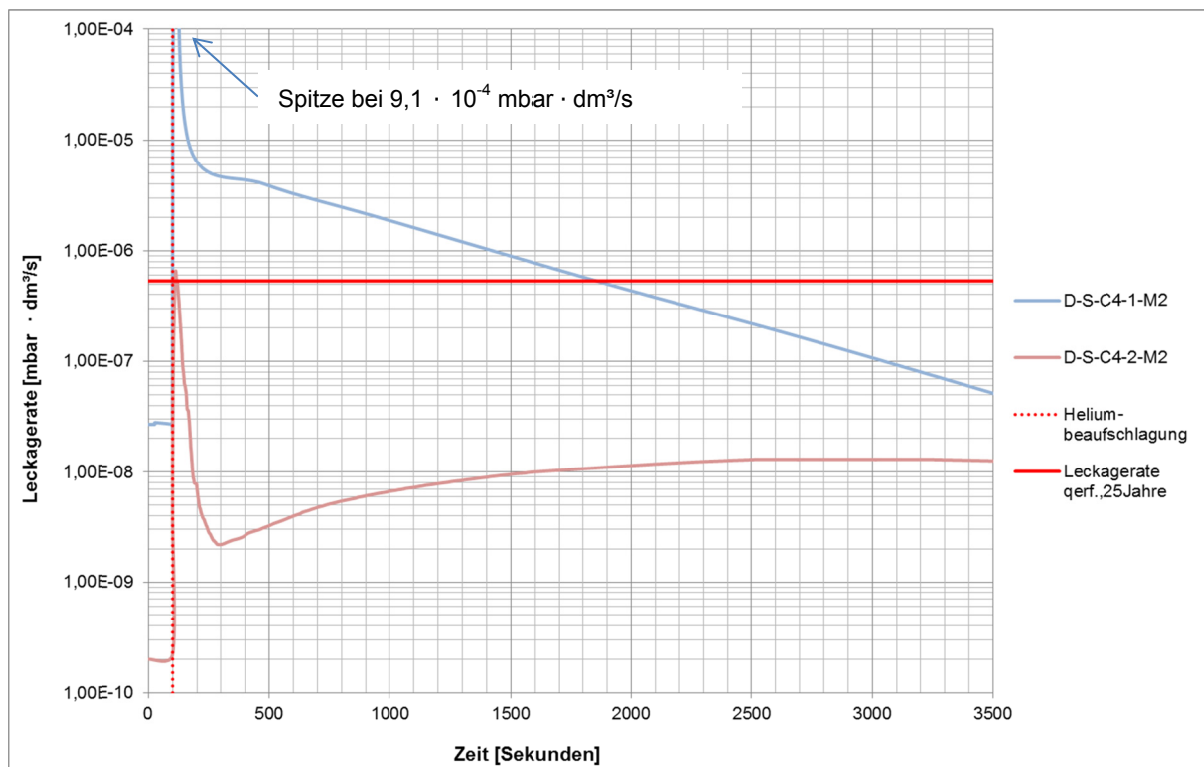
D-S-C4: Ebene Stahlplatte – Viton® 4 mm, Shore90

Abbildung 4.8: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore90, Stahldeckschichten

Die Kurve „D-S-C4-1-M2“ stellt das schlechteste Messergebnis der Messreihe dar. Die Kurve fällt nach dem Ausschlag infolge der Heliumbeaufschlagung um ein ähnliches Niveau verglichen mit der Kurve „D-S-C4-2-M2“ ab. Der Ausgangszustand beider Kurven deutet allerdings schon auf eine Diskontinuität in der Kontaktfläche für die Kurve „D-S-C4-1-M2“ hin. Die Leckagerate zum Zeitpunkt der Heliumbeaufschlagung liegt deutlich über der Leckagerate der Kurve „D-S-C4-2-M2“. Nach der Heliumbeaufschlagung und einem Maximum beider Kurven erreicht die Kurve „D-S-C4-2-M2“ nach ca. 300 Sekunden ein Minimum, welches unterhalb der mittleren Permeation für diese Messreihe liegt. Die Heliumkonzentration im Innern des Versuchskörpers infolge der Diskontinuität steht nun im Gleichgewicht mit den Heliumatomen, die durch den Dichtring in das Elementinnere wandern. Ab diesem Zeitpunkt überwiegt die Permeation. Aufgrund der nun zunehmenden Permeation steigt die Leckagerate für diese Kurve wieder an.

Die Leckagerate zur Kurve „D-S-C4-1-M2“ fällt nach dem Maximum bis zur Versuchsdauer von ca. 250 Sekunden stark ab. Ab diesem Zeitpunkt steigt gleichzeitig neben der im Elementinnern vorhandenen Heliumkonzentration infolge von Diskontinuitäten auch die Konzentration der Heliumatome, die infolge der Permeation in das Elementinnere gelangen. Die Heliumkonzentration infolge von Diskontinuitäten wird grundsätzlich weiter abgebaut, die Konzentration infolge der Permeation steigt jedoch an. Somit kommt es zu einem annähernd linearen Abfall der Messkurve.

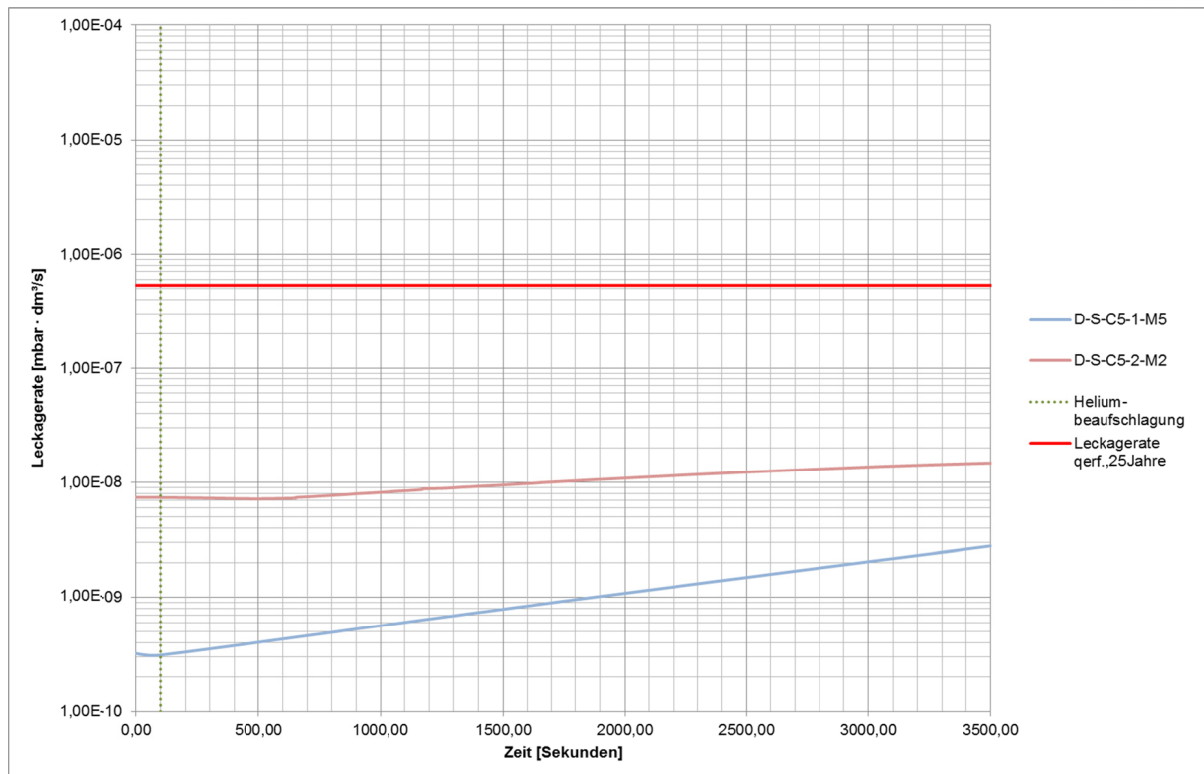
Ein ähnliches Verhalten zeigt auch die Kurve zu dem Messergebnis „D-S-C4-1-M1“. Die

Leckagerate nach Heliumbeaufschlagung ist vergleichbar hoch wie bei der Messung „D-S-C4-1-M2“ (Siehe Tabelle 4.7). Nach dem Maximum infolge Heliumbeanspruchung und einem starken Abfall der Kurve, fällt die Leckagerate mit Hinzukommen des Zustandes der Permeation annähernd linear ab.

Die Kurven zu den Messungen „D-S-C4-1-M3“ und „D-S-C4-1-M6“ verhalten sich vergleichbar mit der Kurve zur Messung „D-S-C4-2-M2“.

Tabelle 4.7: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton[®], 4 mm, Shore90, Stahldeckschichten

Zeile	Versuchsbezeichnung	Dichtringmaterial	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm ³ /s]
1	D-S-C4-1-M1	Viton [®]	4	90	---	100	$8,6 \cdot 10^{-4}$
2	D-S-C4-1-M2	Viton[®]	4	90	---		$9,1 \cdot 10^{-4}$
3	D-S-C4-1-M3	Viton [®]	4	90	---		$9,8 \cdot 10^{-7}$
4	D-S-C4-1-M6	Viton [®]	4	90	---		$1,0 \cdot 10^{-6}$
5	D-S-C4-2-M2	Viton[®]	4	90	---		$6,6 \cdot 10^{-7}$

D-S-C5: Ebene Stahlplatte – Viton® 6 mm, Shore75**Abbildung 4.9: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahldeckschichten****Tabelle 4.8: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahldeckschichten**

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-S-C5-1-M1	Viton®	6	75	✓	0	$7,2 \cdot 10^{-10}$
2	D-S-C5-1-M2	Viton®	6	75	✓		$4,9 \cdot 10^{-9}$
3	D-S-C5-1-M4	Viton®	6	75	✓		$4,6 \cdot 10^{-9}$
4	D-S-C5-1-M5	Viton®	6	75	✓		$1,3 \cdot 10^{-10}$
5	D-S-C5-1-M6	Viton®	6	75	✓		$4,9 \cdot 10^{-9}$
6	D-S-C5-2-M1	Viton®	6	75	✓		$4,7 \cdot 10^{-9}$
7	D-S-C5-2-M2	Viton®	6	75	✓		$7,4 \cdot 10^{-9}$
8	D-S-C5-2-M4	Viton®	6	75	✓		$3,2 \cdot 10^{-9}$
9	D-S-C5-2-M6	Viton®	6	75	✓		$3,2 \cdot 10^{-10}$

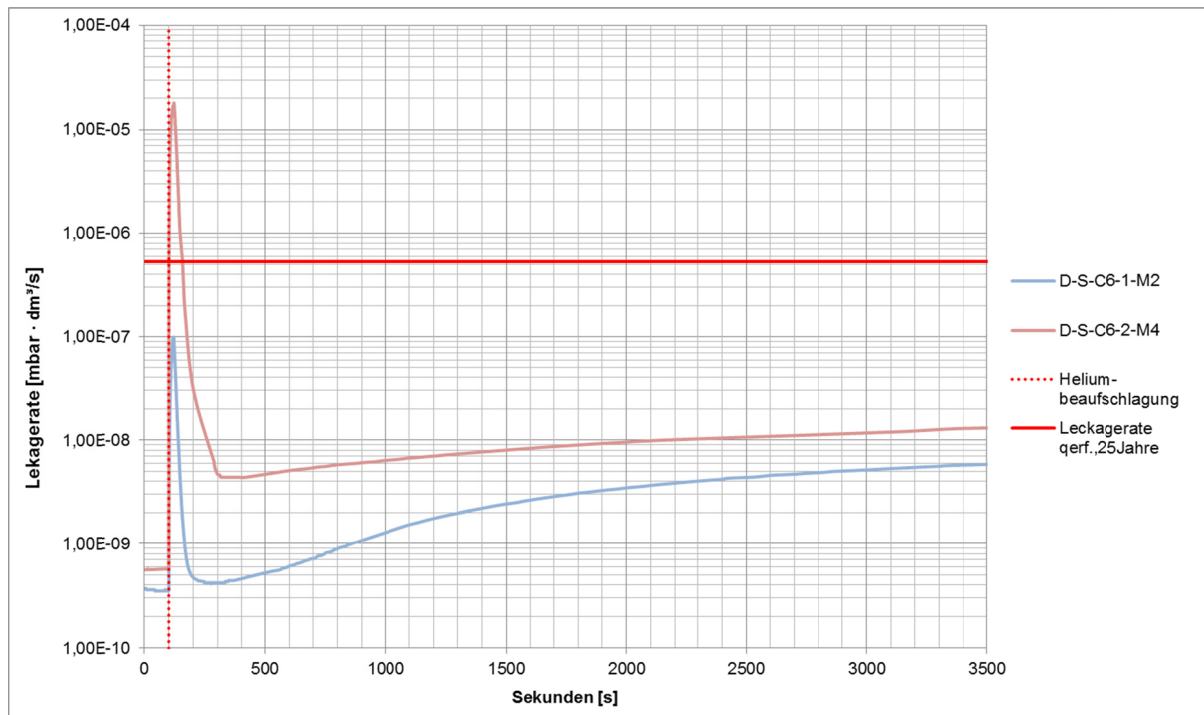
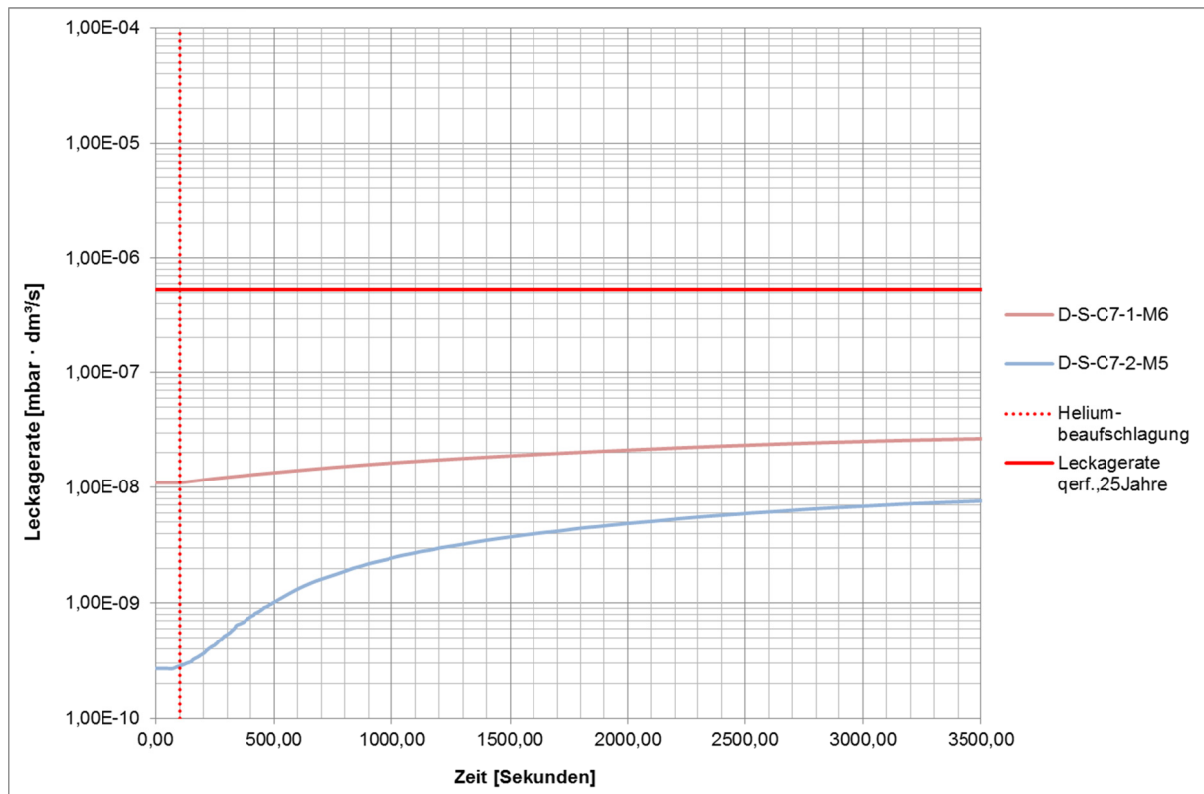
D-S-C6: Ebene Stahlplatte – Viton® 6 mm, Shore90

Abbildung 4.10: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore90, Stahldeckschichten

Tabelle 4.9: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore90, Stahldeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-S-C6-1-M1	Viton®	6	90	---	100	$1,0 \cdot 10^{-6}$
2	D-S-C6-1-M2	Viton®	6	90	✓		$1,0 \cdot 10^{-7}$
3	D-S-C6-1-M4	Viton®	6	90	✓		$1,4 \cdot 10^{-7}$
4	D-S-C6-1-M5	Viton®	6	90	✓		$2,3 \cdot 10^{-7}$
5	D-S-C6-1-M6	Viton®	6	90	---		$1,0 \cdot 10^{-6}$
6	D-S-C6-2-M1	Viton®	6	90	---		$9,9 \cdot 10^{-6}$
7	D-S-C6-2-M2	Viton®	6	90	---		$9,0 \cdot 10^{-6}$
8	D-S-C6-2-M3	Viton®	6	90	---		$1,6 \cdot 10^{-5}$
9	D-S-C6-2-M4	Viton®	6	90	---		$1,8 \cdot 10^{-5}$
10	D-S-C6-2-M5	Viton®	6	90	---		$1,6 \cdot 10^{-5}$
11	D-S-C6-2-M6	Viton®	6	90	---		$1,8 \cdot 10^{-5}$

D-S-C7: Ebene Stahlplatte – Viton® 6 mm, Shore80**Abbildung 4.11: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore80, Stahldeckschichten****Tabelle 4.10: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore80, Stahldeckschichten**

Zeile	Versuchsbezeichnung	Dichtringmaterial	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-S-C7-1-M1	Viton®	6	80	✓	0	$7,3 \cdot 10^{-10}$
2	D-S-C7-1-M2	Viton®	6	80	✓		$3,2 \cdot 10^{-10}$
3	D-S-C7-1-M4	Viton®	6	80	✓		$3,3 \cdot 10^{-10}$
4	D-S-C7-1-M6	Viton®	6	80	✓		$1,1 \cdot 10^{-8}$
5	D-S-C7-2-M1	Viton®	6	80	✓		$7,0 \cdot 10^{-10}$
6	D-S-C7-2-M2	Viton®	6	80	✓		$3,9 \cdot 10^{-9}$
7	D-S-C7-2-M4	Viton®	6	80	✓		$8,5 \cdot 10^{-9}$
8	D-S-C7-2-M5	Viton®	6	80	✓		$2,7 \cdot 10^{-10}$

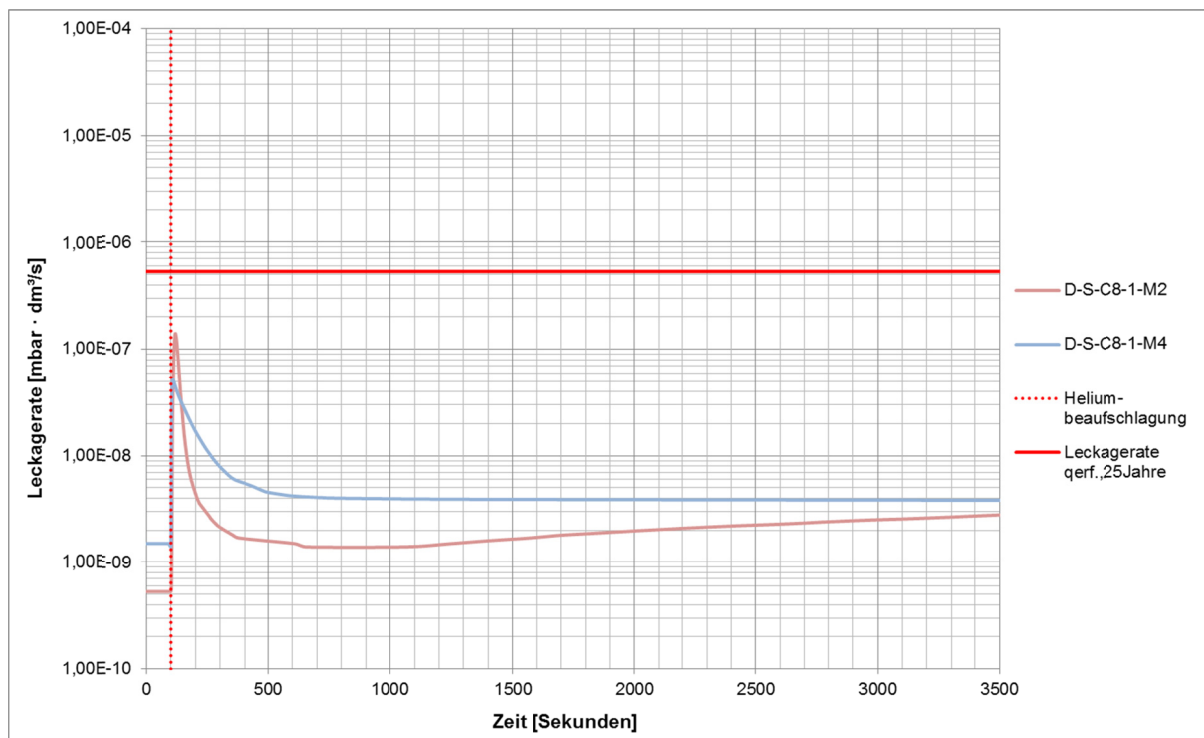
D-S-C8: Ebene Stahlplatte – Viton® 8 mm, Shore75

Abbildung 4.12: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 8 mm, Shore75, Stahldeckschichten

Tabelle 4.11: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 8 mm, Shore75, Stahldeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-S-C8-1-M2	Viton®	8	75	✓	86	$1,4 \cdot 10^{-7}$
2	D-S-C8-1-M4	Viton®	8	75	✓		$8,2 \cdot 10^{-8}$
3	D-S-C8-1-M5	Viton®	8	75	✓		$1,2 \cdot 10^{-7}$
4	D-S-C8-2-M1	Viton®	8	75	✓		$9,7 \cdot 10^{-8}$
5	D-S-C8-2-M2	Viton®	8	75	✓		$9,6 \cdot 10^{-8}$
6	D-S-C8-2-M4	Viton®	8	75	✓		$1,0 \cdot 10^{-7}$
7	D-S-C8-2-M5	Viton®	8	75	✓		$7,3 \cdot 10^{-8}$

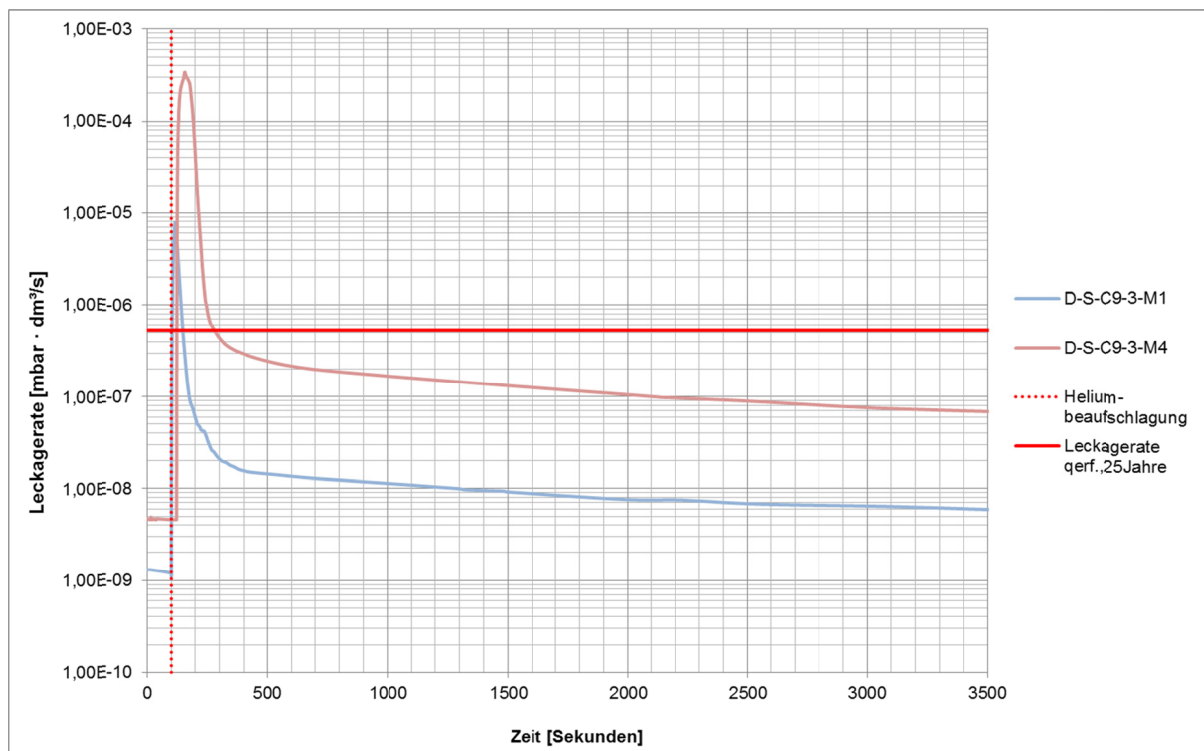
D-S-C9: Ebene Stahlplatte – Viton® 8mm, Shore80

Abbildung 4.13: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 8 mm, Shore80, Stahldeckschichten

Die beiden hier dargestellten Messkurven zeigen ein ähnliches Verhalten wie die beiden Messkurven zum Dichtringmaterial Aflas® in Abbildung 4.4. Der Abfall der Kurve nach dem Maximum infolge der Heliumbeaufschlagung geht ab einer Messdauer von ca. 250 Sekunden in einen geringeren linearen Abfall der Leckagerate über. Der Abbau der Heliumatome ist hier so gering, dass die Leckagerate in dem hier betrachteten Zeitraum den Zustand der Permeation nicht erkennen lässt.

Tabelle 4.12: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton[®], 8 mm, Shore80, Stahldeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm ³ /s]
1	D-S-C9-1-M1	Viton [®]	8	80	---	100	$4,8 \cdot 10^{-5}$
2	D-S-C9-1-M5	Viton [®]	8	80	---		$8,2 \cdot 10^{-5}$
3	D-S-C9-2-M1	Viton [®]	8	80	---		$1,2 \cdot 10^{-5}$
4	D-S-C9-2-M4	Viton [®]	8	80	---		$1,4 \cdot 10^{-5}$
5	D-S-C9-3-M1	Viton[®]	8	80	---		$7,9 \cdot 10^{-6}$
6	D-S-C9-3-M4	Viton[®]	8	80	---		$3,4 \cdot 10^{-4}$
7	D-S-C9-3-M5	Viton [®]	8	80	---		$1,0 \cdot 10^{-5}$

4.2.3 Stofftransport durch Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Glas zu Dichtring“

Zur Bestimmung des Stofftransports durch Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Glas zu Dichtring“ werden neben der Variation von Dichtringdicke und Dichtringhärte (Shore) verschiedene Glasdeckschichten betrachtet – Klarglas, ESG mit Emaillebeschichtung und ESG mit Siebdruckbeschichtung.

Aufgrund der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen in Kapitel 4.2.2 werden im Folgenden nur Dichtringdicken und Dichtringhärten weiter untersucht, die im Mittel eine Leckwahrscheinlichkeit von 0% haben.

Zudem werden die Versuchskörper nur noch einer fünf Sekunden andauernden Heliumbeaufschlagung unterzogen – in den vorherigen Versuchen konnte bezogen auf den Stofftransport durch Diskontinuitäten kein Unterschied zwischen den Ergebnissen einer fünf Sekunden andauernden Beaufschlagung und einer zehn Sekunden andauernden Beaufschlagung festgestellt werden.

Die resultierenden Dichtringkombinationen werden in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 4.13: Übersicht der Versuchsaufbauten zur experimentellen Untersuchung des Stofftransports durch Diskontinuitäten

Zeile	Versuchs- Bezeichnung	Deckschicht				Viton®		Aflas®	
		Stahl	ESG Klar	ESG Siebdruck	ESG Emaille	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Dicke [mm]	Härte [Shore]
1	D-KG-C2	---	X	---	---	4	75	---	---
2	D-KG-C5	---	X	---	---	6	75	---	---
3	D-KG-C7	---	X	---	---	6	80	---	---
4	D-EG-C2	---	---	X	---	4	75	---	---
5	D-EG-C5	---	---	X	---	6	75	---	---
6	D-KG-C7	---	---	X	---	6	80	---	---
7	D-SG-C2	---	---	---	X	4	75	---	---
8	D-SG-C5	---	---	---	X	6	75	---	---
9	D-SG-C7	---	---	---	X	6	80	---	---

Da hier nicht alle Versuchsergebnisse dargestellt werden sollen, werden aus jeder Versuchsreihe zu einer Dichtringeigenschaftenkombination zwei Messreihen – eine gute und eine schlechte Messkurve – exemplarisch für die gesamte Reihe ausgewählt und im Diagramm dargestellt. Alle weiteren Ergebnisse werden unter dem Diagramm in einer Tabelle zusammengefasst dargestellt.

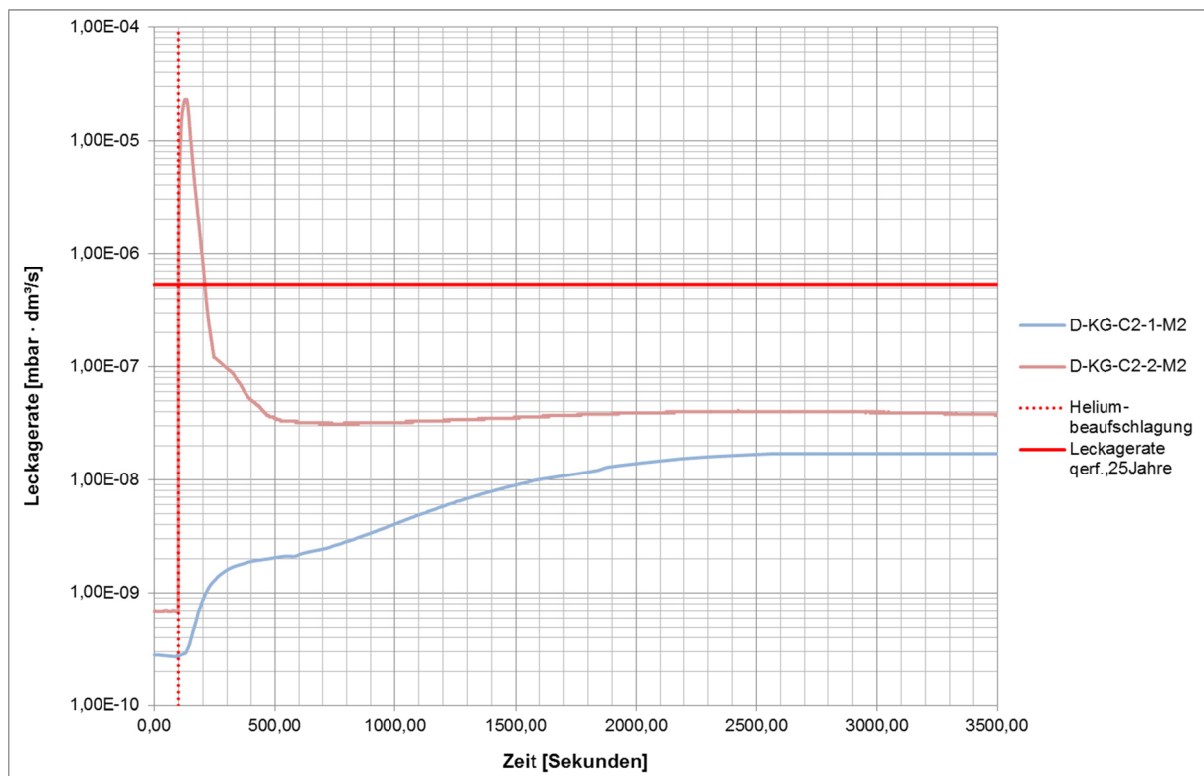
D-KG-C2: ESG klar – Viton® 4 mm, Shore75

Abbildung 4.14: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore75, Stahl- und Klarglasdeckschichten

Tabelle 4.14: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore75, Stahl- und Klarglasdeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-KG-C2-1-M1	Viton®	4	75	✓	25	$2,7 \cdot 10^{-10}$
2	D-KG-C2-1-M2	Viton®	4	75	✓		$1,7 \cdot 10^{-10}$
3	D-KG-C2-2-M1	Viton®	4	75	✓		$9,2 \cdot 10^{-10}$
4	D-KG-C2-2-M2	Viton®	4	75	✓		$2,3 \cdot 10^{-5}$

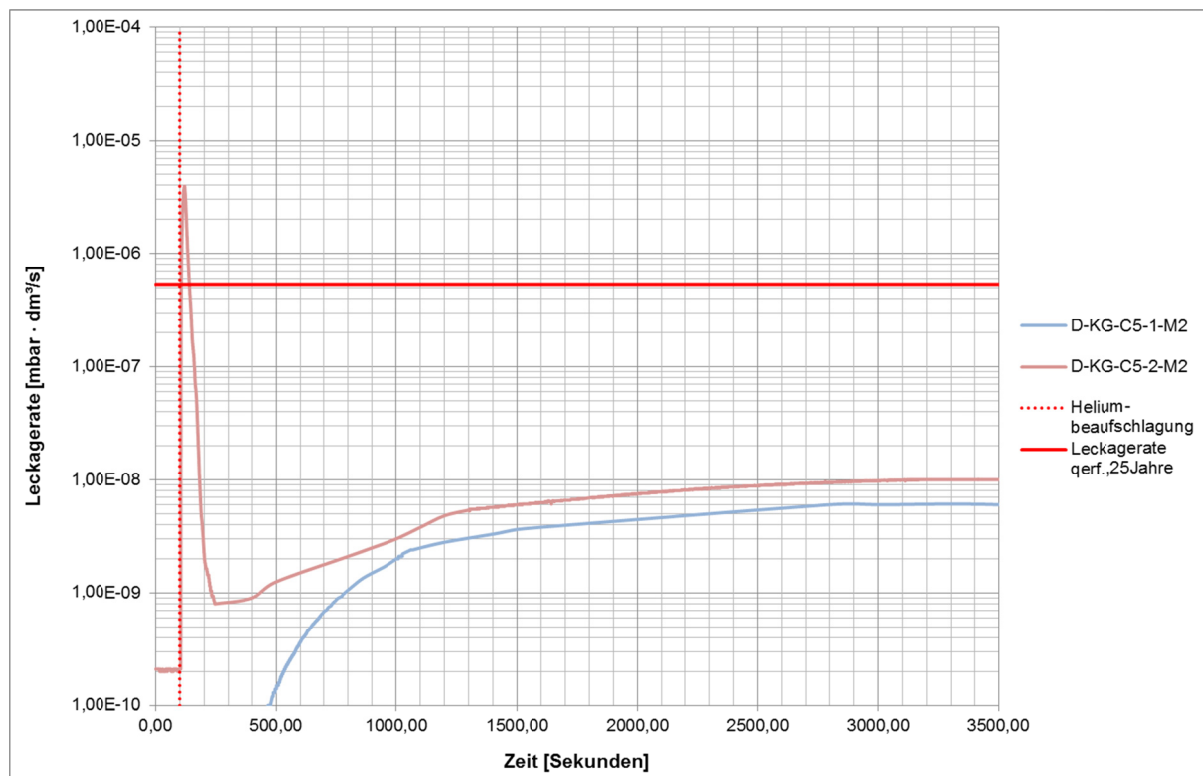
D-KG-C5: ESG klar – Viton® 6 mm, Shore75

Abbildung 4.15: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahl- und Klarglasdeckschicht

Tabelle 4.15: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahl- und Klarglasdeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-KG-C5-1-M1	Viton®	6	75	✓	0	$1,0 \cdot 10^{-10}$
2	D-KG-C5-1-M2	Viton®	6	75	✓		$< 1,0 \cdot 10^{-10}$
3	D-KG-C5-2-M1	Viton®	6	75	✓		$2,3 \cdot 10^{-9}$
4	D-KG-C5-2-M2	Viton®	6	75	✓		$3,9 \cdot 10^{-6}$

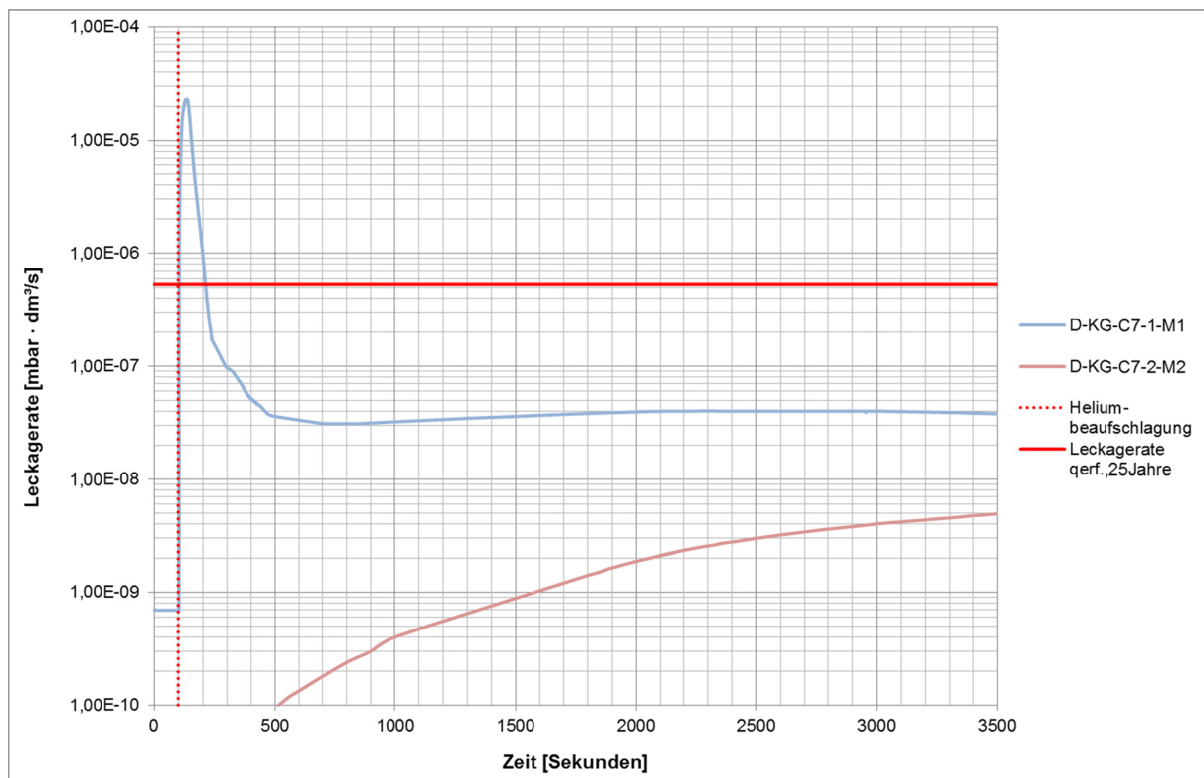
D-KG-C7: ESG klar – Viton® 6 mm, Shore80

Abbildung 4.16: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore80, Stahl- und Klarglasdeckschicht

Tabelle 4.16: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore80, Stahl- und Klarglasdeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-KG-C7-1-M1	Viton®	6	80	---	50	$2,3 \cdot 10^{-5}$
2	D-KG-C7-1-M2	Viton®	6	80	✓		$2,8 \cdot 10^{-10}$
3	D-KG-C7-2-M1	Viton®	6	80	✓		$1,3 \cdot 10^{-8}$
4	D-KG-C7-2-M2	Viton®	6	80	✓		$< 1,0 \cdot 10^{-10}$

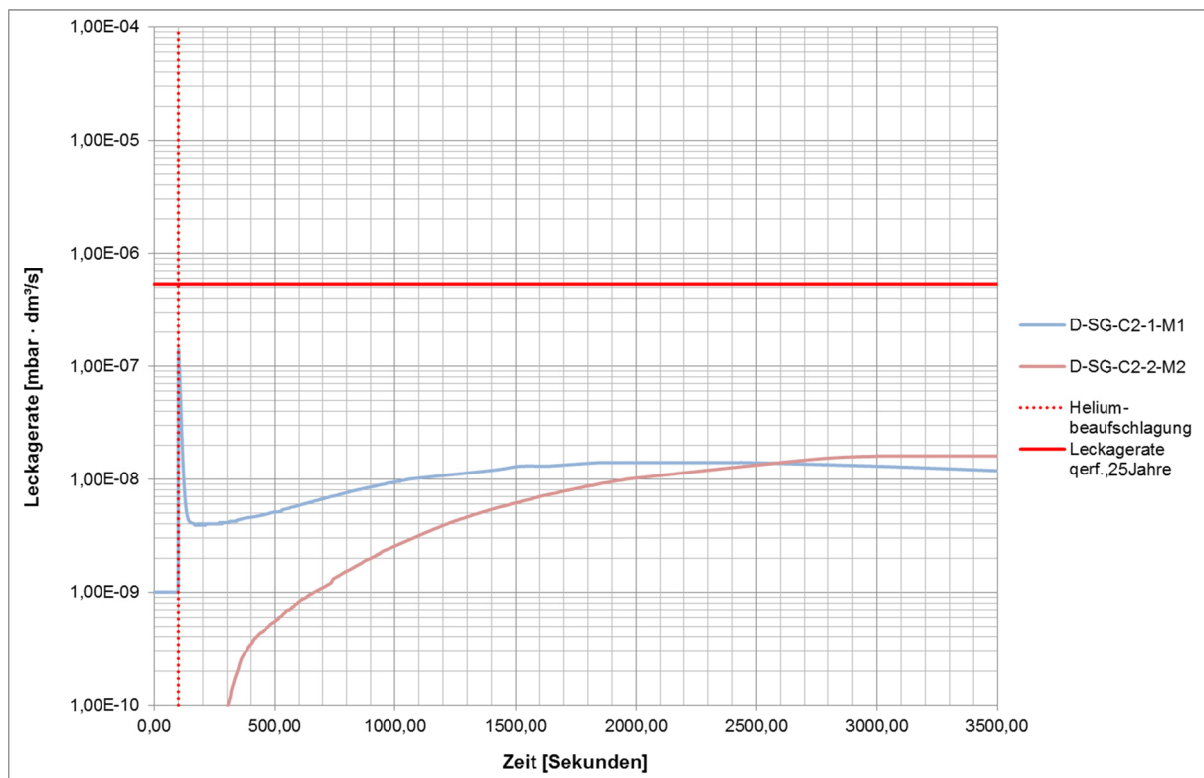
D-SG-C2: ESG mit Siebdruckbeschichtung – Viton® 4 mm, Shore75

Abbildung 4.17: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore75, Stahldeckschicht und siebdruckbeschichtete Glasdeckschicht

Tabelle 4.17: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore75, Stahldeckschicht und siebdruckbeschichtete Glasdeckschicht

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-SG-C2-1-M1	Viton®	4	75	✓	25	$1,4 \cdot 10^{-7}$
2	D-SG-C2-1-M2	Viton®	4	75	✓		$6,4 \cdot 10^{-10}$
3	D-SG-C2-2-M1	Viton®	4	75	✓		$2,0 \cdot 10^{-10}$
4	D-SG-C2-2-M2	Viton®	4	75	✓		$< 1,0 \cdot 10^{-10}$

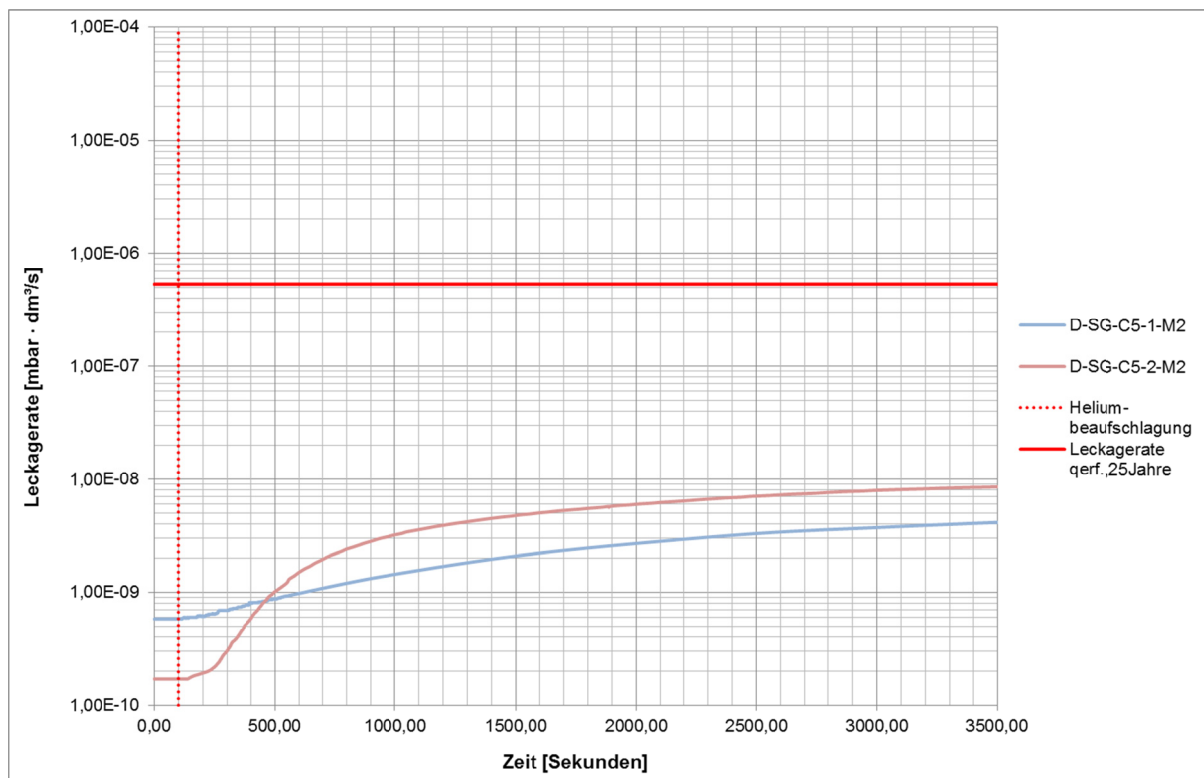
D-SG-C5: ESG mit Siebdruckbeschichtung – Viton® 6 mm, Shore75

Abbildung 4.18: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahldeckschicht und siebdruckbeschichtete Glasdeckschicht

Tabelle 4.18: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahldeckschicht und siebdruckbeschichtete Glasdeckschichten

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-SG-C5-1-M1	Viton®	6	75	✓	0	$5,0 \cdot 10^{-10}$
2	D-SG-C5-1-M2	Viton®	6	75	✓		$5,8 \cdot 10^{-10}$
3	D-SG-C5-2-M1	Viton®	6	75	✓		$2,4 \cdot 10^{-10}$
4	D-SG-C5-2-M2	Viton®	6	75	✓		$1,8 \cdot 10^{-10}$

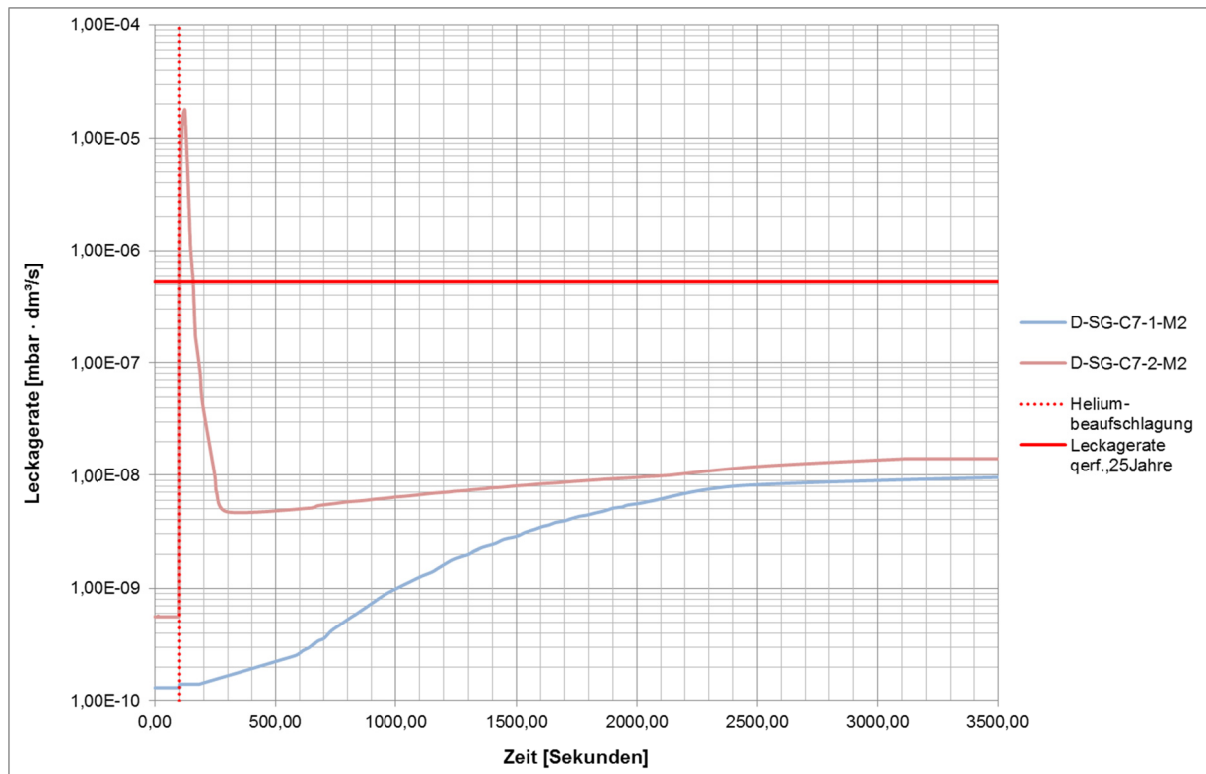
D-SG-C7: ESG mit Siebdruckbeschichtung – Viton® 6 mm, Shore80

Abbildung 4.19: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore80, Stahldeckschicht und siebdruckbeschichtete Glasdeckschicht

Tabelle 4.19: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore80, Stahldeckschicht und siebdruckbeschichtete Glasdeckschicht

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-SG-C7-1-M1	Viton®	6	80	---	75	$3,9 \cdot 10^{-6}$
2	D-SG-C7-1-M2	Viton®	6	80	✓		$1,3 \cdot 10^{-10}$
3	D-SG-C7-2-M1	Viton®	6	80	✓		$4,0 \cdot 10^{-8}$
4	D-SG-C7-2-M2	Viton®	6	80	---		$1,8 \cdot 10^{-5}$

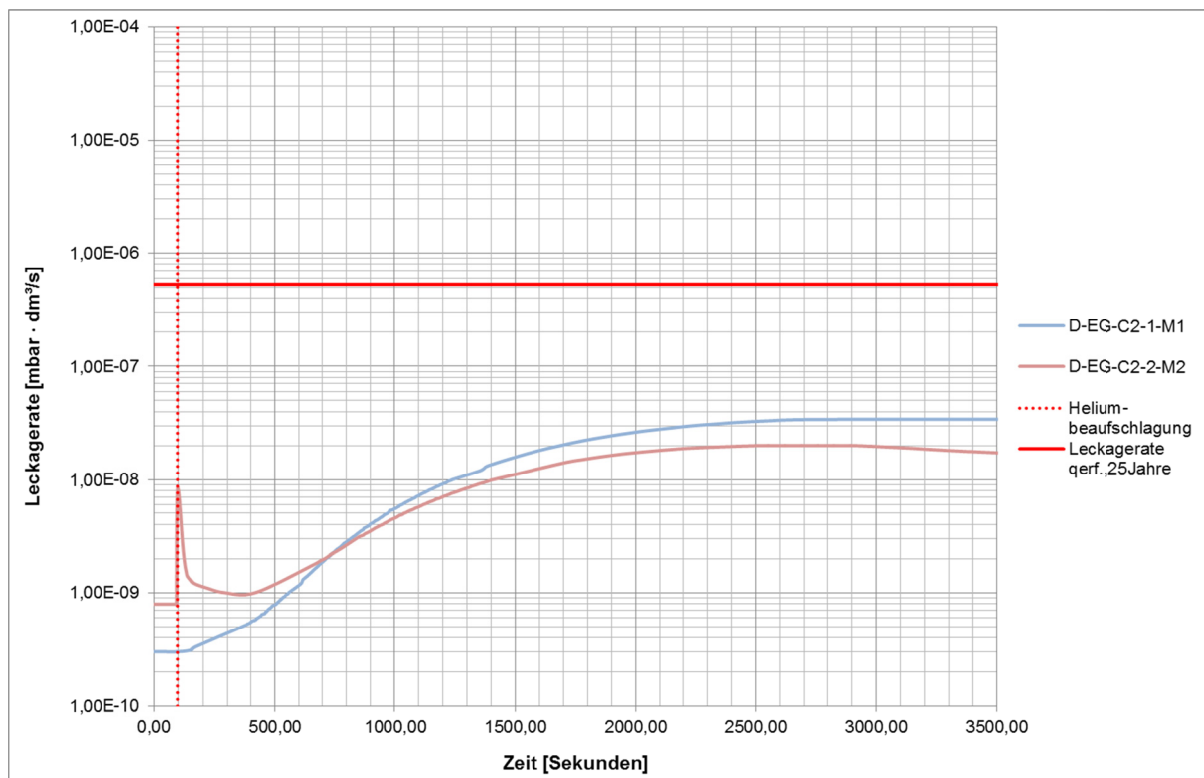
D-EG-C2: ESG mit Emaillebeschichtung – Viton® 4 mm, Shore75

Abbildung 4.20: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore75, Stahldeckschicht und emaillebeschichtete Glasdeckschicht

Tabelle 4.20: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 4 mm, Shore75, Stahldeckschicht und emaillebeschichtete Glasdeckschicht

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-EG-C2-1-M1	Viton®	4	75	✓	50	$3,0 \cdot 10^{-10}$
2	D-EG-C2-1-M2	Viton®	4	75	---		$9,8 \cdot 10^{-7}$
3	D-EG-C2-2-M1	Viton®	4	75	✓		$3,2 \cdot 10^{-10}$
4	D-EG-C2-2-M2	Viton®	4	75	✓		$8,2 \cdot 10^{-9}$

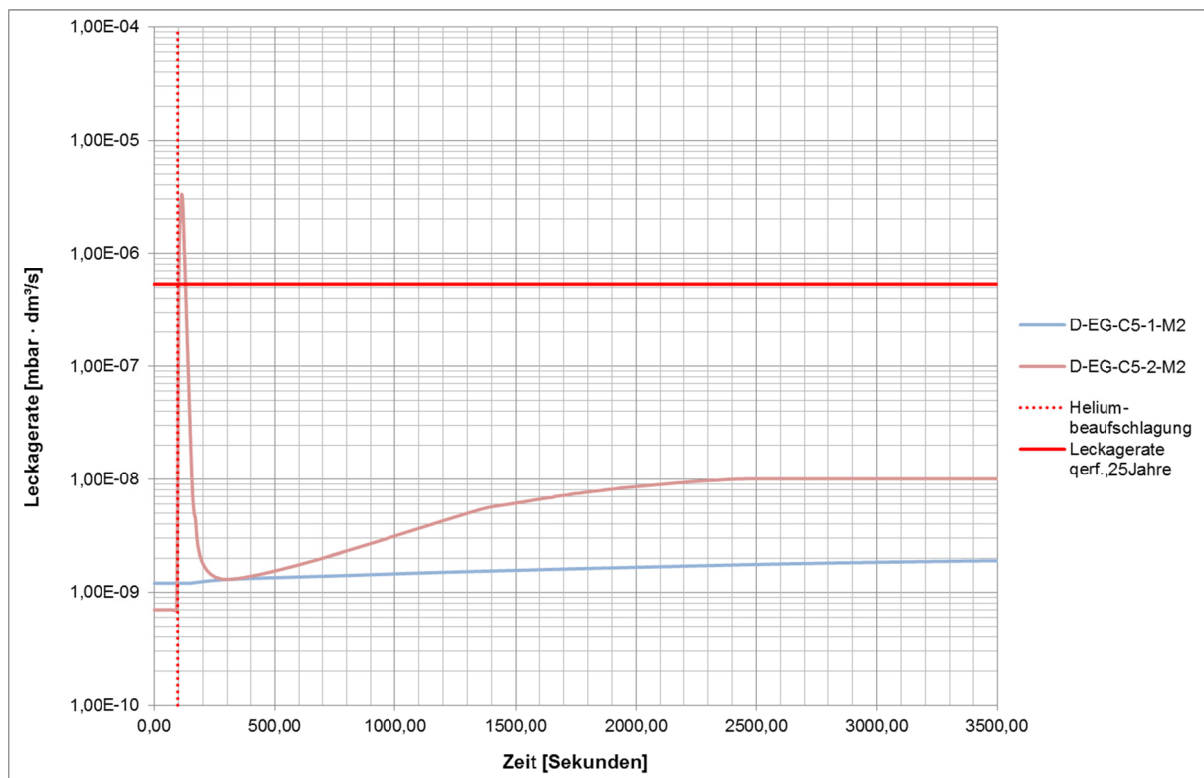
D-EG-C5: ESG mit Emaillebeschichtung – Viton® 6 mm, Shore75

Abbildung 4.21: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahldeckschicht und emaillebeschichtete Glasdeckschicht

Tabelle 4.21: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahldeckschicht und emaillebeschichtete Glasdeckschicht

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-EG-C5-1-M1	Viton®	6	75	✓	50	$1,5 \cdot 10^{-9}$
2	D-EG-C5-1-M2	Viton®	6	75	✓		$1,2 \cdot 10^{-9}$
3	D-EG-C5-2-M1	Viton®	6	75	✓		$7,6 \cdot 10^{-9}$
4	D-EG-C5-2-M2	Viton®	6	75	---		$3,3 \cdot 10^{-6}$

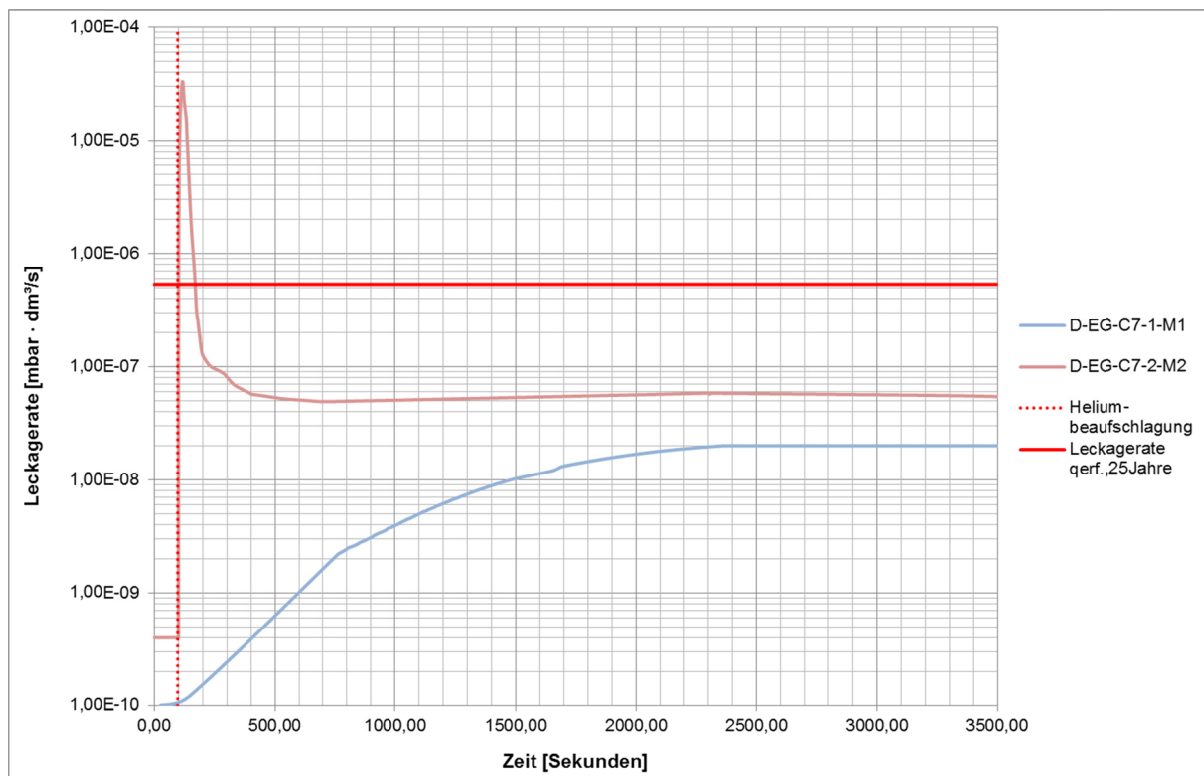
D-EG-C7: ESG mit Emaillebeschichtung – Viton® 6 mm, Shore80

Abbildung 4.22: Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore80, Stahldeckschicht und emaillebeschichtete Glasdeckschicht

Tabelle 4.22: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten für Viton®, 6 mm, Shore80, Stahldeckschicht und emaillebeschichtete Glasdeckschicht

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	D-EG-C7-1-M1	Viton®	6	80	✓	75	$1,0 \cdot 10^{-10}$
2	D-EG-C7-1-M2	Viton®	6	80	✓		$1,3 \cdot 10^{-5}$
3	D-EG-C7-2-M1	Viton®	6	80	✓		$8,5 \cdot 10^{-9}$
4	D-EG-C7-2-M2	Viton®	6	80	---		$3,3 \cdot 10^{-5}$

4.3 Experimentelle Untersuchungen zum Stofftransport durch den Festkörper

4.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Versuchsdurchführung unterscheidet sich zu den vorangegangenen Untersuchungen hinsichtlich Versuchsaufbau und Heliumbeaufschlagungsdauer.

Vor dem Zusammenbau des Versuchskörpers werden alle Prüfteile gereinigt. Dann wird der Dichtring auf einer unteren Stahlplatte mit den Abmessungen 500 x 500 x 10 mm positioniert. Diese untere Platte variiert in Abhängigkeit der Versuchsdurchführung hinsichtlich ihrer Ausführung:

- Ebene Stahloberfläche
- Stahloberfläche mit runder Nut
- Stahloberfläche mit eckiger Nut

Bei den beiden letztgenannten Ausführungen wird der Dichtring jeweils in die Nut eingelegt. Diese Nut entspricht den Lagerbedingungen des Dichtrings im VIGS. Der Vergleich dieser drei Nut-Ausführungen soll zeigen, ob die geschützte Lagerung des Dichtrings in der Nut gegenüber der freien Positionierung auf der ebenen Stahlplatte zu einer reduzierten Permeation führt bzw. inwiefern eine alternative Ausführung der Nutgeometrie die Permeationseigenschaften beeinflusst.

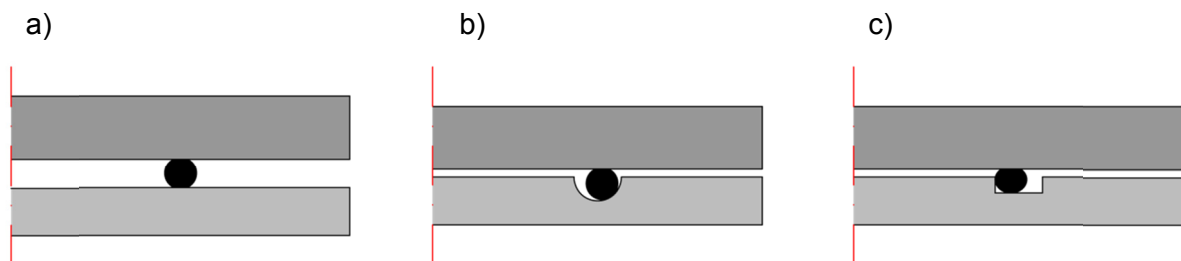


Abbildung 4.23: Geometrievarianten der Nut (Bild a: ohne Nut; Bild b: runde Nut; Bild c: eckige Nut)

Im nächsten Schritt wird dann die zweite Stahlplatte gleicher Abmessung auf den Dichtring aufgelegt. Bei diesem Versuchsaufbau befindet sich der Flansch, über den der Versuchskörper mit einer Vakuumpumpe verbunden wird, an dieser oberen Platte. Der Versuchskörper wird nach dem Zusammenfügen gedreht, in den Versuchsstand eingelegt und über einen Hydraulikzylinder mit einer vertikalen Last von mindestens 2 kN/m bezogen auf die Ringlänge zusammengedrückt. [51] Die Stahlrahmen des Versuchsstandes sorgen für eine gezielte Kraftweiterleitung auf den Dichtring.

Die Evakuierung des Hohlraumes zwischen den Stahlplatten und dem Dichtring erfolgt zunächst über eine Drehschieberpumpe und im Feinvakuumbereich über einen

Heliumleckdetektor mit integrierter Turbopumpe. Mit Aktivieren des Heliumlecktesters kann auch der Anpressdruck an den Stahlplatten gelöst werden.

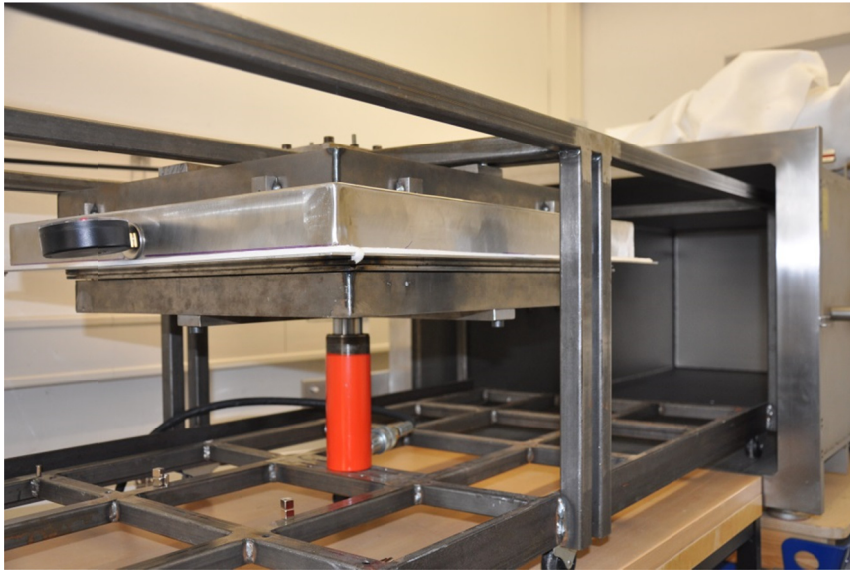


Abbildung 4.24: Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung des Stofftransportes durch den Festkörper

Dann wird ein metallischer Deckel über den Versuchskörper gesetzt, so dass der Versuchskörper sich im Prinzip in einer Kammer befindet. Diese Kammer hat eine Öffnung, über die der Raum der Kammer evakuiert und anschließend mit Helium beaufschlagt werden kann. Nach der Heliumbeaufschlagung wird die Öffnung verschlossen, wodurch der Versuchskörper einer dauerhaften Heliumatmosphäre ausgesetzt ist.

Der Versuchskörper wird kontinuierlich weiter evakuiert, bis es zu einem Anstieg der Leckagerate kommt und sich ein konstanter Wert einstellt.

Die Versuche finden bei Raumtemperaturen von 20 °C bis 21°C statt.

Um zu gewährleisten, dass zu Beginn jedes neuen Versuchs der Heliumleckdetektor nicht mit Helium aus einem Vorversuch belastet ist, erfolgt parallel zu der Vorevakuierung über die Drehschieberpumpe eine Regeneration des Leckdetektors vor jeder weiteren Messung.

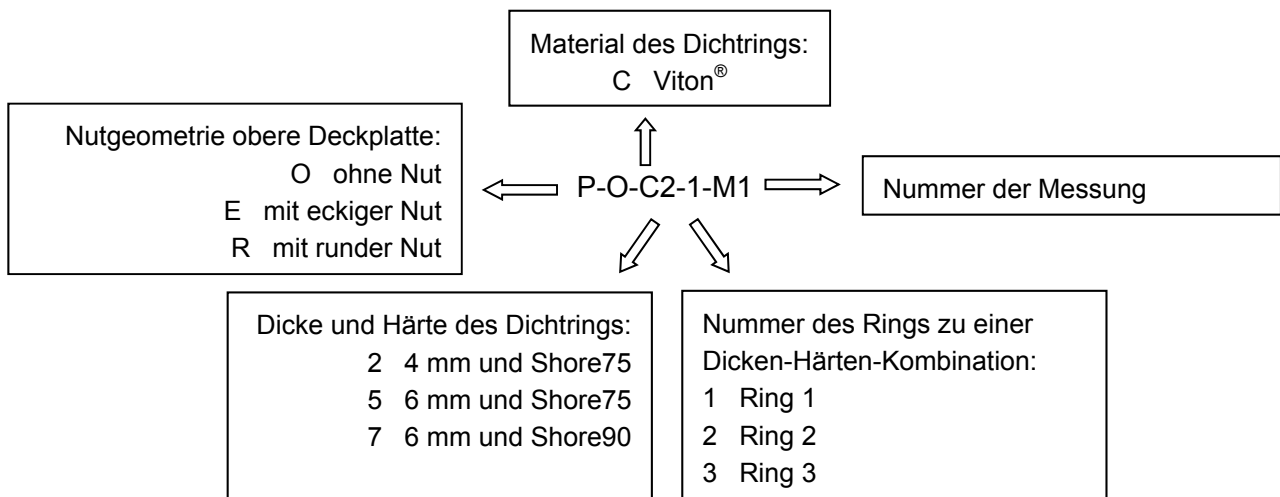
In Bezug zu der in Kapitel 3.7 beschriebenen geforderten Dauerhaftigkeit für Dämmstoffe von 25 Jahren bzw. der in absehbarer Zeit unter Umständen geforderten Dauerhaftigkeit von 50 Jahren, ergeben sich für die hier betrachteten Versuchskörper mit einer Dichtebene bzw. zwei Kontaktflächen die folgende erforderliche Leckagerate, die zu unterschreiten ist:

- $5,33 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$ ($2,67 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$ für 50 Jahre)

Insgesamt gelten bei den experimentellen Untersuchungen und der Auswertung die folgenden Randbedingungen:

- Abmessungen Versuchskörper: 500 x 500 mm.
- Heliumbeaufschlagung, bis sich eine konstante Leckagerate einstellt.
- Leckageraten kleiner $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$ werden aufgrund erhöhter Ungenauigkeit des Messgerätes in diesem Vakuumbereich als eine Leckagerate $< 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \text{dm}^3/\text{s}$ dargestellt.
- Dichtringeigenschaftenkombinationen, bei denen Leckageraten auftreten, die die Anforderungen an eine Dauerhaftigkeit von 25 Jahren nicht einhalten (siehe Grenzwerte oben) werden bei den weiteren experimentellen Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

Die Kennzeichnung der einzelnen Versuche basiert auf der folgenden Grundlage – das ‚P‘ steht hier für den Stofftransport infolge der Permeation:



4.3.2 Stofftransport durch den Festkörper

Zur Bestimmung der Permeation durch den Dichtring sollen verschiedene Dichtringhärten (Shore) und verschiedene Nut-Geometrien untersucht werden.

Vor dem Hintergrund der vorangegangenen Untersuchungen haben sich jedoch lediglich die Ringkombinationen 4 mm und Shore75 (C2) sowie 6 mm und Shore75 (C5) als geeignete Dichtringkombinationen für den Einsatz in einem VIGS gezeigt. Eine Unterscheidung verschiedener Härten fällt hier somit weg.

Eine Unterscheidung der Dicke kann theoretisch auch vernachlässigt werden, weil der Einfluss der Dicken rechnerisch berücksichtigt werden könnte. Dieser Einfluss soll dennoch im Rahmen der Versuchsreihe „Stahldeckschichten ohne Nut“ für die beiden Dicken 4 mm und 6 mm bei Shore75 (C2 und C5) betrachtet werden.

Die somit zu untersuchenden Kombinationen werden in der folgenden Tabelle aufgezeigt:

Tabelle 4.23: Übersicht der Versuchsaufbauten zur experimentellen Untersuchung des Stofftransports in Form von Permeation

Zeile	Versuchs- Bezeichnung	Eigenschaft Stahldeckschicht	Viton®	
			Dicke [mm]	Härte [Shore]
1	P-O-C2	ohne Nut	4	75
2	P-O-C5	ohne Nut	6	75
3	P-E-C5	mit eckiger Nut	6	75
4	P-R-C5	mit runder Nut	6	75

Da hier nicht alle Versuchsergebnisse dargestellt werden sollen, wird aus jeder Versuchsreihe zu einer Dichtringeigenschaftenkombination ein Ergebnisdiagramm exemplarisch für die gesamte Reihe ausgewählt und dargestellt (die zugehörigen Messwerte werden in der jeweils folgenden Tabelle dick hervorgehoben).

Die Diagramme sind im Vergleich zu den vorangegangenen Diagrammen zum Stofftransport durch Diskontinuitäten in abgeänderter Form dargestellt. Abbildung 4.25 erläutert die Diagramme.

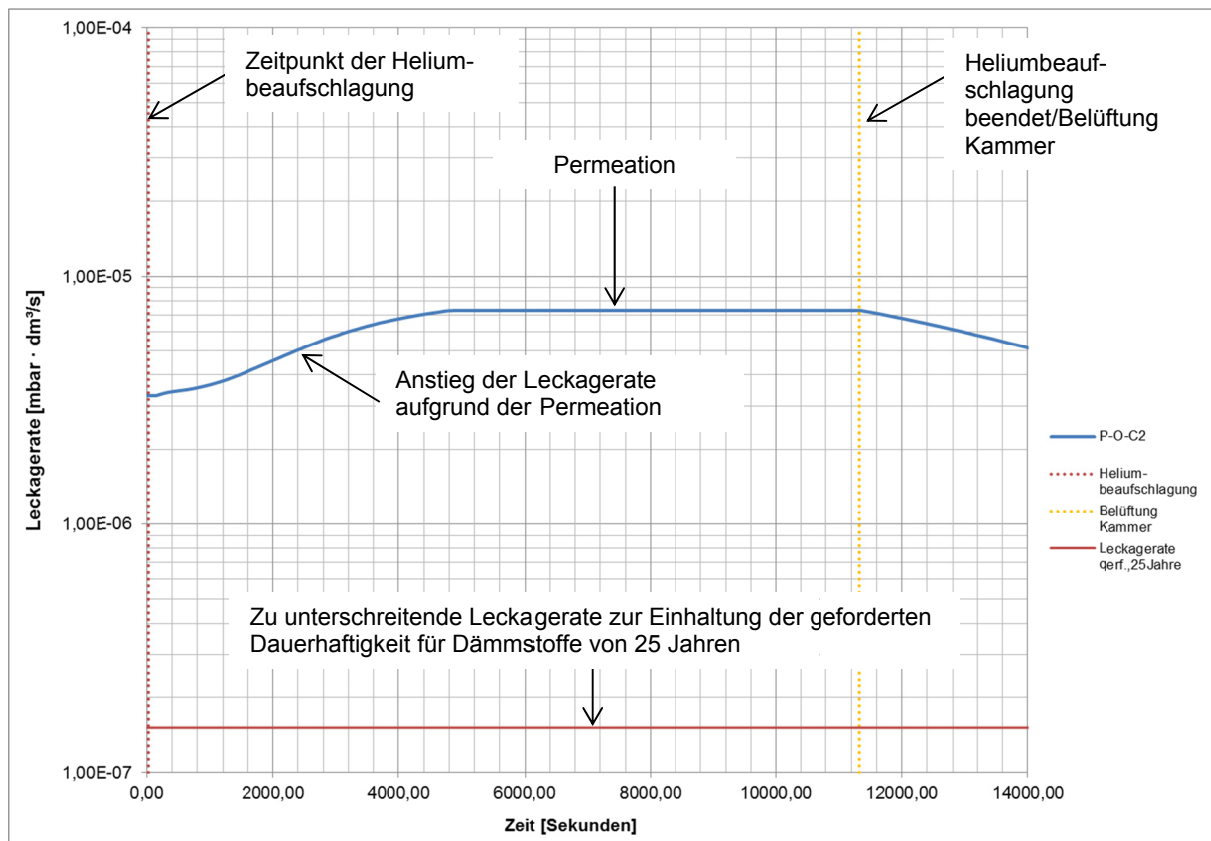
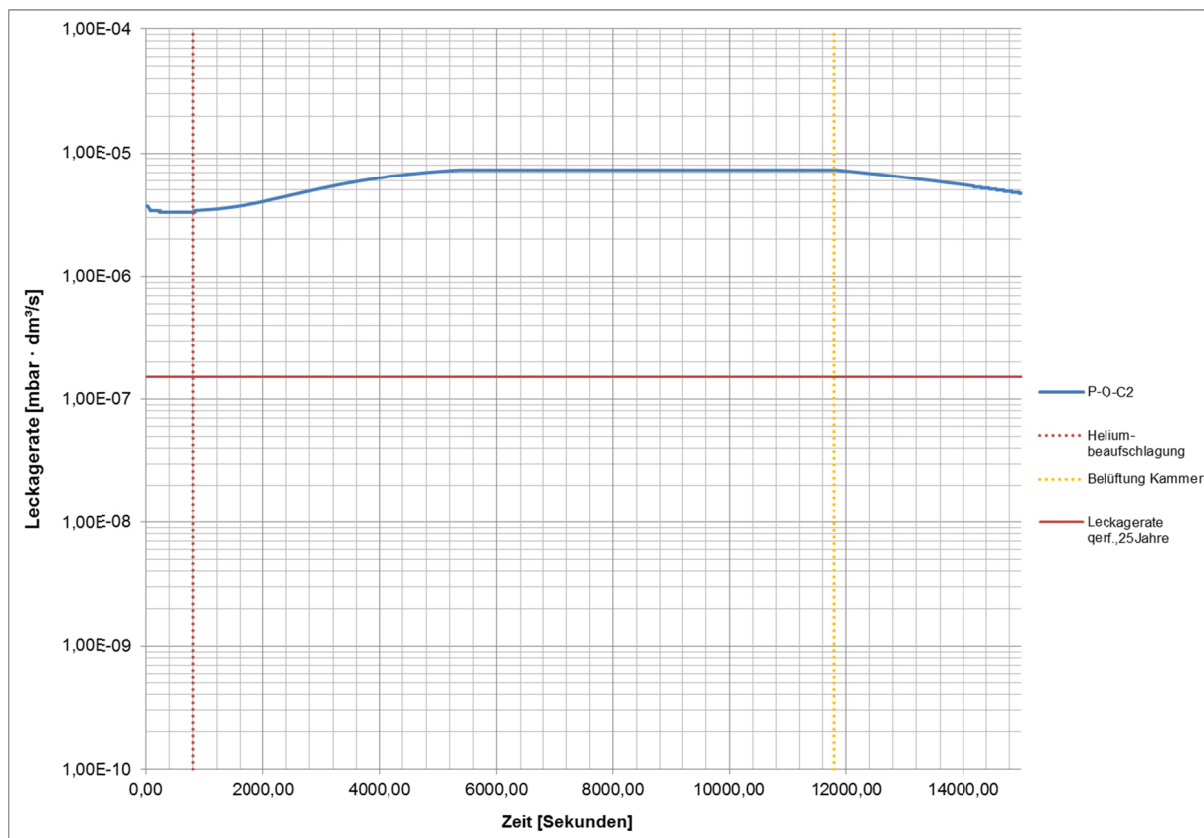
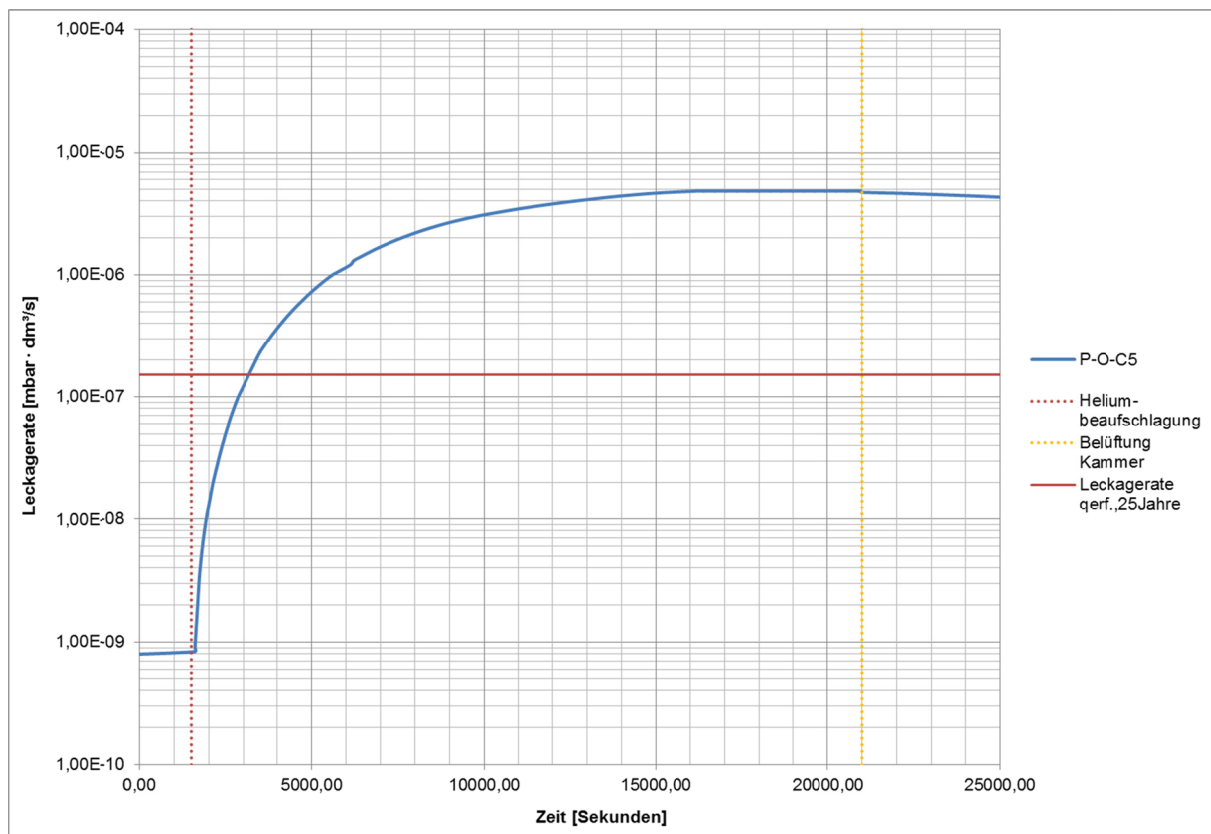


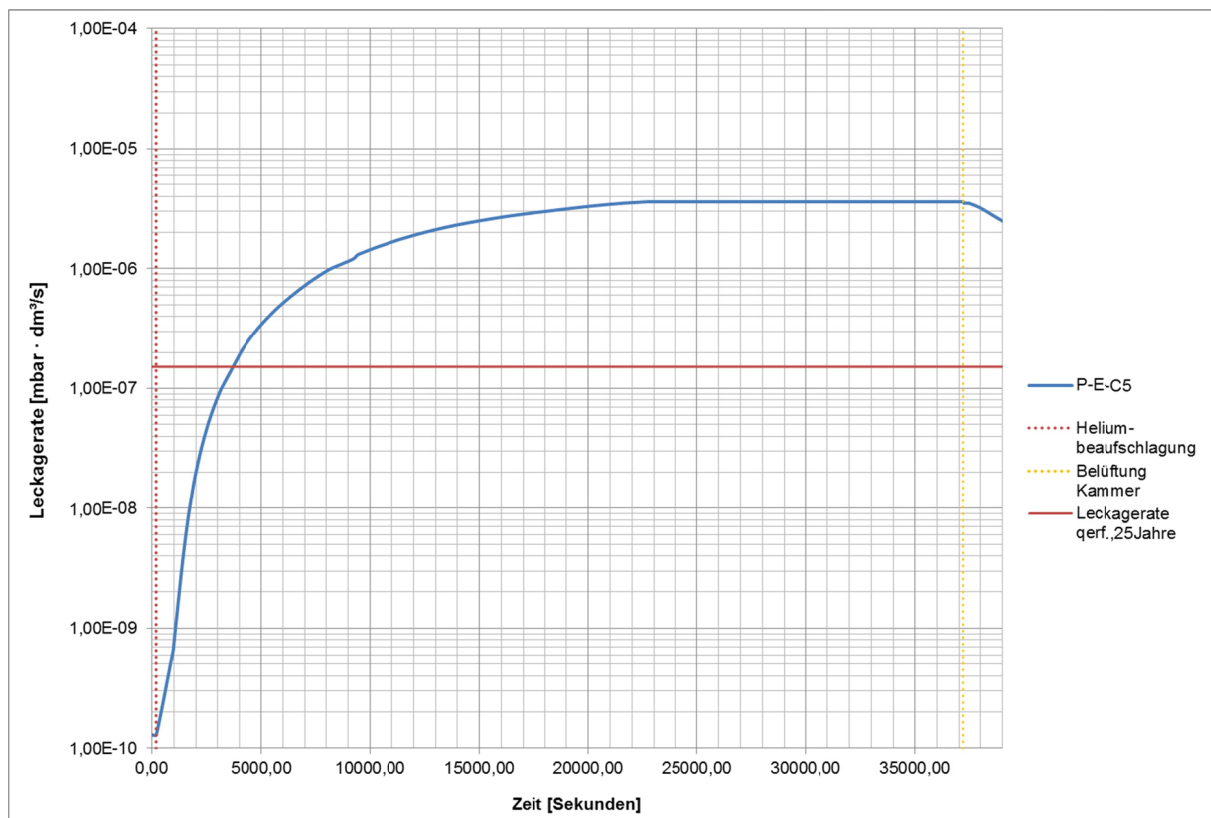
Abbildung 4.25: Erläuterung Messkurve zur Permeation; hier für Viton[®], 4 mm, Shore75, keine Nut

P-O-C2: Ebene Stahlplatte – Viton® 4 mm, Shore75**Abbildung 4.26: Leckagerate infolge Permeation für Viton®, 4 mm, Shore75, keine Nut****Tabelle 4.24: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge Permeation für Viton®, 4 mm, Shore75, Stahldeckschichten, keine Nut**

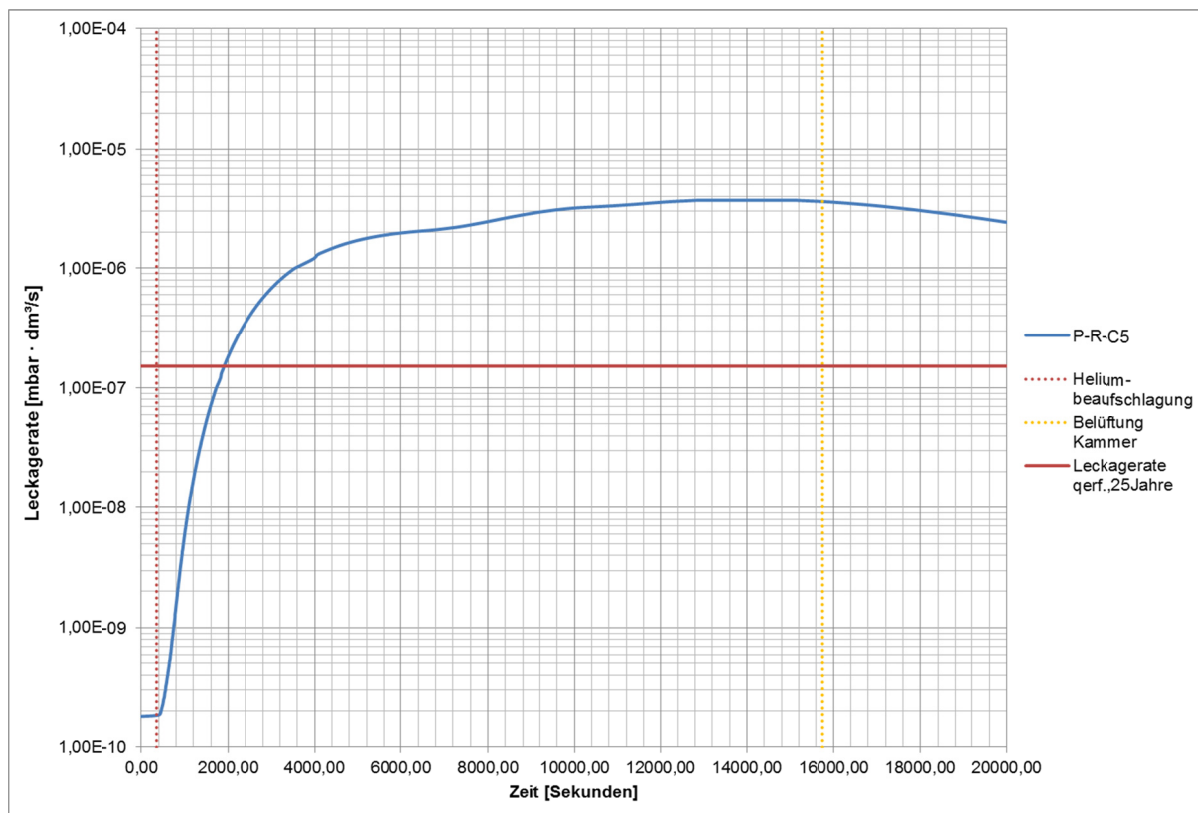
Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-O-C2-1-M1	Viton®	4	75	---	$7,3 \cdot 10^{-6}$
2	P-O-C2-2-M1	Viton®	4	75	---	$7,2 \cdot 10^{-6}$

P-O-C5: Ebene Stahlplatte – Viton® 6 mm, Shore75**Abbildung 4.27: Leckagerate infolge Permeation für Viton®, 6 mm, Shore75, keine Nut****Tabelle 4.25: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge Permeation für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahldeckschichten, keine Nut**

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-O-C5-1-M1	Viton®	6	75	---	$4,8 \cdot 10^{-6}$
2	P-O-C5-2-M1	Viton®	6	75	---	$4,7 \cdot 10^{-6}$

P-E-C5: Stahlplatte mit eckiger Nut – Viton® 6 mm, Shore75**Abbildung 4.28: Leckagerate infolge Permeation für Viton®, 6 mm, Shore75, in eckiger Nut****Tabelle 4.26: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge Permeation für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahldeckschichten in eckiger Nut**

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-E-C5-1-M1	Viton®	6	75	---	$3,5 \cdot 10^{-6}$
2	P-E-C5-2-M1	Viton®	6	75	---	$3,6 \cdot 10^{-6}$

P-R-C5: Stahlplatte mit runder Nut – Viton® 6 mm, Shore75**Abbildung 4.29: Leckagerate infolge Permeation für Viton®, 6 mm, Shore75, runde Nut****Tabelle 4.27: Übersicht der Versuchsergebnisse zur Leckagerate infolge Permeation für Viton®, 6 mm, Shore75, Stahldeckschichten in runder Nut**

Zeile	Versuchs- bezeichnung	Dichtring- material	Dicke [mm]	Härte [Shore]	Grenzwert eingehalten	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-R-C5-1-M1	Viton®	6	75	---	$3,5 \cdot 10^{-6}$
2	P-R-C5-2-M1	Viton®	6	75	---	$3,7 \cdot 10^{-6}$

5. AUSWERTUNG UND DISKUSSION ZUR GESAMTLECKAGERATE UND DAUERHAFTIGKEIT EINES VIGS

5.1 Auswertung und Diskussion zu den Untersuchungsergebnissen der Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen

5.1.1 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

In Kapitel 4.2 dieser Arbeit wurden die Untersuchungen zu den Leckageraten aufgrund von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen „Stahl zu Dichtring“ und „Dichtring zu Glas“ in Abhängigkeit der folgenden Parameter aufgezeigt:

- Dichtringmaterial
- Dichtringdicke
- Dichtringhärte
- Glasbeschichtung

Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind in Tabelle 5.1 bzw. Tabelle 5.3 zusammengefasst dargestellt.

Bei den Messergebnissen zu den Diskontinuitäten muss unterschieden werden zwischen Leckageraten, die unmittelbar nach der Heliumbeaufschlagung einen konstanten Wert halten, bis der Einfluss der Permeation eintritt, und Leckageraten, die unmittelbar nach der Heliumbeaufschlagung stark ansteigen. Derartige Maxima zeigen Diskontinuitäten in den Kontaktflächen an.

Die zugehörigen Messergebnisse der Leckagerate, die den geforderten Grenzwert für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit eines kleinformatigen VIGS nicht einhalten, werden in den folgenden Tabellen rot markiert.

Tabelle 5.1: Leckageraten aufgrund von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen „Stahl-Dichtring-Stahl“

Zeile	Leckagerate [mbar · dm³/s]					
1	<i>D-S-A1-1-M1</i> $5,60 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-A1-1-M2</i> $5,40 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-A1-3-M1</i> $4,60 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-A1-1-M4</i> $1,40 \cdot 10^{-4}$	<i>D-S-A1-1-M5</i> $5,90 \cdot 10^{-4}$	<i>D-S-A1-3-M4</i> $7,40 \cdot 10^{-5}$
2	<i>D-S-A1-2-M1</i> $5,00 \cdot 10^{-7}$	<i>D-S-A1-2-M2</i> $1,00 \cdot 10^{-4}$	<i>D-S-A1-3-M2</i> $6,70 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-A1-2-M4</i> $1,00 \cdot 10^{-4}$	<i>D-S-A1-2-M5</i> $1,40 \cdot 10^{-4}$	<i>D-S-A1-3-M5</i> $7,00 \cdot 10^{-5}$
3	<i>D-S-C1-1-M1</i> $4,00 \cdot 10^{-8}$	<i>D-S-C1-1-M2</i> $< 1,00 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C1-1-M3</i> $3,43 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C1-1-M4</i> $2,10 \cdot 10^{-8}$	<i>D-S-C1-1-M5</i> $< 1,00 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C1-1-M6</i> ---
4	<i>D-S-C2-1-M1</i> $2,75 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-1-M2</i> $3,49 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-1-M3</i> $1,00 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C2-1-M4</i> $2,79 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-1-M5</i> $6,30 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-1-M6</i> $2,69 \cdot 10^{-10}$
5	<i>D-S-C2-2-M1</i> ---	<i>D-S-C2-2-M2</i> $3,00 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-2-M3</i> $2,55 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-2-M4</i> ---	<i>D-S-C2-2-M5</i> $3,20 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-2-M6</i> $2,80 \cdot 10^{-10}$
6	<i>D-S-C2-3-M1</i> $1,00 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C2-3-M2</i> $5,09 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-3-M3</i> $< 1,00 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-3-M4</i> ---	<i>D-S-C2-3-M5</i> $< 1,00 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C2-3-M6</i> $4,90 \cdot 10^{-10}$
7	<i>D-S-C3-1-M1</i> ---	<i>D-S-C3-1-M2</i> $4,00 \cdot 10^{-8}$	<i>D-S-C3-1-M3</i> $3,00 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C3-1-M4</i> $7,20 \cdot 10^{-8}$	<i>D-S-C3-1-M5</i> $6,20 \cdot 10^{-8}$	<i>D-S-C3-1-M6</i> $2,40 \cdot 10^{-10}$
8	<i>D-S-C3-2-M1</i> $< 1,00 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C3-2-M2</i> $6,00 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C3-2-M3</i> $< 1,00 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C3-2-M4</i> $5,60 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C3-2-M5</i> $4,40 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C3-2-M6</i> ---
9	<i>D-S-C4-1-M1</i> $8,60 \cdot 10^{-4}$	<i>D-S-C4-1-M2</i> $9,10 \cdot 10^{-4}$	<i>D-S-C4-1-M3</i> $9,80 \cdot 10^{-7}$	<i>D-S-C4-1-M4</i> ---	<i>D-S-C4-1-M5</i> ---	<i>D-S-C4-1-M6</i> $1,00 \cdot 10^{-6}$
10	<i>D-S-C4-2-M1</i> ---	<i>D-S-C4-2-M2</i> $6,60 \cdot 10^{-7}$	<i>D-S-C4-2-M3</i> ---	<i>D-S-C4-2-M4</i> ---	<i>D-S-C4-2-M5</i> ---	<i>D-S-C4-2-M6</i> ---
11	<i>D-S-C5-1-M1</i> $7,20 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C5-1-M2</i> $4,90 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C5-1-M3</i> ---	<i>D-S-C5-1-M4</i> $4,63 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C5-1-M5</i> $1,30 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C5-1-M6</i> $4,90 \cdot 10^{-9}$
12	<i>D-S-C5-2-M1</i> $4,67 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C5-2-M2</i> $7,40 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C5-2-M3</i> ---	<i>D-S-C5-2-M4</i> $3,20 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C5-2-M5</i> ---	<i>D-S-C5-2-M6</i> $3,20 \cdot 10^{-10}$
13	<i>D-S-C6-1-M1</i> $1,00 \cdot 10^{-6}$	<i>D-S-C6-1-M2</i> $1,00 \cdot 10^{-7}$	<i>D-S-C6-1-M3</i> ---	<i>D-S-C6-1-M4</i> $1,40 \cdot 10^{-7}$	<i>D-S-C6-1-M5</i> $2,30 \cdot 10^{-7}$	<i>D-S-C6-1-M6</i> $1,00 \cdot 10^{-6}$
14	<i>D-S-C6-2-M1</i> $9,90 \cdot 10^{-6}$	<i>D-S-C6-2-M2</i> $9,00 \cdot 10^{-6}$	<i>D-S-C6-2-M3</i> $1,60 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-C6-2-M4</i> $1,80 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-C6-2-M5</i> $1,60 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-C6-2-M6</i> $1,80 \cdot 10^{-5}$
15	<i>D-S-C7-1-M1</i> $7,30 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C7-1-M2</i> $3,20 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C7-1-M3</i> ---	<i>D-S-C7-1-M4</i> $3,30 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C7-1-M5</i> ---	<i>D-S-C7-1-M6</i> $1,13 \cdot 10^{-8}$
16	<i>D-S-C7-2-M1</i> $7,00 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C7-2-M2</i> $3,90 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C7-2-M3</i> ---	<i>D-S-C7-2-M4</i> $8,50 \cdot 10^{-9}$	<i>D-S-C7-2-M5</i> $2,70 \cdot 10^{-10}$	<i>D-S-C7-2-M6</i> ---
17	<i>D-S-C8-1-M1</i> ---	<i>D-S-C8-1-M2</i> $1,40 \cdot 10^{-7}$	<i>D-S-C8-1-M3</i> ---	<i>D-S-C8-1-M4</i> $5,20 \cdot 10^{-8}$	<i>D-S-C8-1-M5</i> $1,20 \cdot 10^{-7}$	<i>D-S-C8-1-M6</i> ---
18	<i>D-S-C8-2-M1</i> $9,70 \cdot 10^{-8}$	<i>D-S-C8-2-M2</i> $9,60 \cdot 10^{-8}$	<i>D-S-C8-2-M3</i> ---	<i>D-S-C8-2-M4</i> $1,00 \cdot 10^{-7}$	<i>D-S-C8-2-M5</i> $7,30 \cdot 10^{-8}$	<i>D-S-C8-2-M6</i> ---
19	<i>D-S-C9-1-M1</i> $4,80 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-C9-3-M1</i> $7,90 \cdot 10^{-6}$	<i>D-S-C9-1-M3</i> ---	<i>D-S-C9-3-M4</i> $3,40 \cdot 10^{-4}$	<i>D-S-C9-1-M5</i> $8,20 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-C9-1-M6</i> ---
20	<i>D-S-C9-2-M1</i> $1,20 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-C9-2-M2</i> ---	<i>D-S-C9-2-M3</i> ---	<i>D-S-C9-2-M4</i> $1,40 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-C9-3-M5</i> $1,00 \cdot 10^{-5}$	<i>D-S-C9-2-M6</i> ---

Die oben beschriebenen Diskontinuitäten deuten darauf hin, dass es in den Kontaktflächen Verunreinigungen oder tiefe Beschädigungen gibt, die der Ring nicht abdichten kann.

An den Messergebnissen in Tabelle 5.1 lässt sich deutlich erkennen, dass es Dichtringeigenschaftenkombinationen gibt, die eher zu einem solchen Verhalten tendieren als andere. Es gibt sogar Ringe, beispielsweise die Ringgruppe C4, C6 und C9, die bei jedem Versuch ein solches Verhalten aufzeigen und vor diesem Hintergrund für den Einsatz im VIGS nicht geeignet sind.

Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse zur Leckagerate in den Kontaktflächen „Stahl – Dichtring – Stahl“ in der folgenden Tabelle hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit für einen direkten Anstieg der Leckagerate, minimale Leckagerate, maximale Leckagerate und mittlere Leckagerate für die einzelnen Dichtringeigenschaftenkombinationen zusammengefasst dargestellt.

Die für weitere Untersuchungen qualifizierten Dichtringe mit Leckwahrscheinlichkeiten von 0% und Leckageraten unterhalb des Grenzwertes werden dabei visuell hervorgehoben. Die Dichtringe werden hier als qualifiziert betrachtet, wenn alle vier Kriterien pro Dichtringeigenschaftenkombination den Anforderungen entsprechen (hervorgehoben werden).

Tabelle 5.2: Zusammenfassung der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen „Stahl-Dichtring-Stahl“

Zeile	Dichtring-eigenschaft	Leckwahr-scheinlichkeit [%]	Minimale Leckagerate [mbar · dm ³ /s]	Maximale Leckagerate [mbar · dm ³ /s]	Mittlere Leckagerate [mbar · dm ³ /s]
1	D-S-A1	100%	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$5,90 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$
2	D-S-C1	50%	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	$4,00 \cdot 10^{-8}$	$1,23 \cdot 10^{-8}$
3	D-S-C2	0%	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$	$4,10 \cdot 10^{-10}$
4	D-S-C3	42%	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	$7,20 \cdot 10^{-8}$	$1,91 \cdot 10^{-8}$
5	D-S-C4	100%	$6,60 \cdot 10^{-7}$	$9,10 \cdot 10^{-4}$	$3,55 \cdot 10^{-4}$
6	D-S-C5	0%	$1,30 \cdot 10^{-10}$	$7,40 \cdot 10^{-9}$	$3,43 \cdot 10^{-9}$
7	D-S-C6	100%	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$	$8,12 \cdot 10^{-6}$
8	D-S-C7	0%	$2,70 \cdot 10^{-10}$	$1,13 \cdot 10^{-8}$	$3,63 \cdot 10^{-9}$
9	D-S-C8	86%	$5,20 \cdot 10^{-8}$	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$9,69 \cdot 10^{-8}$
10	D-S-C9	100%	$7,90 \cdot 10^{-6}$	$3,40 \cdot 10^{-4}$	$7,34 \cdot 10^{-5}$

Die Messergebnisse zeigen, dass mit den Viton®-Ringen der Dicke 4 mm und Härte Shore75 (C2), der Dicke 6 mm und Härte Shore75 (C5) und der Dicke 6 mm und Härte Shore80 (C7) die besten Messergebnisse erreicht wurden. Bei allen drei

Dichtringeigenschaftenkombinationen liegt die Leckagewahrscheinlichkeit bei 0% und die Leckageraten liegen über dem erforderlichen Grenzwert.

Die anderen Dichtringeigenschaftenkombinationen heben sich von diesen Ergebnissen teilweise deutlich. Vor diesem Hintergrund werden sie im Folgenden bei der Untersuchung der Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Glas zu Dichtring“ und auch bei der Untersuchung der Permeation nicht weiter betrachtet.

In der folgenden Tabelle 5.3 werden die Ergebnisse zur Untersuchung der Kontaktflächen „Stahl – Dichtring – Glas“ dargestellt:

Tabelle 5.3: Leckageraten infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen „Glas-Dichtring-Stahl“

Zeile	Leckagerate [mbar · dm ³ /s]			
1	<i>D-KG-C2-1-M1</i> 2,70 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-KG-C2-1-M2</i> 1,67 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-KG-C2-2-M1</i> 9,18 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-KG-C2-2-M2</i> 2,30 · 10 ⁻⁵
2	<i>D-KG-C5-1-M1</i> 1,00 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-KG-C5-1-M2</i> < 1,00 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-KG-C5-2-M1</i> 2,31 · 10 ⁻⁹	<i>D-KG-C5-2-M2</i> 3,90 · 10 ⁻⁶
3	<i>D-KG-C7-1-M1</i> 2,30 · 10 ⁻⁵	<i>D-KG-C7-1-M2</i> 2,80 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-KG-C7-2-M1</i> 1,30 · 10 ⁻⁸	<i>D-KG-C7-2-M2</i> < 1,00 · 10 ⁻¹⁰
4	<i>D-SG-C2-1-M1</i> 1,40 · 10 ⁻⁷	<i>D-SG-C2-1-M2</i> 6,40 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-SG-C2-2-M1</i> 2,00 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-SG-C2-2-M2</i> < 1,00 · 10 ⁻¹⁰
5	<i>D-SG-C5-1-M1</i> 5,00 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-SG-C5-1-M2</i> 5,80 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-SG-C5-2-M1</i> 2,40 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-SG-C5-2-M2</i> 1,75 · 10 ⁻¹⁰
6	<i>D-SG-C7-1-M1</i> 3,90 · 10 ⁻⁶	<i>D-SG-C7-1-M2</i> 1,30 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-SG-C7-2-M1</i> 4,00 · 10 ⁻⁸	<i>D-SG-C7-2-M2</i> 1,80 · 10 ⁻⁵
7	<i>D-EG-C2-1-M1</i> 3,00 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-EG-C2-1-M2</i> 9,80 · 10 ⁻⁷	<i>D-EG-C2-2-M1</i> 3,20 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-EG-C2-2-M2</i> 8,20 · 10 ⁻⁹
8	<i>D-EG-C5-1-M1</i> 1,52 · 10 ⁻⁹	<i>D-EG-C5-1-M2</i> 1,22 · 10 ⁻⁹	<i>D-EG-C5-2-M1</i> 7,60 · 10 ⁻⁹	<i>D-EG-C5-2-M2</i> 3,30 · 10 ⁻⁶
9	<i>D-EG-C7-1-M1</i> 1,00 · 10 ⁻¹⁰	<i>D-EG-C7-1-M2</i> 1,30 · 10 ⁻⁵	<i>D-EG-C7-2-M1</i> 8,50 · 10 ⁻⁹	<i>D-EG-C7-2-M2</i> 3,30 · 10 ⁻⁵

Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse zur Leckagerate in den Kontaktflächen „Stahl – Dichtring – Stahl“ in der folgenden Tabelle hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit für ein tatsächliches Leck, minimale Leckagerate, maximale Leckagerate und mittlere Leckagerate für die einzelnen Dichtringeigenschaftenkombinationen zusammengefasst dargestellt.

Die für weitere Untersuchungen qualifizierten Dichtringe mit Leckwahrscheinlichkeiten von 0% und Leckageraten unterhalb des Grenzwertes werden visuell hervorgehoben. Die Dichtringe werden hier als qualifiziert betrachtet, wenn alle vier Kriterien pro Dichtringeigenschaftenkombination den Anforderungen entsprechen (hervorgehoben werden).

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen Glas-Dichtring-Stahl

Zeile	Dichtring-eigenschaft	Leckwahrscheinlichkeit [%]	Minimale Leckagerate [mbar · dm ³ /s]	Maximale Leckagerate [mbar · dm ³ /s]	Mittlere Leckagerate [mbar · dm ³ /s]
1	D-KG-C2	25%	$1,67 \cdot 10^{-10}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$	$5,75 \cdot 10^{-6}$
2	D-KG-C5	0%	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	$3,90 \cdot 10^{-6}$	$9,76 \cdot 10^{-7}$
3	D-KG-C7	50%	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$	$5,75 \cdot 10^{-6}$
4	D-SG-C2	25%	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$3,52 \cdot 10^{-8}$
5	D-SG-C5	0%	$1,75 \cdot 10^{-10}$	$5,80 \cdot 10^{-10}$	$3,74 \cdot 10^{-10}$
6	D-SG-C7	75%	$1,30 \cdot 10^{-10}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$	$5,49 \cdot 10^{-6}$
7	D-EG-C2	50%	$3,00 \cdot 10^{-10}$	$9,80 \cdot 10^{-7}$	$2,47 \cdot 10^{-7}$
8	D-EG-C5	50%	$1,22 \cdot 10^{-9}$	$3,30 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-7}$
9	D-EG-C7	75%	$1,00 \cdot 10^{-10}$	$3,30 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$

Die Kombinationen aus Klarglas und dem 6 mm dicken Viton[®]-Ring der Härte Shore75 sowie die Kombination aus siebbedrucktem Glas und dem 6 mm dicke Viton[®]-Ring der Härte Shore75 heben sich insbesondere aufgrund der Leckwahrscheinlichkeit von 0% wesentlich von den anderen Glas- und Dichtringeigenschaftskombinationen ab. Die die mit diesen beiden Kombinationen zusammenhängende maximale Leckagerate von $3,49 \cdot 10^{-08}$ mbar · dm³/s liegt unter den Anforderungen zur Dauerhaftigkeit – bezogen auf das in Kapitel 3.7 aufgeführte kleinformatige VIGS als Bezugselement wäre bei dieser Leckagerate eine Dauerhaftigkeit von mehr als 200 Jahren zu erwarten (ohne Berücksichtigung der Permeation).

5.1.2 Bewertung der Einflussgrößen

Im Folgenden wird der Einfluss der variierenden Parameter näher betrachtet. In allen Diagrammen ist die erforderliche Leckagerate für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit des Elementes über eine rote Gerade berücksichtigt. Bei Unterschreitung dieser Geraden halten die Leckageraten des VIGS die Bedingungen für die 25-jährige Dauerhaftigkeit eines Dämmstoffes ein. Ergänzt werden die Diagramme durch eine tabellarische Aufstellung der Messergebnisse.

Vergleich zum Dichtringmaterial

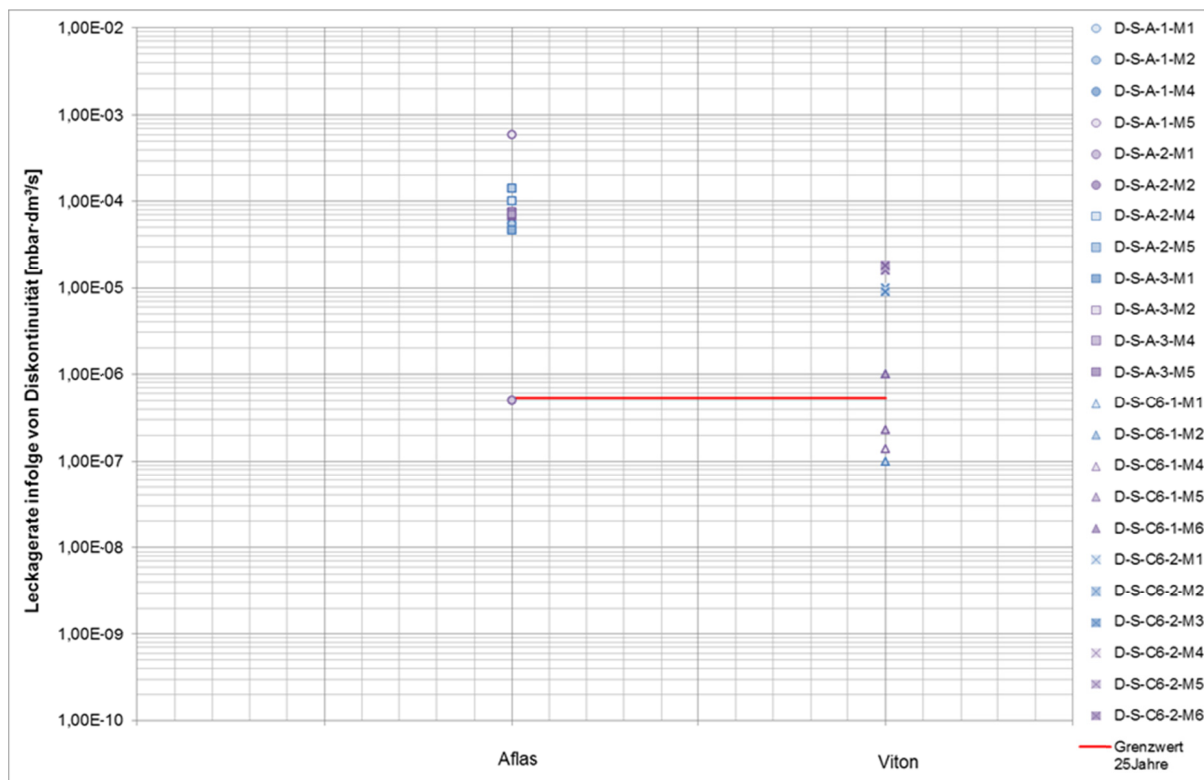


Abbildung 5.1: Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton® (C6) und Aflas® (A1) (Ringdicke 6 mm, Shore90)

Der Vergleich der Leckagerate zwischen den Dichtringmaterialien Aflas® und Viton® bei gleicher Dicke und gleicher Härte zeigt, dass die Leckageraten in Verbindung mit Viton® geringer sind.

Tabelle 5.5: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton® (C6) und Aflas® (A1) (Ringdicke 6 mm, Shore90)

Zeile	Aflas®			Viton®		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten
1	D-S-A1-1-M1	$5,60 \cdot 10^{-5}$	---	D-S-C6-1-M1	$1,00 \cdot 10^{-6}$	---
2	D-S-A1-1-M2	$5,40 \cdot 10^{-5}$	---	D-S-C6-1-M2	$1,00 \cdot 10^{-7}$	✓
3	D-S-A1-3-M1	$4,60 \cdot 10^{-5}$	---	D-S-C6-1-M4	$1,40 \cdot 10^{-7}$	✓
4	D-S-A1-1-M4	$1,40 \cdot 10^{-4}$	---	D-S-C6-1-M5	$2,30 \cdot 10^{-7}$	✓
5	D-S-A1-1-M5	$5,90 \cdot 10^{-4}$	---	D-S-C6-1-M6	$1,00 \cdot 10^{-6}$	---
6	D-S-A1-3-M4	$7,40 \cdot 10^{-5}$	---	D-S-C6-2-M1	$9,90 \cdot 10^{-6}$	---
7	D-S-A1-2-M1	$5,00 \cdot 10^{-7}$	✓	D-S-C6-2-M2	$9,00 \cdot 10^{-6}$	---
8	D-S-A1-2-M2	$1,00 \cdot 10^{-4}$	---	D-S-C6-2-M3	$1,60 \cdot 10^{-5}$	---
9	D-S-A1-3-M2	$6,70 \cdot 10^{-5}$	---	D-S-C6-2-M4	$1,80 \cdot 10^{-5}$	---
10	D-S-A1-2-M4	$1,00 \cdot 10^{-4}$	---	D-S-C6-2-M5	$1,60 \cdot 10^{-5}$	---
11	D-S-A1-2-M5	$1,40 \cdot 10^{-4}$	---	D-S-C6-2-M6	$1,80 \cdot 10^{-5}$	---
12	D-S-A1-3-M5	$7,00 \cdot 10^{-5}$	---	---	---	---
13	Mittelwert	$1,20 \cdot 10^{-4}$	---	Mittelwert	$8,12 \cdot 10^{-6}$	---

Die weiteren Untersuchungen beziehen sich aufgrund der großen Differenz der Leckagerate der beiden Dichtringmaterialien nur noch auf Viton®. Bei diesen weiteren Untersuchungen wird auch Bezug genommen auf die schlechte Leckagerate für den 6 mm dicken Viton®-Ring der Härte Shore90.

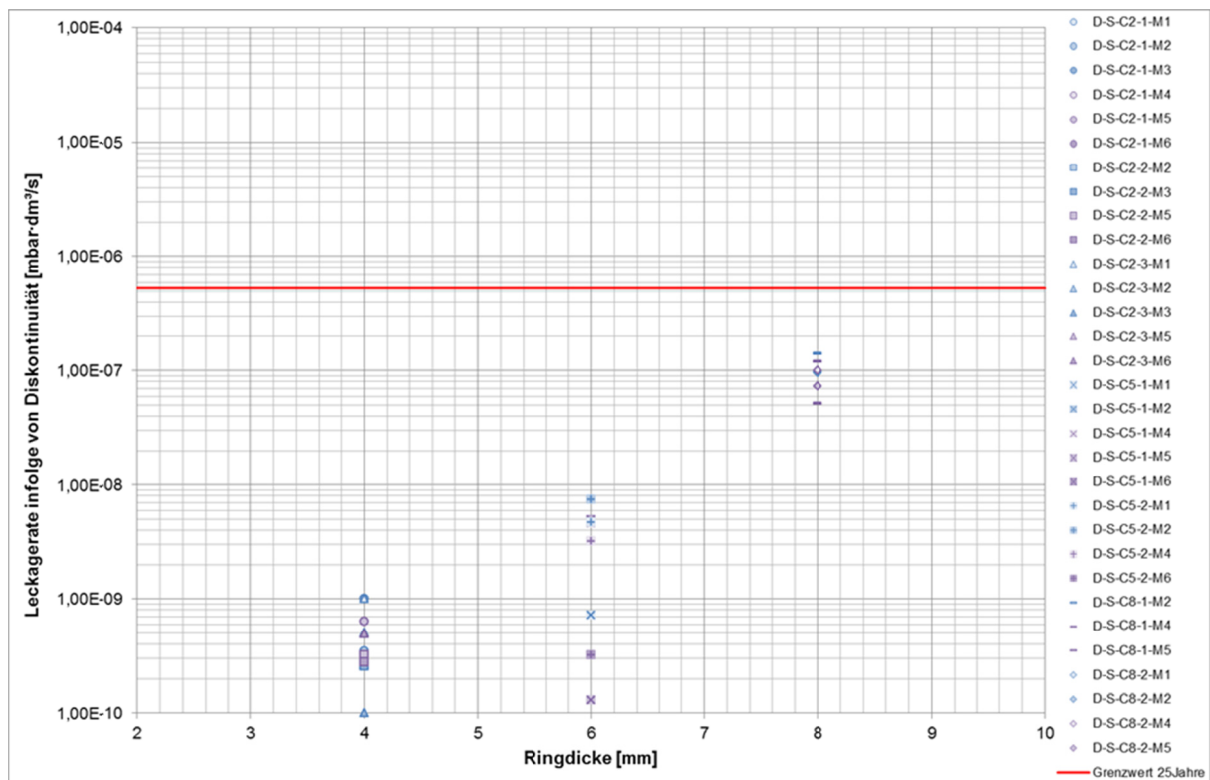
Vergleich der Dicke der Dichtringe

Abbildung 5.2: Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore75 bei variierender Dicke

Abbildung 5.2 und Tabelle 5.6 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate für einen Viton®-Ring der Härte Shore75 bei variierendem Ringdurchmesser.

Es wird deutlich, dass bei Shore75 mit allen drei untersuchten Ringquerschnitten niedrige Leckageraten unterhalb des Grenzwertes möglich sind. Dabei ist festzustellen: Mit zunehmenden Ringdurchmesser wird auch die mittlere Leckagerate für die jeweilige Ringdicke größer.

Tabelle 5.6: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore75 bei variierender Dicke

Zeile	Viton®, 4 mm			Viton®, 6 mm			Viton®, 8 mm		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	G W	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	G W	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	G W
1	D-S-C2-1-M1	$2,75 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C5-1-M1	$7,20 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C8-1-M2	$1,40 \cdot 10^{-7}$	✓
2	D-S-C2-1-M2	$3,49 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C5-1-M2	$4,90 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C8-1-M4	$5,20 \cdot 10^{-8}$	✓
3	D-S-C2-1-M3	$1,00 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C5-1-M4	$4,63 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C8-1-M5	$1,20 \cdot 10^{-7}$	✓
4	D-S-C2-1-M4	$2,79 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C5-1-M5	$1,30 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C8-2-M1	$9,70 \cdot 10^{-8}$	✓
5	D-S-C2-1-M5	$6,30 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C5-1-M6	$4,90 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C8-2-M2	$9,60 \cdot 10^{-8}$	✓
6	D-S-C2-1-M6	$2,69 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C5-2-M1	$4,67 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C8-2-M4	$1,00 \cdot 10^{-7}$	✓
7	D-S-C2-2-M2	$3,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C5-2-M2	$7,40 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C8-2-M5	$7,30 \cdot 10^{-8}$	✓
8	D-S-C2-2-M3	$2,55 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C5-2-M4	$3,20 \cdot 10^{-9}$	✓	---	---	-
9	D-S-C2-2-M5	$3,20 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C5-2-M6	$3,20 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-
10	D-S-C2-2-M6	$2,80 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-	---	---	-
11	D-S-C2-3-M1	$1,00 \cdot 10^{-9}$	✓	---	---	-	---	---	-
12	D-S-C2-3-M2	$5,09 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-	---	---	-
13	D-S-C2-3-M3	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-	---	---	-
14	D-S-C2-3-M5	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-	---	---	-
15	D-S-C2-3-M6	$4,90 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-	---	---	-
16	Mittelwert	$4,10 \cdot 10^{-10}$	✓	Mittelwert	$3,43 \cdot 10^{-9}$	✓	Mittelwert	$9,69 \cdot 10^{-8}$	✓

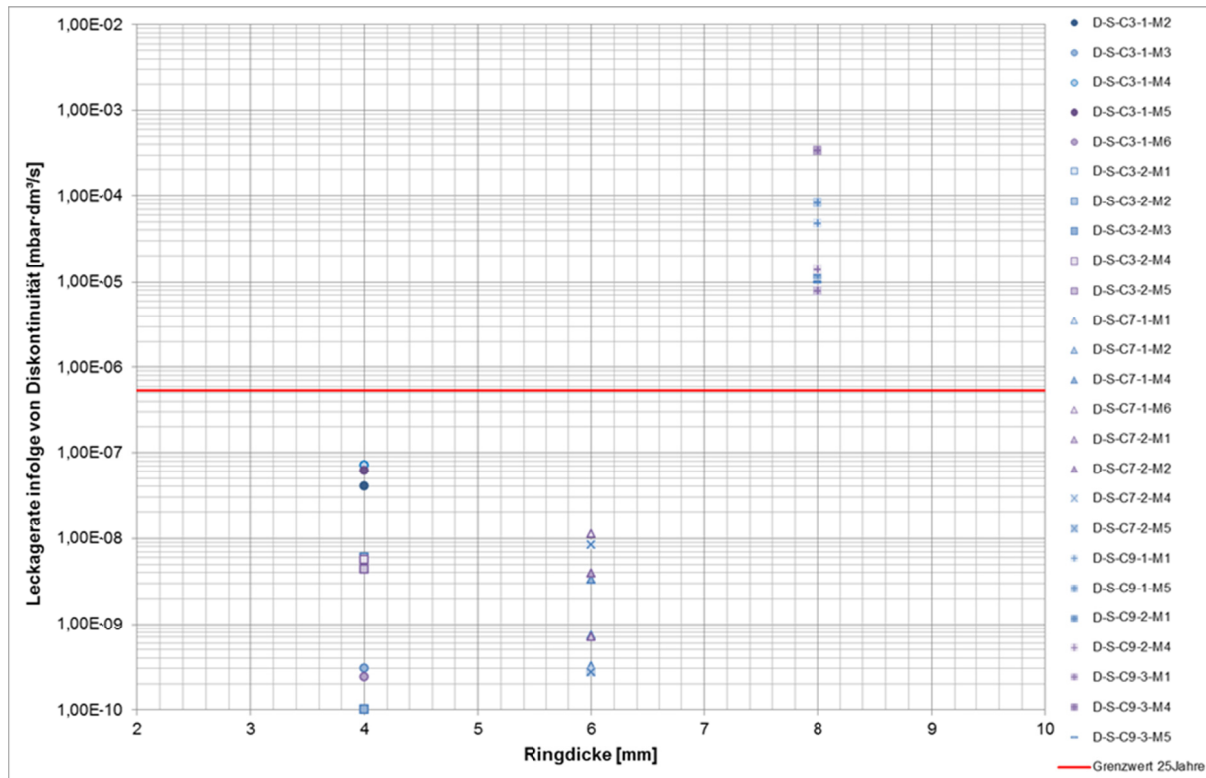


Abbildung 5.3: Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore80 bei variierender Dicke

Abbildung 5.3 und Tabelle 5.7 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate für einen Viton®-Ring der Härte Shore80 bei variierendem Ringdurchmesser. Es wird deutlich, dass bei einer Härte Shore80 mit den beiden Ringquerschnitten 4 mm und 6 mm niedrige Leckageraten unterhalb des Grenzwertes für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit möglich sind.

Die Messergebnisse für den 8 mm dicken Ring liegen dagegen deutlich über dem Grenzwert. Von dem Einsatz dieser Dichtringeigenschaftenkombination ist somit abzusehen.

Die Feststellung der vorherigen Auswertung kann für den Vergleich dieser Messergebnisse nur fortgeführt werden, sofern die Messungen D-S-C3-2-M1, D-S-C3-1-M4 und D-S-C3-M5 nicht mit betrachtet werden. Unter dieser Annahme wäre für diesen Vergleich ebenfalls die Feststellung möglich: Mit zunehmenden Ringdurchmesser wird auch die mittlere Leckagerate für die jeweilige Ringdicke größer.

Tabelle 5.7: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore80 bei variierender Dicke

Zeile	Viton®, 4 mm			Viton®, 6 mm			Viton®, 8 mm		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	G W	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	G W	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	G W
1	D-S-C3-1-M2	$4,00 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C7-1-M1	$7,30 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C9-1-M1	$4,80 \cdot 10^{-5}$	-
2	D-S-C3-1-M3	$3,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C7-1-M2	$3,20 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C9-3-M1	$7,90 \cdot 10^{-6}$	-
3	D-S-C3-1-M4	$7,20 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C7-1-M4	$3,30 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C9-3-M4	$3,40 \cdot 10^{-4}$	-
4	D-S-C3-1-M5	$6,20 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C7-1-M6	$1,13 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C9-1-M5	$8,20 \cdot 10^{-5}$	-
5	D-S-C3-1-M6	$2,40 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C7-2-M1	$7,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C9-2-M1	$1,20 \cdot 10^{-5}$	-
6	D-S-C3-2-M1	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C7-2-M2	$3,90 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C9-2-M4	$1,40 \cdot 10^{-5}$	-
7	D-S-C3-2-M2	$6,00 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C7-2-M4	$8,50 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C9-3-M5	$1,00 \cdot 10^{-5}$	-
8	D-S-C3-2-M3	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C7-2-M5	$2,70 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-
9	D-S-C3-2-M4	$5,60 \cdot 10^{-9}$	✓	---	---	-	---	---	-
10	D-S-C3-2-M5	$4,40 \cdot 10^{-9}$	✓	---	---	-	---	---	-
11	D-S-C3-2-M5	$4,40 \cdot 10^{-9}$	✓	---	---	-	---	---	-
12	Mittelwert	$1,91 \cdot 10^{-8}$	✓	Mittelwert	$3,63 \cdot 10^{-9}$	✓	Mittelwert	$7,34 \cdot 10^{-5}$	-

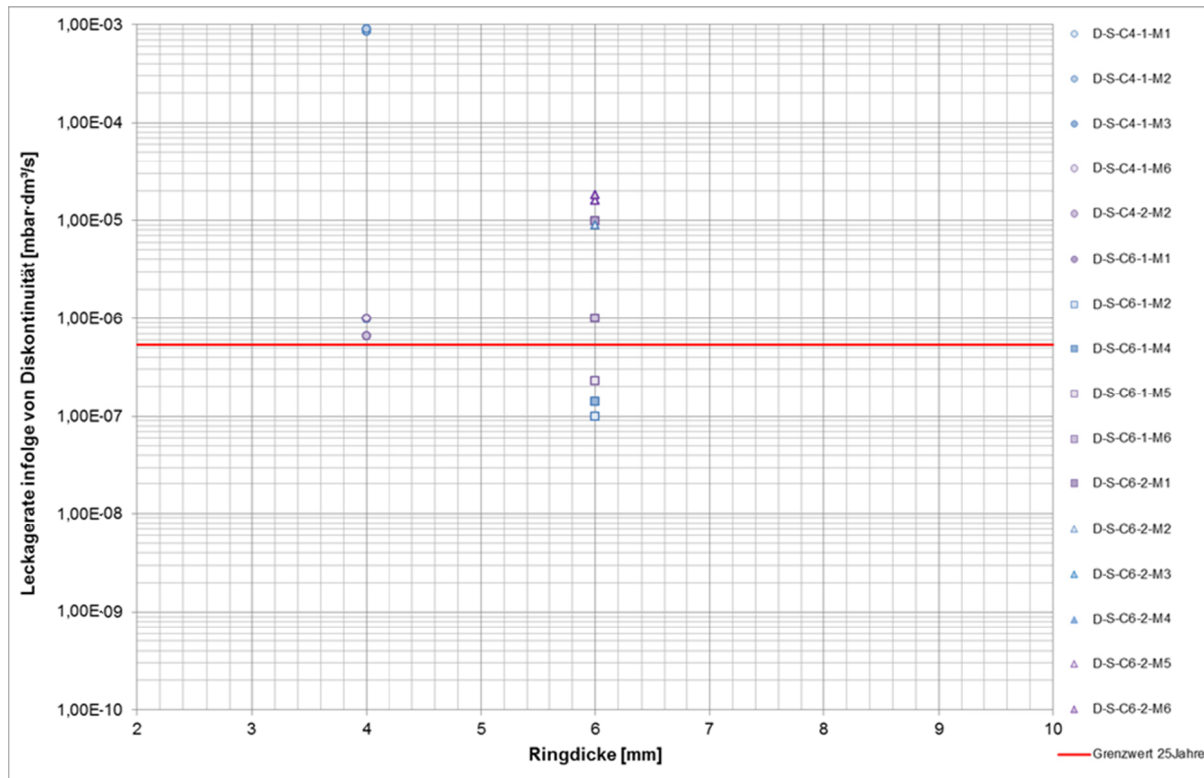


Abbildung 5.4: Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore90 bei variierender Dicke

Abbildung 5.4 und Tabelle 5.8 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate für einen Viton®-Ring der Härte Shore90 bei variierendem Ringdurchmesser.

Die Messergebnisse sind grundsätzlich schlechter verglichen mit den Ringdicken geringerer Härte. Annähernd alle Messergebnisse liegen über dem Grenzwert für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit.

Beide Dichtringeigenschaften sind für den Einsatz im VIGS somit nicht geeignet.

Tabelle 5.8: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore90 bei variierender Dicke

Zeile	Viton®, 4 mm			Viton®, 6 mm		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten
1	D-S-C4-1-M1	$8,60 \cdot 10^{-4}$	---	D-S-C6-1-M1	$1,00 \cdot 10^{-6}$	---
2	D-S-C4-1-M2	$9,10 \cdot 10^{-4}$	---	D-S-C6-1-M2	$1,00 \cdot 10^{-7}$	✓
3	D-S-C4-1-M3	$9,80 \cdot 10^{-7}$	---	D-S-C6-1-M4	$1,40 \cdot 10^{-7}$	✓
4	D-S-C4-1-M6	$1,00 \cdot 10^{-6}$	---	D-S-C6-1-M5	$2,30 \cdot 10^{-7}$	✓
5	D-S-C4-2-M2	$6,60 \cdot 10^{-7}$	---	D-S-C6-1-M6	$1,00 \cdot 10^{-6}$	---
6	---	---	---	D-S-C6-2-M1	$9,90 \cdot 10^{-6}$	---
7	---	---	---	D-S-C6-2-M2	$9,00 \cdot 10^{-6}$	---
8	---	---	---	D-S-C6-2-M3	$1,60 \cdot 10^{-5}$	---
9	---	---	---	D-S-C6-2-M4	$1,80 \cdot 10^{-5}$	---
10	---	---	---	D-S-C6-2-M5	$1,60 \cdot 10^{-5}$	---
11	---	---	---	D-S-C6-2-M6	$1,80 \cdot 10^{-5}$	---
12	Mittelwert	$3,55 \cdot 10^{-4}$	---	Mittelwert	$8,12 \cdot 10^{-6}$	---

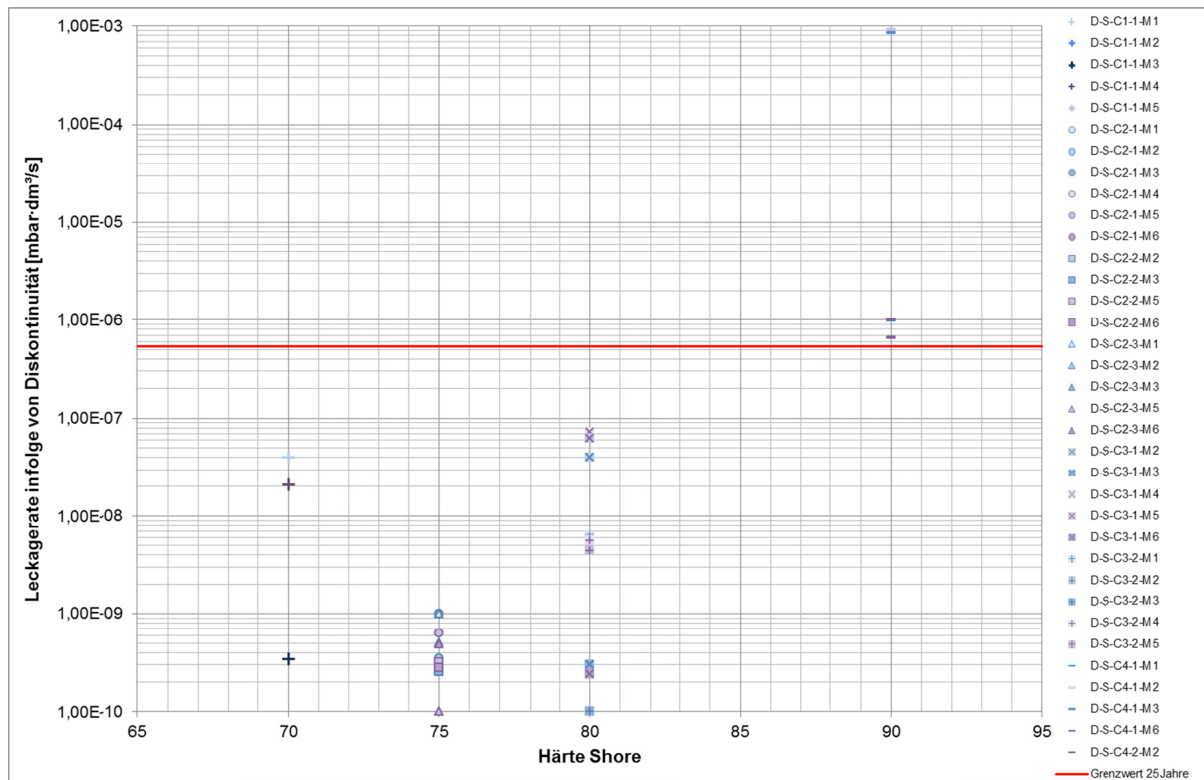
Vergleich Härte des Dichtrings

Abbildung 5.5: Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 4 mm und variierender Härte

Abbildung 5.5 und die Tabellen 5.9 und 5.10 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate für einen Viton®-Ring der Dicke 4 mm bei variierender Härte.

Die gemessenen Leckageraten für die Härten Shore70, Shore75 und Shore80 liegen unter dem Grenzwert zur Einhaltung der erforderlichen Dauerhaftigkeit, die Messergebnisse bei den Ringen der Härte Shore90 liegen deutlich über dem Grenzwert.

Dichtringe mit einer Dicke von 4 mm und einer Härte von Shore90 sind somit für den Einsatz in einem VIGS nicht geeignet.

Abgesehen von den Messwerten D-S-C1-1-M1 und D-S-C1-1-M4 ist hier ein ähnliches Verhalten festzustellen, wie bei dem Vergleich der Dichtringdicken: Mit zunehmender Ringhärte wird auch die mittlere Leckagerate für die jeweilige Ringhärte größer.

Tabelle 5.9: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 4 mm und einer Härte von Shore70 bzw. Shore75

Zeile	Viton®, Shore70			Viton®, Shore75		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten
1	D-S-C1-1-M1	$4,00 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C2-1-M1	$2,75 \cdot 10^{-10}$	✓
2	D-S-C1-1-M2	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C2-1-M2	$3,49 \cdot 10^{-10}$	✓
3	D-S-C1-1-M3	$3,43 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C2-1-M3	$1,00 \cdot 10^{-9}$	✓
4	D-S-C1-1-M4	$2,10 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C2-1-M4	$2,79 \cdot 10^{-10}$	✓
5	D-S-C1-1-M5	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C2-1-M5	$6,30 \cdot 10^{-10}$	✓
6	D-S-C1-1-M6	---	---	D-S-C2-1-M6	$2,69 \cdot 10^{-10}$	✓
7	D-S-C1-2-M1	---	---	D-S-C2-2-M2	$3,00 \cdot 10^{-10}$	✓
8	D-S-C1-2-M2	---	---	D-S-C2-2-M3	$2,55 \cdot 10^{-10}$	✓
9	D-S-C1-2-M3	---	---	D-S-C2-2-M5	$3,20 \cdot 10^{-10}$	✓
10	D-S-C1-2-M4	---	---	D-S-C2-2-M6	$2,80 \cdot 10^{-10}$	✓
11	D-S-C1-2-M5	---	---	D-S-C2-3-M1	$1,00 \cdot 10^{-9}$	✓
12	D-S-C1-2-M6	---	---	D-S-C2-3-M2	$5,09 \cdot 10^{-10}$	✓
13	---	---	---	D-S-C2-3-M3	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓
14	---	---	---	D-S-C2-3-M5	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓
15	---	---	---	D-S-C2-3-M6	$4,90 \cdot 10^{-10}$	✓
16	Mittelwert	$1,23 \cdot 10^{-8}$	---	Mittelwert	$4,10 \cdot 10^{-10}$	✓

Tabelle 5.10: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 4 mm und einer Härte von Shore80 bzw. Shore90

Zeile	Viton®, Shore80			Viton®, Shore90		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten
1	D-S-C3-1-M2	$4,00 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C4-1-M1	$8,60 \cdot 10^{-4}$	---
2	D-S-C3-1-M3	$3,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C4-1-M2	$9,10 \cdot 10^{-4}$	---
3	D-S-C3-1-M4	$7,20 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C4-1-M3	$9,80 \cdot 10^{-7}$	---
4	D-S-C3-1-M5	$6,20 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C4-1-M4	---	---
5	D-S-C3-1-M6	$2,40 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C4-1-M5	---	---
6	D-S-C3-2-M1	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C4-1-M6	$1,00 \cdot 10^{-6}$	---
7	D-S-C3-2-M2	$6,00 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C4-2-M1	---	---
8	D-S-C3-2-M3	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C4-2-M2	$6,60 \cdot 10^{-7}$	---
9	D-S-C3-2-M4	$5,60 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C4-2-M3	---	---
10	D-S-C3-2-M5	$4,40 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C4-2-M4	---	---
11	Mittelwert	$1,91 \cdot 10^{-8}$	✓	Mittelwert	$3,55 \cdot 10^{-4}$	---

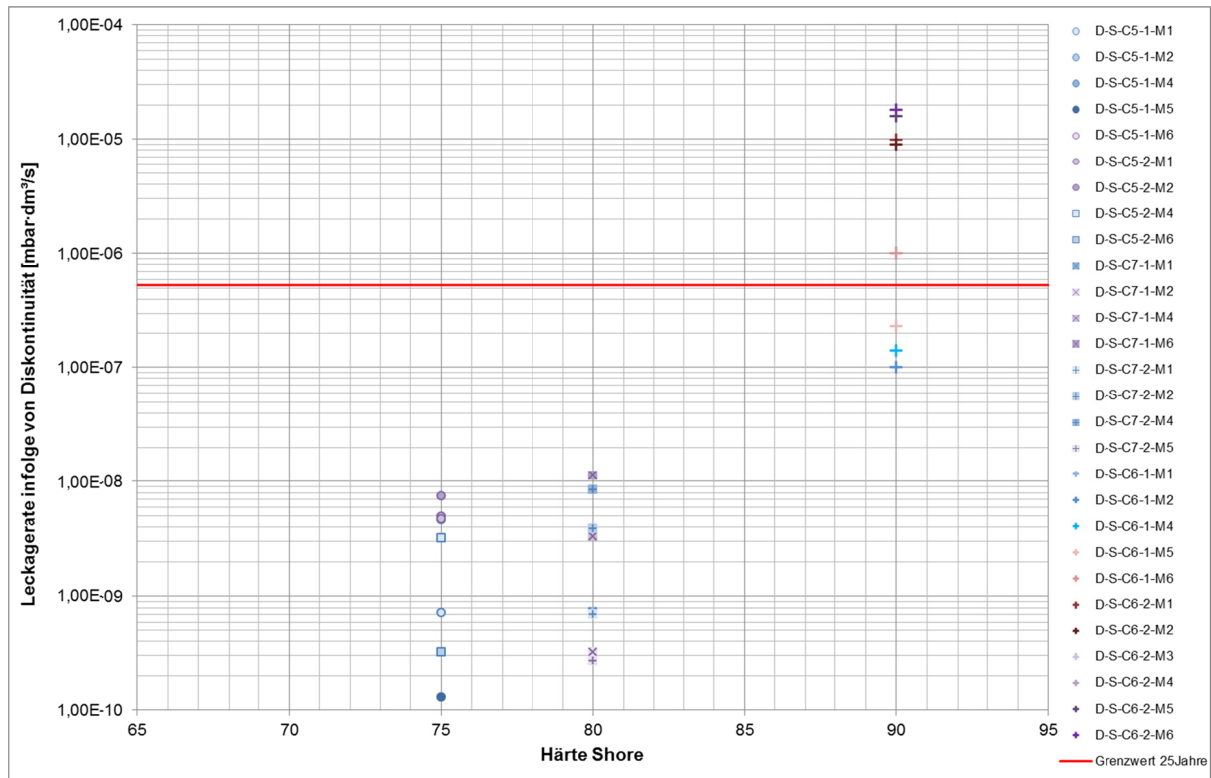


Abbildung 5.6: Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 6 mm und variierender Härte

Abbildung 5.6 und Tabelle 5.11 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate für einen Viton®-Ring der Dicke 6 mm bei variierender Ringhärte. Es wird deutlich, dass bei einer Dicke von 6 mm mit den beiden Härten Shore75 und Shore80 niedrige Leckageraten unterhalb des Grenzwertes möglich sind.

Die Messergebnisse für den 8 mm dicken Ring liegen dagegen deutlich über dem Grenzwert. Von dem Einsatz dieser Dichtringeigenschaftenkombination ist somit abzusehen.

Bei den hier aufgezeigten Messwerten ist festzustellen: Mit zunehmender Härte wird auch die mittlere Leckagerate für die jeweilige Härte größer.

Tabelle 5.11: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 6 mm und variierender Härte

Zeile	Viton®, Shore75			Viton®, Shore80			Viton®, Shore90		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	G W	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	G W	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	G W
1	D-S-C5-1-M1	$7,20 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C7-1-M1	$7,30 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C6-1-M1	$1,00 \cdot 10^{-6}$	-
2	D-S-C5-1-M2	$4,90 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C7-1-M2	$3,20 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C6-1-M2	$1,00 \cdot 10^{-7}$	✓
3	D-S-C5-1-M4	$4,63 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C7-1-M4	$3,30 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C6-1-M4	$1,40 \cdot 10^{-7}$	✓
4	D-S-C5-1-M5	$1,30 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C7-1-M6	$1,13 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C6-1-M5	$2,30 \cdot 10^{-7}$	✓
5	D-S-C5-1-M6	$4,90 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C7-2-M1	$7,00 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C6-1-M6	$1,00 \cdot 10^{-6}$	-
6	D-S-C5-2-M1	$4,67 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C7-2-M2	$3,90 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C6-2-M1	$9,90 \cdot 10^{-6}$	-
7	D-S-C5-2-M2	$7,40 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C7-2-M4	$8,50 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C6-2-M2	$9,00 \cdot 10^{-6}$	-
8	D-S-C5-2-M4	$3,20 \cdot 10^{-9}$	✓	D-S-C7-2-M5	$2,70 \cdot 10^{-10}$	✓	D-S-C6-2-M3	$1,60 \cdot 10^{-5}$	-
9	D-S-C5-2-M6	$3,20 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-	D-S-C6-2-M4	$1,80 \cdot 10^{-5}$	-
10	---	---	-				D-S-C6-2-M5	$1,60 \cdot 10^{-5}$	-
11	---	---	-				D-S-C6-2-M6	$1,80 \cdot 10^{-5}$	-
12	Mittelwert	$3,43 \cdot 10^{-9}$	✓	Mittelwert	$3,63 \cdot 10^{-9}$	✓	Mittelwert	$8,12 \cdot 10^{-6}$	-

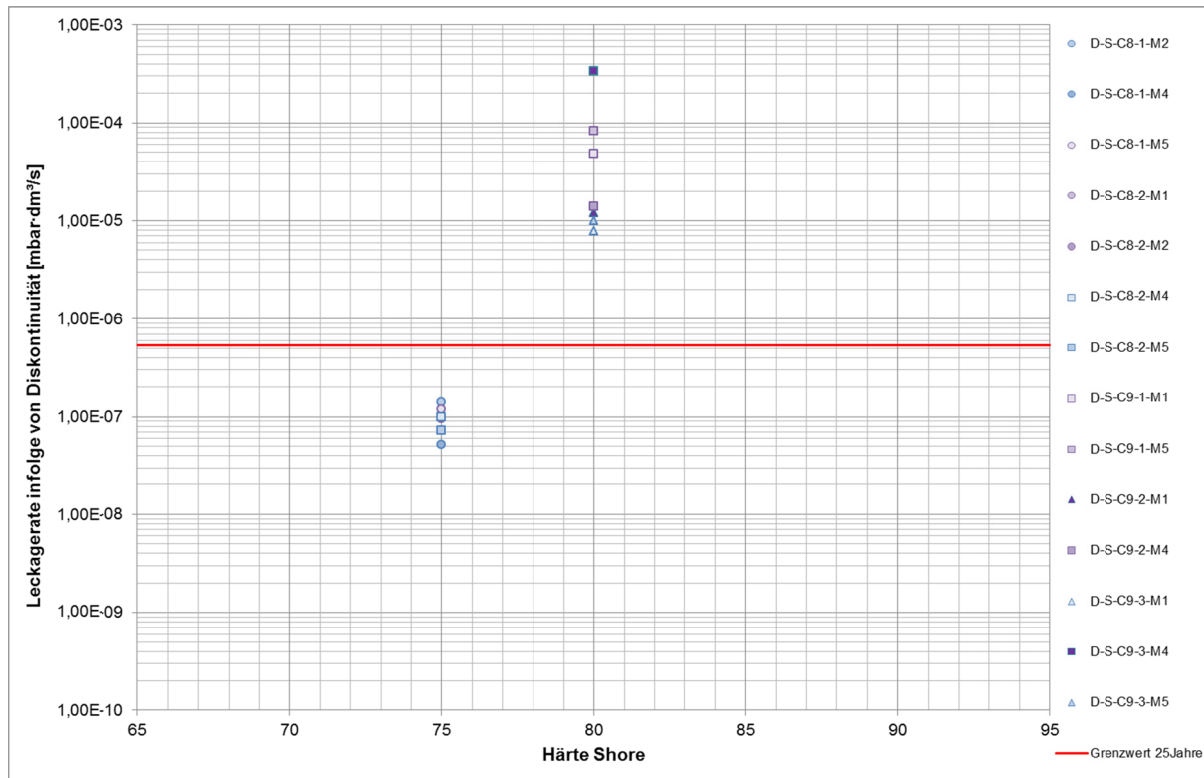


Abbildung 5.7: Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 8 mm und variierender Härte (Shore75 und Shore80)

Abbildung 5.7 und Tabelle 5.12 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate für einen Viton®-Ring der Dicke 8 mm und variierender Ringhärte.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Dicke von 8 mm und einer Härte von Shore75 niedrige Leckageraten möglich sind, mit einer Härte von Shore80 der Anforderungen an eine 25-jährige Dauerhaftigkeit aber nicht mehr eingehalten ist. Von dem Einsatz dieser Dichtringeigenschaftenkombination ist somit abzusehen.

Festzustellen ist auch bei diesen Messungen: Mit zunehmender Ringhärte wird auch die mittlere Leckagerate für die jeweilige Ringdicke größer.

Tabelle 5.12: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für Viton®-Ringe mit einer Dicke von 8 mm und variierender Härte

Zeile	Viton®, Shore75			Viton®, Shore80		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten
1	D-S-C8-1-M2	$1,40 \cdot 10^{-7}$	✓	D-S-C9-1-M1	$4,80 \cdot 10^{-5}$	---
2	D-S-C8-1-M4	$5,20 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C9-3-M1	$7,90 \cdot 10^{-6}$	---
3	D-S-C8-1-M5	$1,20 \cdot 10^{-7}$	✓	D-S-C9-3-M4	$3,40 \cdot 10^{-4}$	---
4	D-S-C8-2-M1	$9,70 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C9-1-M5	$8,20 \cdot 10^{-5}$	---
5	D-S-C8-2-M2	$9,60 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C9-2-M1	$1,20 \cdot 10^{-5}$	---
6	D-S-C8-2-M4	$1,00 \cdot 10^{-7}$	✓	D-S-C9-2-M4	$1,40 \cdot 10^{-5}$	---
7	D-S-C8-2-M5	$7,30 \cdot 10^{-8}$	✓	D-S-C9-3-M5	$1,00 \cdot 10^{-5}$	---
8	Mittelwert	$9,69 \cdot 10^{-8}$	✓	Mittelwert	$7,34 \cdot 10^{-5}$	---

Vergleich Stahl – ESG – Emaillebeschichtetes ESG – Siebdruckbeschichtetes ESG

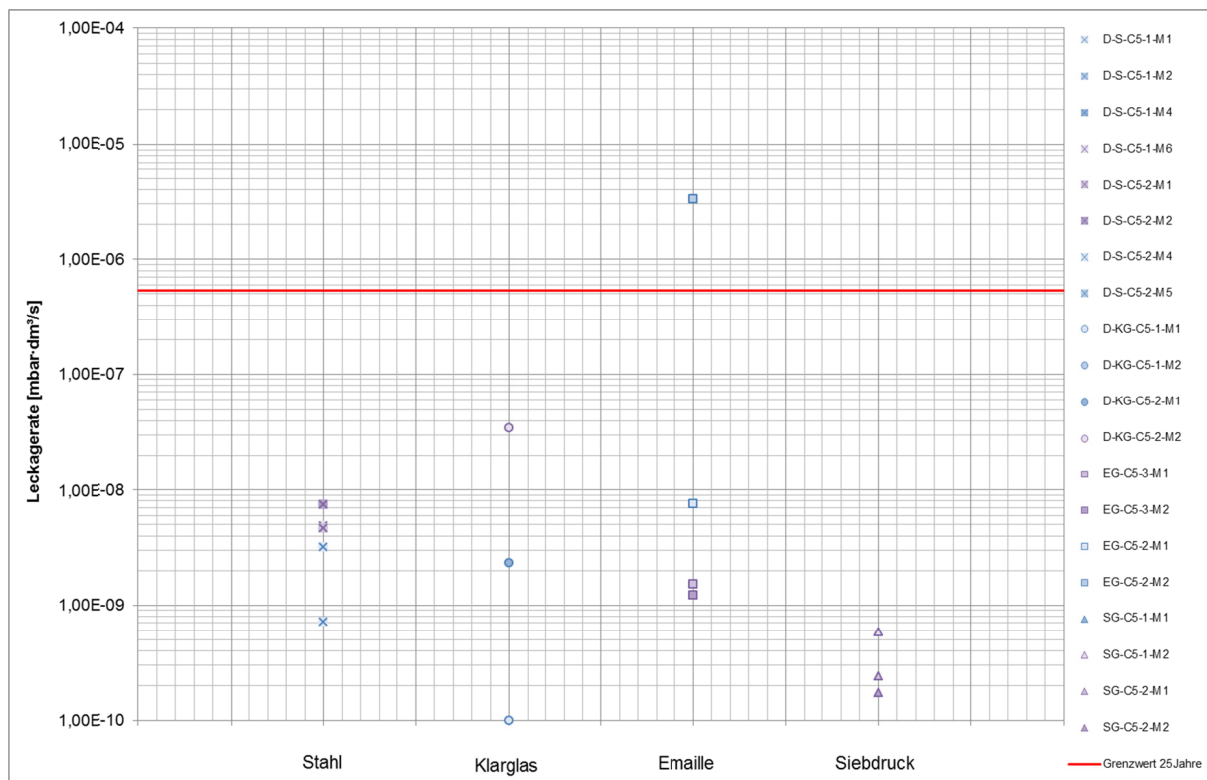


Abbildung 5.8: Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für einen Viton®-Ring (6 mm, Shore75) in Verbindung mit Stahldeckschichten, einer Deckschicht aus Klarglas, einer Deckschicht emailliert, einer Deckschicht siebbedruckt

Abbildung 5.8, Tabelle 5.13 und 5.14 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate für einen Viton®-Ring der Dicke 6 mm und Shore75 bei variierenden Deckschichten.

Die Ergebnisse zeigen, dass in Zusammenhang mit dem siebbedruckten ESG die geringsten Leckageraten erreicht werden.

Tabelle 5.13: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge von Diskontinuitäten für einen Viton®-Ring (6 mm, Shore75) in Verbindung mit Stahldeckschichten bzw. einer Deckschicht aus Klarglas

Zeile	Stahldeckschichten			Stahldeckschicht und Deckschicht aus Klarglas		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten
1	D-S-C5-1-M1	$7,20 \cdot 10^{-10}$	✓	D-KG-C5-1-M1	$1,00 \cdot 10^{-10}$	✓
2	D-S-C5-1-M2	$4,90 \cdot 10^{-9}$	✓	D-KG-C5-1-M2	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$	✓
3	D-S-C5-1-M3	---	---	D-KG-C5-2-M1	$2,31 \cdot 10^{-9}$	✓
4	D-S-C5-1-M4	$4,63 \cdot 10^{-9}$	✓	D-KG-C5-2-M2	$3,90 \cdot 10^{-6}$	✓
5	D-S-C5-1-M5	$1,30 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-
6	D-S-C5-1-M6	$4,90 \cdot 10^{-9}$	✓	---	---	-
7	D-S-C5-2-M1	$4,67 \cdot 10^{-9}$	✓	---	---	-
8	D-S-C5-2-M2	$7,40 \cdot 10^{-9}$	✓	---	---	-
9	D-S-C5-2-M3	---	-	---	---	-
10	D-S-C5-2-M4	$3,20 \cdot 10^{-9}$	✓	---	---	-
11	D-S-C5-2-M5	---	-	---	---	-
12	D-S-C5-2-M6	$3,20 \cdot 10^{-10}$	✓	---	---	-
13	Mittelwert	$3,43 \cdot 10^{-9}$	✓	Mittelwert	$9,76 \cdot 10^{-7}$	✓

Tabelle 5.14: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten für einen Viton®-Ring (6 mm, Shore75) in Verbindung mit Stahldeckschicht, einer Deckschicht emailliert, einer Deckschicht siebbedruckt

Zeile	Stahldeckschicht und Deckschicht aus emailliertem ESG			Stahldeckschicht und Deckschicht aus siebbedrucktem ESG		
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Grenzwert eingehalten
1	D-EG-C5-1-M1	$1,52 \cdot 10^{-9}$	✓	D-SG-C5-1-M1	$5,00 \cdot 10^{-10}$	✓
2	D-EG-C5-1-M2	$1,22 \cdot 10^{-9}$	✓	D-SG-C5-1-M2	$5,80 \cdot 10^{-10}$	✓
3	D-EG-C5-2-M1	$7,60 \cdot 10^{-9}$	✓	D-SG-C5-2-M1	$2,40 \cdot 10^{-10}$	✓
4	D-EG-C5-2-M2	$3,30 \cdot 10^{-6}$	---	D-SG-C5-2-M2	$1,75 \cdot 10^{-10}$	✓
5	Mittelwert	$8,28 \cdot 10^{-7}$	✓	Mittelwert	$3,74 \cdot 10^{-10}$	✓

5.1.3 Konsequenz für die Ausführung

Für die Kontaktfläche „Stahl zu Dichtring“ bzw. „Glas zu Dichtring“ hat sich der Dichtring mit einer Dicke von 6 mm und einer Härte von Shore75 (C5) mit der besten Eignung für den Einsatz in einem VIGS herausgestellt.

Bezogen auf die Beschichtung der Glasdeckschicht werden mit der Kombination „Viton®-Ring C5 und Siebdruckbeschichtung§ die besten Messergebnisse ermittelt.

Im Detail werden die folgenden Feststellungen gemacht, die die beiden eben genannten Ergebnisse teilweise noch einmal belegen:

- In den Kontaktflächen „Stahl zu Dichtring“ treten in Verbindung mit dem Dichtringmaterial Viton® geringere Leckageraten infolge von Diskontinuitäten auf als mit dem Dichtringmaterial Aflas®.
- In Verbindung mit Viton® als Dichtringmaterial wird die Leckagerate infolge von Diskontinuitäten mit zunehmendem Ringdurchmesser gleichzeitig größer.
- In Verbindung mit Viton® als Dichtringmaterial wird die Leckagerate infolge von Diskontinuitäten mit zunehmender Ringhärte gleichzeitig größer.
- In Verbindung mit Viton® als Dichtringmaterial führen Ringdicken von 8 mm ab einer Härte von Shore80 und Ringdicken von Shore90 mit 4 mm und 6 mm Ringdicke zu Leckageraten infolge von Diskontinuitäten, die den Grenzwert für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit eines VIGS nicht einhalten.
- In Verbindung mit einem 6 mm dicke Viton®-Ring der Härte Shore75 (C5) werden bei der Untersuchung der Beschichtung mit Siebdruck die besten Ergebnisse erzielt. Die Emaillebeschichtung führt zu höheren Leckageraten.

Die weiteren Betrachtungen zur Permeation beziehen sich aufgrund dieser Ergebnisse auf einen Viton®-Ring der Dicke 6 mm und der Härte Shore75 (C5).

5.2 Auswertung und Diskussion zu den Untersuchungsergebnissen der Leckagerate infolge von Permeation

5.2.1 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

In Kapitel 4.3 dieser Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen zum Stofftransport durch den Dichtring eines VIGS in Abhängigkeit der folgenden Parameter durchgeführt:

- glatte Stahloberfläche ohne Nut
- Stahloberfläche mit runder Nut
- Stahloberfläche mit eckiger Nut

Die Ergebnisse zu der Permeation durch den Dichtring sind in Tabelle 5.15 zusammengefasst dargestellt. Messergebnisse, die den geforderten Grenzwert für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit eines kleinformatigen VIGS nicht einhalten, werden in der Tabelle rot hervorgehoben.

Tabelle 5.15: Leckageraten infolge von Permeation

Zeile	Leckagerate [mbar · dm ³ /s]	
1	<i>P-O-C2-1-M1</i> $7,30 \cdot 10^{-6}$	<i>P-O-C2-2-M1</i> $7,20 \cdot 10^{-6}$
2	<i>P-O-C5-1-M1</i> $4,80 \cdot 10^{-6}$	<i>P-O-C5-2-M1</i> $4,70 \cdot 10^{-6}$
3	<i>P-E-C5-1-M1</i> $3,50 \cdot 10^{-6}$	<i>P-E-C5-2-M1</i> $3,60 \cdot 10^{-6}$
4	<i>P-R-C5-1-M1</i> $3,90 \cdot 10^{-6}$	<i>P-R-C5-2-M1</i> $3,70 \cdot 10^{-6}$

Die ermittelten Leckageraten zur Permeation liegen alle über dem geforderten Grenzwert der Leckagerate. Eine detailliertere Berechnung zu der zu erwartenden Dauerhaftigkeit folgt in Kapitel 5.3 bzw. 5.4.

5.2.2 Bewertung der Einflussgrößen

Im Folgenden wird der Einfluss von Dichtringmaterial, Ringdicke und Ringhärte auf die Permeation näher betrachtet. Grundlage dieser Betrachtung sind die in Kapitel 4.2 durchgeführten Versuche. Aufgrund der kurzzeitigen Heliumbeanspruchung in diesen Versuchen sind die erzielten Leckageraten zur Permeation Näherungswerte, die nicht den Maximalwert der Permeation wiedergeben. Dennoch können diese Ergebnisse hier herangezogen werden, um eine Aussage bezüglich des Verhaltens der Permeation in Abhängigkeit der oben genannten Parameter zu machen, da die Dauer der Beaufschlagung für alle Versuche gleich gewesen ist.

Vergleich zum Dichtringmaterial

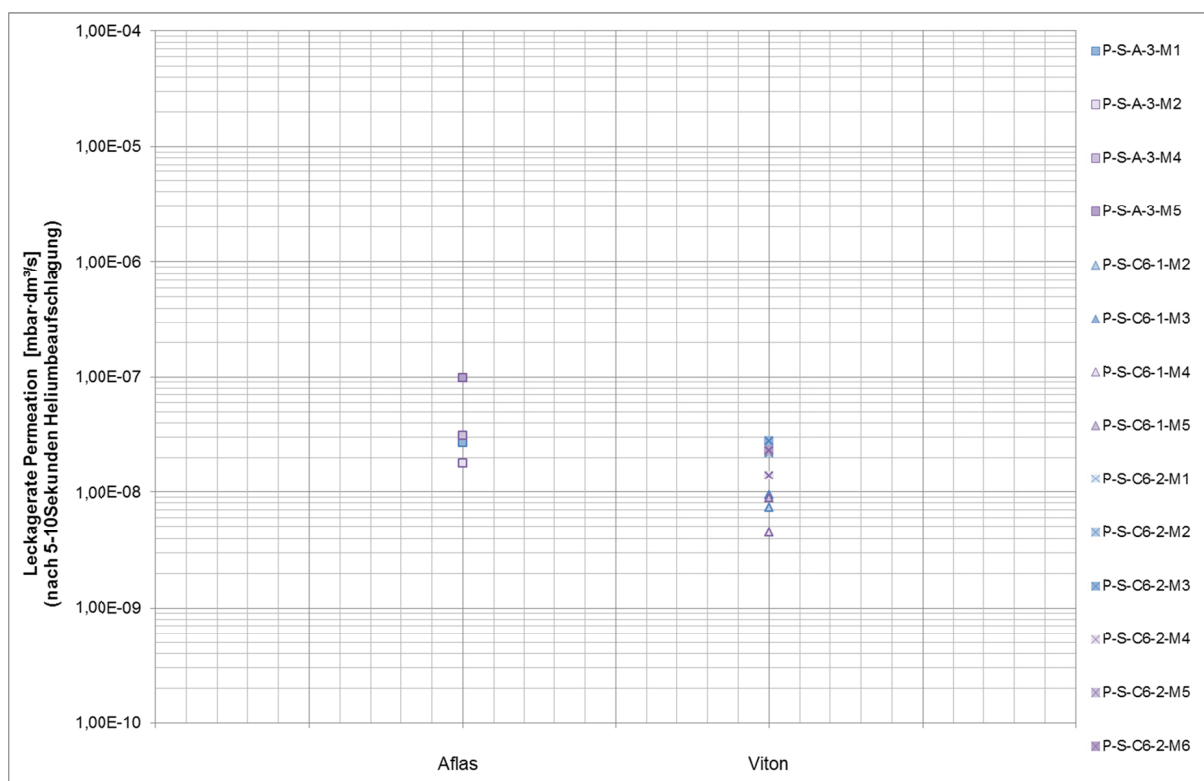


Abbildung 5.9: Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton® (C6) und Aflas® (A1) (Ringdicke 6 mm, Shore90)

Die Messwerte zur Leckagerate infolge von Permeation für die beiden Dichtringmaterialien Aflas® und Viton® liegen dicht beieinander. Die gemessenen Leckageraten zum Material Aflas® liegen im Mittel etwas höher verglichen mit den gemessenen Leckageraten zum Material Viton®.

Der erwartete hohe Permeationswiderstand (siehe Kapitel 2.1) für Aflas® tritt nicht auf bzw. konnten die Messungen belegen, dass Viton® bei den gleichen Einbaubedingungen bessere Permeationseigenschaften aufzeigt. Aufgrund dieser Ergebnisse ist von dem Einsatz von Aflas® als Dichtringmaterial abzusehen.

Tabelle 5.16: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10-Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton® (C6) und Aflas® (A1) (Ringdicke 6 mm, Shore90)

Zeile	Aflas®		Viton®	
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-S-A1-3-M1	$2,70 \cdot 10^{-8}$	P-S-C6-1-M2	$7,30 \cdot 10^{-9}$
2	P-S-A1-3-M4	$3,10 \cdot 10^{-8}$	P-S-C6-1-M3	$9,40 \cdot 10^{-9}$
3	P-S-A1-3-M2	$1,80 \cdot 10^{-8}$	P-S-C6-1-M4	$4,50 \cdot 10^{-9}$
4	P-S-A1-3-M5	$9,80 \cdot 10^{-8}$	P-S-C6-1-M5	$8,80 \cdot 10^{-9}$
5	---	---	P-S-C6-2-M1	$2,20 \cdot 10^{-8}$
6	---	---	P-S-C6-2-M2	$2,20 \cdot 10^{-8}$
7	---	---	P-S-C6-2-M3	$2,80 \cdot 10^{-8}$
8	---	---	P-S-C6-2-M4	$1,40 \cdot 10^{-8}$
9	---	---	P-S-C6-2-M5	$2,30 \cdot 10^{-8}$
10	---	---	P-S-C6-2-M6	$2,30 \cdot 10^{-8}$
11	Mittelwert	$4,35 \cdot 10^{-8}$	Mittelwert	$1,62 \cdot 10^{-8}$

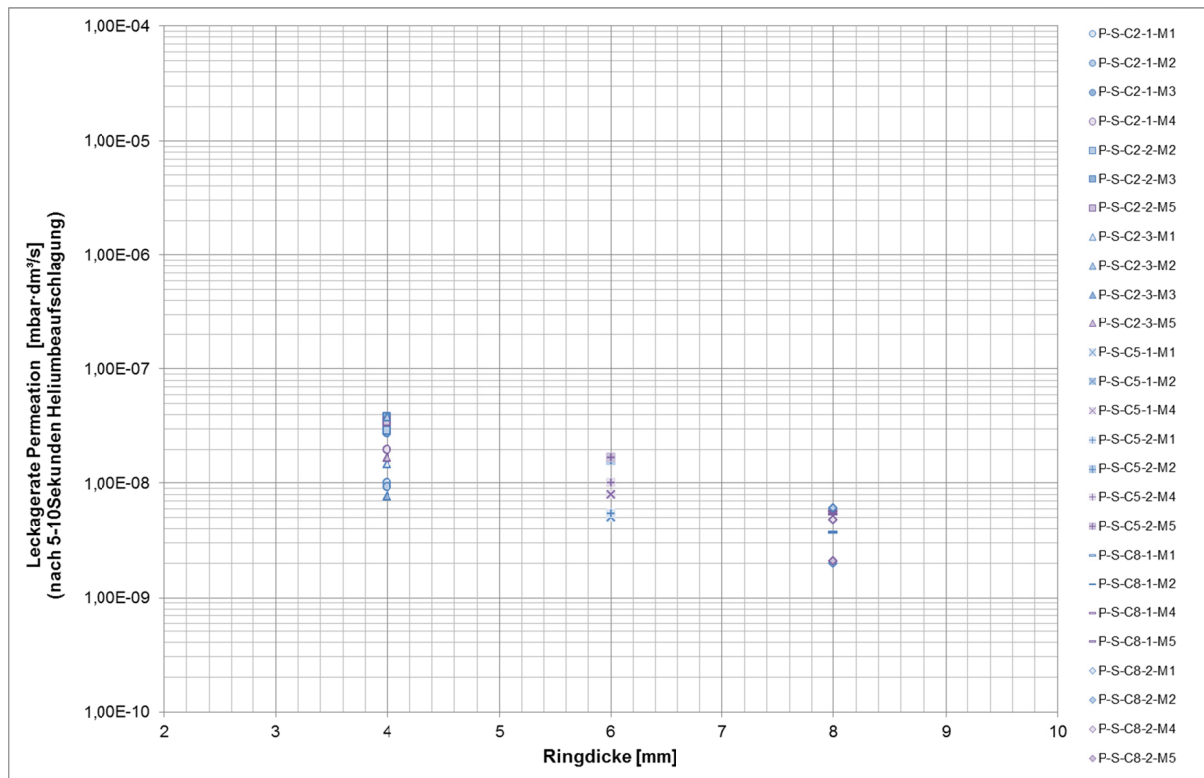
Vergleich der Dicke der Dichtringe

Abbildung 5.10: Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore75 bei variierender Dicke

Abbildung 5.10 und Tabelle 5.17 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate infolge von Permeation für einen Viton®-Ring der Härte Shore75 bei variierendem Ringdurchmesser.

Die Ergebnisse belegen grundsätzlich die Ansätze der Theorie: Mit zunehmenden Ringdurchmesser nimmt die Leckagerate infolge von Permeation ab.

Tabelle 5.17: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore75 bei variierender Dicke

Zeile	Viton®, 4 mm		Viton®, 6 mm		Viton®, 8 mm	
	Versuchs-nummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchs-nummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchs-nummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-S-C2-1-M1	$1,00 \cdot 10^{-8}$	P-S-C5-1-M1	$5,00 \cdot 10^{-9}$	P-S-C8-1-M1	$3,70 \cdot 10^{-9}$
2	P-S-C2-1-M2	$9,30 \cdot 10^{-9}$	P-S-C5-1-M2	$5,40 \cdot 10^{-9}$	P-S-C8-1-M2	$3,70 \cdot 10^{-9}$
3	P-S-C2-1-M3	$2,80 \cdot 10^{-8}$	P-S-C5-1-M4	$8,00 \cdot 10^{-9}$	P-S-C8-1-M4	$5,70 \cdot 10^{-9}$
4	P-S-C2-1-M4	$2,00 \cdot 10^{-8}$	P-S-C5-2-M1	$5,40 \cdot 10^{-9}$	P-S-C8-1-M5	$5,30 \cdot 10^{-9}$
5	P-S-C2-2-M2	$2,90 \cdot 10^{-8}$	P-S-C5-2-M2	$1,60 \cdot 10^{-8}$	P-S-C8-2-M1	$2,00 \cdot 10^{-9}$
6	P-S-C2-2-M3	$3,80 \cdot 10^{-8}$	P-S-C5-2-M4	$1,00 \cdot 10^{-8}$	P-S-C8-2-M2	$6,10 \cdot 10^{-9}$
7	P-S-C2-2-M5	$3,50 \cdot 10^{-8}$	P-S-C5-2-M5	$1,70 \cdot 10^{-8}$	P-S-C8-2-M4	$4,80 \cdot 10^{-9}$
8	P-S-C2-3-M1	$1,50 \cdot 10^{-8}$	---	---	P-S-C8-2-M5	$2,10 \cdot 10^{-9}$
9	P-S-C2-3-M2	$3,80 \cdot 10^{-8}$	---	---	---	---
10	P-S-C2-3-M3	$7,70 \cdot 10^{-9}$	---	---	---	---
11	P-S-C2-3-M5	$1,70 \cdot 10^{-8}$	---	---	---	---
12	Mittelwert	$2,25 \cdot 10^{-8}$	Mittelwert	$9,54 \cdot 10^{-9}$	Mittelwert	$4,18 \cdot 10^{-9}$

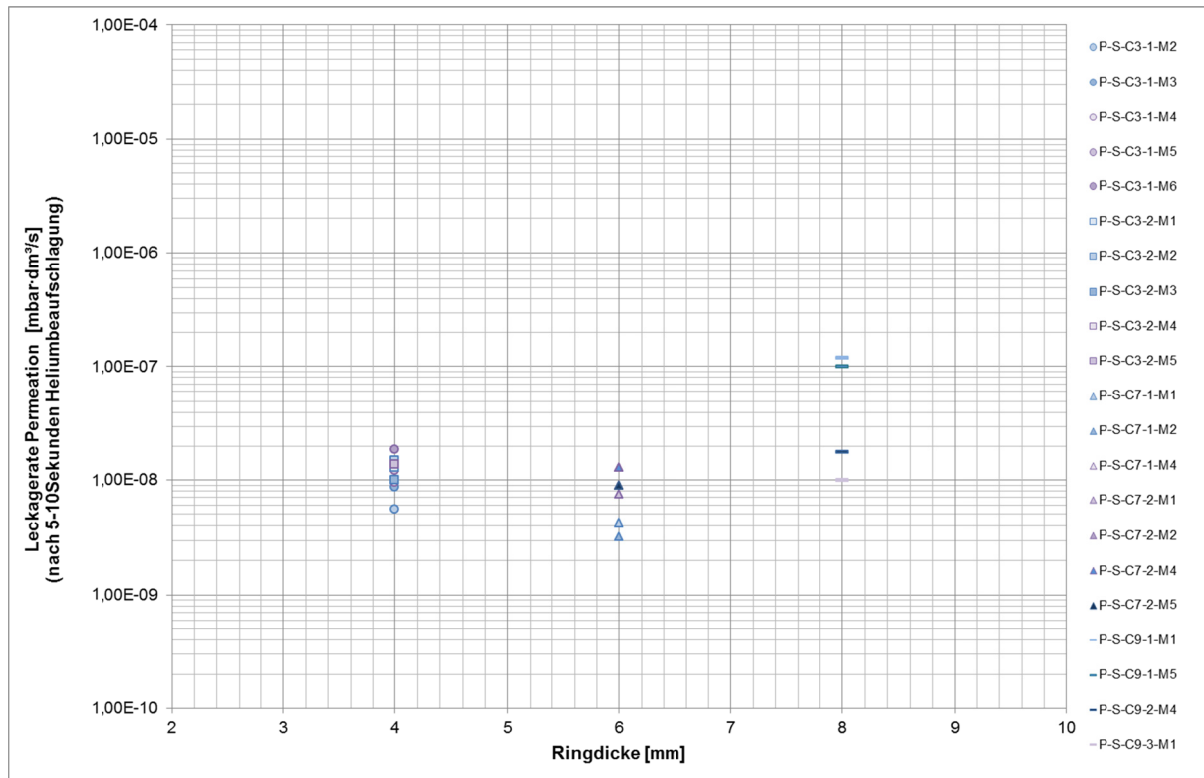


Abbildung 5.11: Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore80 bei variierender Dicke

Abbildung 5.11 und Tabelle 5.18 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate infolge von Permeation für einen Viton®-Ring der Härte Shore80 bei variierendem Ringdurchmesser.

Die Theorie, dass die Permeationsleitfähigkeit mit zunehmender Ringdicke geringer wird, kann mit dem Ansatz dieser Messergebnisse bei einer Härte von Shore80 nicht eindeutig belegt werden.

Tabelle 5.18: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore80 bei variierender Dicke

Zeile	Viton®, 4 mm		Viton®, 6 mm		Viton®, 8 mm	
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-S-C3-1-M2	$5,50 \cdot 10^{-9}$	P-S-C7-1-M1	$4,20 \cdot 10^{-9}$	P-S-C9-1-M1	$1,20 \cdot 10^{-7}$
2	P-S-C3-1-M3	$8,60 \cdot 10^{-9}$	P-S-C7-1-M2	$3,20 \cdot 10^{-9}$	P-S-C9-3-M1	$1,00 \cdot 10^{-8}$
3	P-S-C3-1-M4	$9,50 \cdot 10^{-9}$	P-S-C7-1-M4	$1,30 \cdot 10^{-8}$	P-S-C9-3-M4	$1,00 \cdot 10^{-7}$
4	P-S-C3-1-M5	$1,20 \cdot 10^{-8}$	P-S-C7-2-M1	$7,50 \cdot 10^{-9}$	P-S-C9-2-M4	$1,80 \cdot 10^{-8}$
5	P-S-C3-1-M6	$1,90 \cdot 10^{-8}$	P-S-C7-2-M2	$8,90 \cdot 10^{-9}$	---	---
6	P-S-C3-2-M1	$1,30 \cdot 10^{-8}$	P-S-C7-2-M4	$1,30 \cdot 10^{-8}$	---	---
7	P-S-C3-2-M2	$1,50 \cdot 10^{-8}$	P-S-C7-2-M5	$8,90 \cdot 10^{-9}$	---	---
8	P-S-C3-2-M3	$1,00 \cdot 10^{-8}$	---	---	---	---
9	P-S-C3-2-M4	$1,40 \cdot 10^{-8}$	---	---	---	---
10	P-S-C3-2-M5	$1,40 \cdot 10^{-8}$	---	---	---	---
11	Mittelwert	$1,21 \cdot 10^{-8}$	Mittelwert	$8,39 \cdot 10^{-9}$	Mittelwert	$6,20 \cdot 10^{-8}$

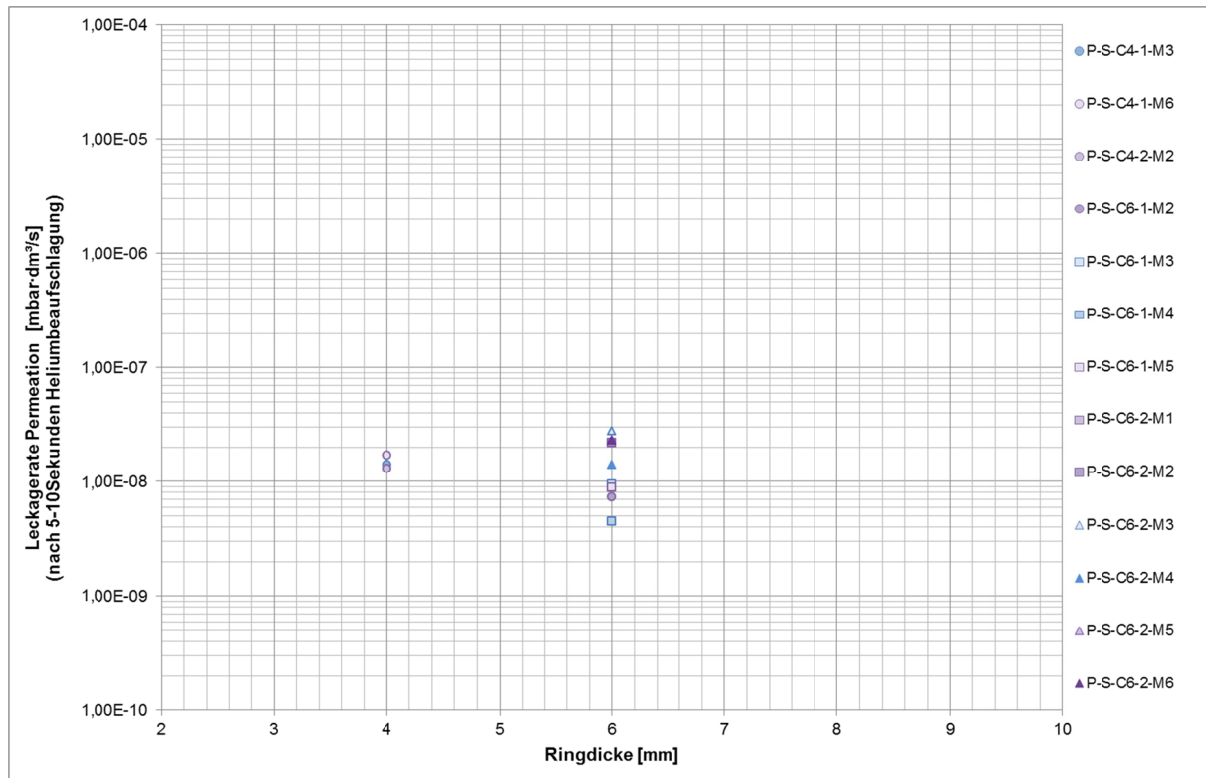


Abbildung 5.12: Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore90 bei variierender Dicke

Abbildung 5.12 und Tabelle 5.19 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate infolge von Permeation für einen Viton®-Ring der Härte Shore90 bei variierendem Ringdurchmesser.

Die Theorie, dass die Permeationsleitfähigkeit mit zunehmender Ringdicke geringer wird, kann mit dem Ansatz dieser Messergebnisse bei einer Härte von Shore90 nicht eindeutig belegt werden.

Tabelle 5.19: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einer Härte von Shore90 bei variierender Dicke

Zeile	Viton®, 4 mm		Viton®, 6 mm	
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-S-C4-1-M3	$1,40 \cdot 10^{-8}$	P-S-C6-1-M2	$7,30 \cdot 10^{-9}$
2	P-S-C4-1-M6	$1,70 \cdot 10^{-8}$	P-S-C6-1-M3	$9,40 \cdot 10^{-9}$
3	P-S-C4-2-M2	$1,30 \cdot 10^{-8}$	P-S-C6-1-M4	$4,50 \cdot 10^{-9}$
4	---	---	P-S-C6-1-M5	$8,80 \cdot 10^{-9}$
5	---	---	P-S-C6-2-M1	$2,20 \cdot 10^{-8}$
6	---	---	P-S-C6-2-M2	$2,20 \cdot 10^{-8}$
7	---	---	P-S-C6-2-M3	$2,80 \cdot 10^{-8}$
8	---	---	P-S-C6-2-M4	$1,40 \cdot 10^{-8}$
9	---	---	P-S-C6-2-M5	$2,30 \cdot 10^{-8}$
10	---	---	P-S-C6-2-M6	$2,30 \cdot 10^{-8}$
11	Mittelwert	$1,47 \cdot 10^{-8}$	Mittelwert	$1,62 \cdot 10^{-8}$

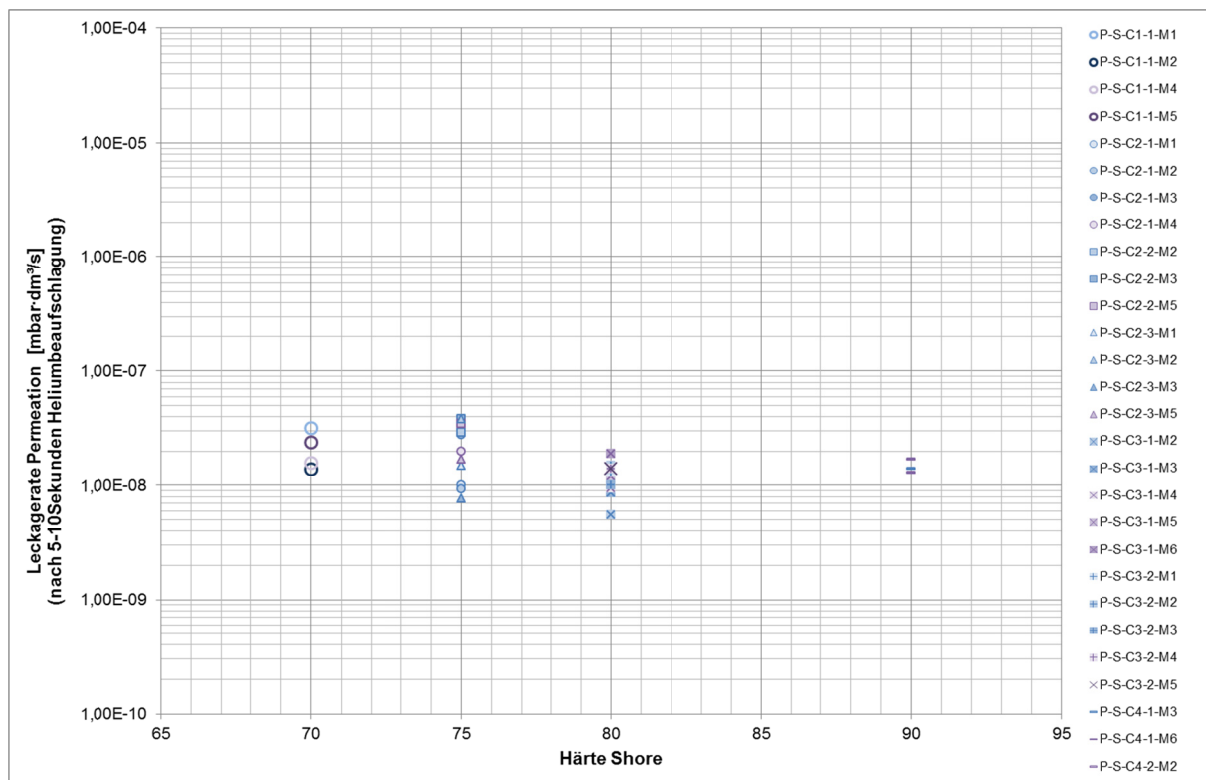
Vergleich Härte des Dichtrings

Abbildung 5.13: Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 4 mm und variierender Härte

Abbildung 5.13 und die Tabellen 5.20 und 5.21 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate für einen Viton®-Ring der Dicke 4 mm bei variierender Härte.

Bezogen auf die Härten Shore70, Shore75 und Shore80 gilt: Mit zunehmender Härte ist für die Leckagerate infolge von Permeation eine abnehmende Tendenz festzustellen. Eine Ausnahme stellt hier der 4 mm dicke Ring der Härte Shore90 dar.

Tabelle 5.20: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 4 mm und Shore70 bzw. Shore75

Zeile	Viton®, Shore70		Viton®, Shore75	
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-S-C1-1-M1	$3,20 \cdot 10^{-8}$	P-S-C2-1-M1	$1,00 \cdot 10^{-8}$
2	P-S-C1-1-M2	$1,40 \cdot 10^{-8}$	P-S-C2-1-M2	$9,30 \cdot 10^{-9}$
3	P-S-C1-1-M4	$1,60 \cdot 10^{-8}$	P-S-C2-1-M3	$2,80 \cdot 10^{-8}$
4	P-S-C1-1-M5	$2,40 \cdot 10^{-8}$	P-S-C2-1-M4	$2,00 \cdot 10^{-8}$
5	---	---	P-S-C2-2-M2	$2,90 \cdot 10^{-8}$
6	---	---	P-S-C2-2-M3	$3,80 \cdot 10^{-8}$
7	---	---	P-S-C2-2-M5	$3,50 \cdot 10^{-8}$
8	---	---	P-S-C2-3-M1	$1,50 \cdot 10^{-8}$
9	---	---	P-S-C2-3-M2	$3,80 \cdot 10^{-8}$
10	---	---	P-S-C2-3-M3	$7,70 \cdot 10^{-9}$
11	---	---	P-S-C2-3-M5	$1,70 \cdot 10^{-8}$
12	Mittelwert	$2,15 \cdot 10^{-8}$	Mittelwert	$2,25 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 5.21: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 4 mm und Shore80 bzw. Shore90

Zeile	Viton®, Shore80		Viton®, Shore90	
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-S-C3-1-M2	$5,50 \cdot 10^{-9}$	P-S-C4-1-M3	$1,40 \cdot 10^{-8}$
2	P-S-C3-1-M3	$8,60 \cdot 10^{-9}$	P-S-C4-1-M6	$1,70 \cdot 10^{-8}$
3	P-S-C3-1-M4	$9,50 \cdot 10^{-9}$	P-S-C4-2-M2	$1,30 \cdot 10^{-8}$
4	P-S-C3-1-M5	$1,20 \cdot 10^{-8}$	---	---
5	P-S-C3-1-M6	$1,90 \cdot 10^{-8}$	---	---
6	P-S-C3-2-M1	$1,30 \cdot 10^{-8}$	---	---
7	P-S-C3-2-M2	$1,50 \cdot 10^{-8}$	---	---
8	P-S-C3-2-M3	$1,00 \cdot 10^{-8}$	---	---
9	P-S-C3-2-M4	$1,40 \cdot 10^{-8}$	---	---
10	P-S-C3-2-M5	$1,40 \cdot 10^{-8}$	---	---
11	Mittelwert	$1,21 \cdot 10^{-8}$	Mittelwert	$1,47 \cdot 10^{-8}$

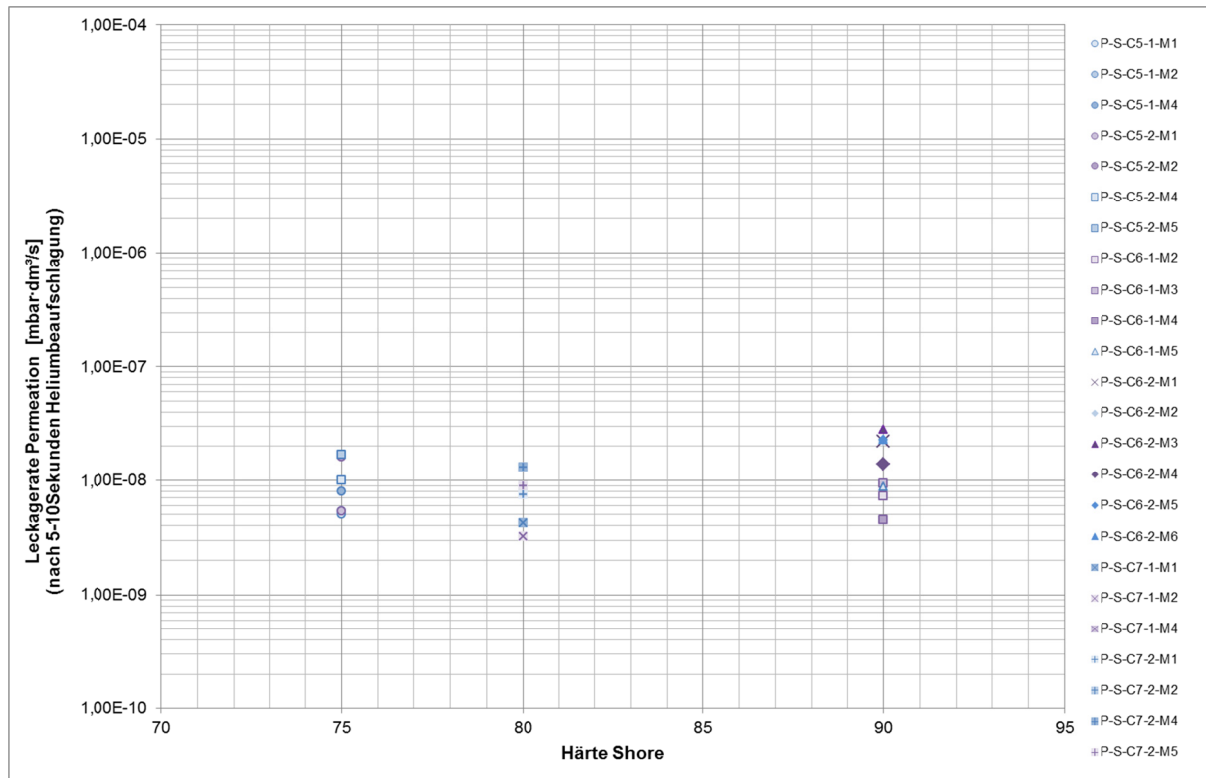


Abbildung 5.14: Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 6 mm und variierender Härte

Abbildung 5.14 und Tabelle 5.22 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate infolge von Permeation für einen Viton®-Ring der Dicke 6 mm bei variierender Ringhärte.

Bezogen auf die Härten Shore75 und Shore80 ist festzustellen: Mit zunehmender Härte nimmt die Leckagerate infolge Permeation ab. Eine Ausnahme stellt hier wieder die Härte Shore90 dar.

Tabelle 5.22: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 6 mm und variierender Härte

Zeile	Viton®, Shore75		Viton®, Shore80		Viton®, Shore90	
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-S-C5-1-M1	$5,00 \cdot 10^{-9}$	P-S-C7-1-M1	$4,20 \cdot 10^{-9}$	P-S-C6-1-M2	$7,30 \cdot 10^{-9}$
2	P-S-C5-1-M2	$5,40 \cdot 10^{-9}$	P-S-C7-1-M2	$3,20 \cdot 10^{-9}$	P-S-C6-1-M3	$9,40 \cdot 10^{-9}$
3	P-S-C5-1-M4	$8,00 \cdot 10^{-9}$	P-S-C7-1-M4	$1,30 \cdot 10^{-8}$	P-S-C6-1-M4	$4,50 \cdot 10^{-9}$
4	P-S-C5-2-M1	$5,40 \cdot 10^{-9}$	P-S-C7-2-M1	$7,50 \cdot 10^{-9}$	P-S-C6-1-M5	$8,80 \cdot 10^{-9}$
5	P-S-C5-2-M2	$1,60 \cdot 10^{-8}$	P-S-C7-2-M2	$8,90 \cdot 10^{-9}$	P-S-C6-2-M1	$2,20 \cdot 10^{-8}$
6	P-S-C5-2-M4	$1,00 \cdot 10^{-8}$	P-S-C7-2-M4	$1,30 \cdot 10^{-8}$	P-S-C6-2-M2	$2,20 \cdot 10^{-8}$
7	P-S-C5-2-M5	$1,70 \cdot 10^{-8}$	P-S-C7-2-M5	$8,90 \cdot 10^{-9}$	P-S-C6-2-M3	$2,80 \cdot 10^{-8}$
8	---	---	---	---	P-S-C6-2-M4	$1,40 \cdot 10^{-8}$
9	---	---	---	---	P-S-C6-2-M5	$2,30 \cdot 10^{-8}$
10	---	---	---	---	P-S-C6-2-M6	$2,30 \cdot 10^{-8}$
11	Mittelwert	$9,54 \cdot 10^{-9}$	Mittelwert	$8,39 \cdot 10^{-9}$	Mittelwert	$1,62 \cdot 10^{-8}$

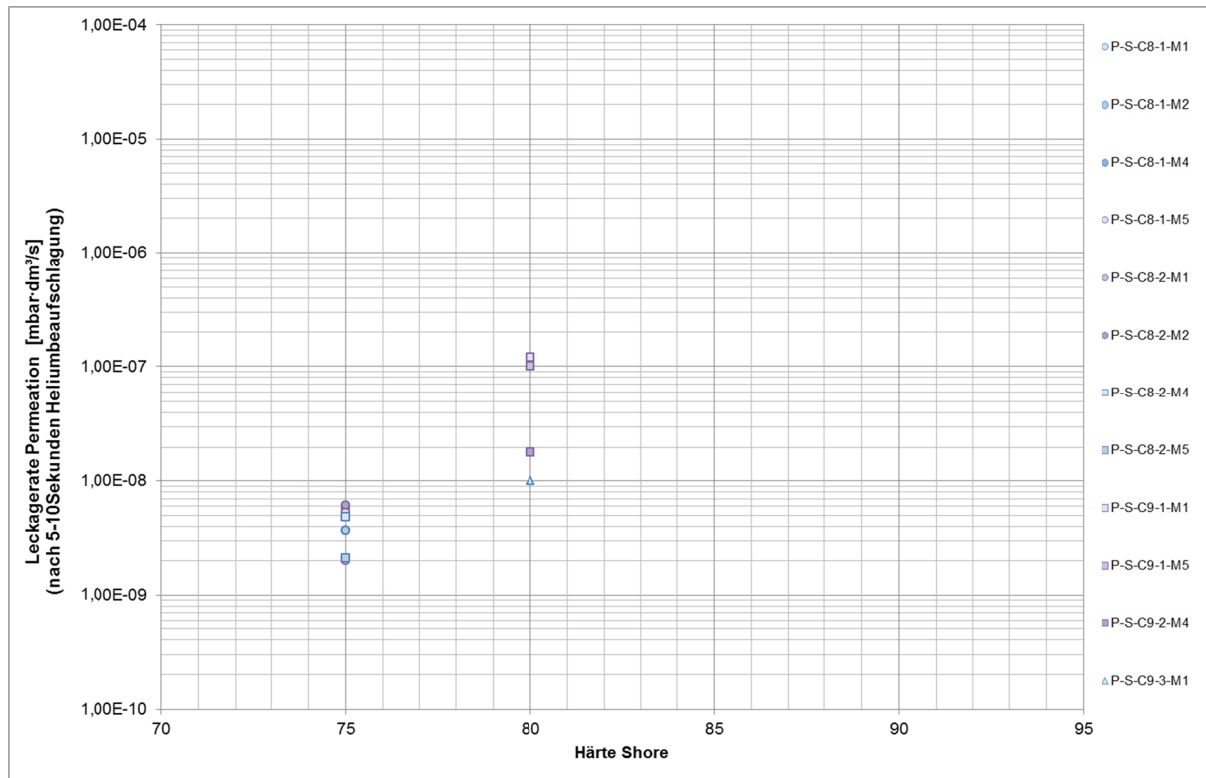


Abbildung 5.15: Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 8 mm und variierender Härte

Abbildung 5.15 und Tabelle 5.23 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate infolge von Permeation für einen Viton®-Ring der Dicke 8 mm und variierender Ringhärte.

Tabelle 5.23: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation bei 5 bzw. 10 Sekunden andauernder Heliumbeaufschlagung für Viton®-Ringe mit einem Ringquerschnitt von 8 mm und variierender Härte

Zeile	Viton®, Shore75		Viton®, Shore80	
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-S-C8-1-M1	$3,70 \cdot 10^{-9}$	P-S-C9-1-M1	$1,20 \cdot 10^{-7}$
2	P-S-C8-1-M2	$3,70 \cdot 10^{-9}$	P-S-C9-3-M1	$1,00 \cdot 10^{-8}$
3	P-S-C8-1-M4	$5,70 \cdot 10^{-9}$	P-S-C9-3-M4	$1,00 \cdot 10^{-7}$
4	P-S-C8-1-M5	$5,30 \cdot 10^{-9}$	P-S-C9-2-M4	$1,80 \cdot 10^{-8}$
5	P-S-C8-2-M1	$2,00 \cdot 10^{-8}$	P-S-C9-3-M5	$1,00 \cdot 10^{-8}$
6	P-S-C8-2-M2	$6,10 \cdot 10^{-9}$	---	---
7	P-S-C8-2-M4	$4,80 \cdot 10^{-9}$	---	---
8	P-S-C8-2-M5	$2,10 \cdot 10^{-9}$	---	---
9	Mittelwert	$6,43 \cdot 10^{-9}$	Mittelwert	$5,16 \cdot 10^{-8}$

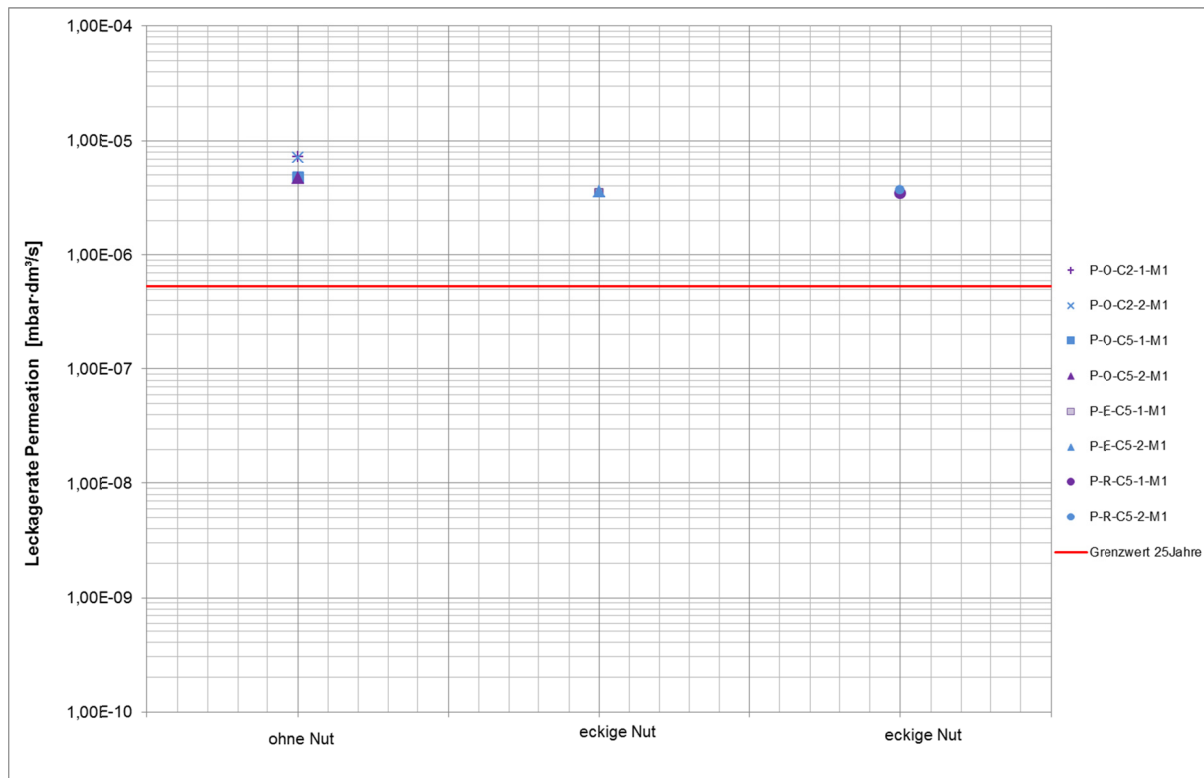
Vergleich der Nutgeometrie

Abbildung 5.16: Vergleich der Leckageraten infolge Permeation für Viton®-Ringe in Abhängigkeit der Nutgeometrie

Abbildung 5.16, Tabelle 5.24 und 5.25 zeigen die Messergebnisse zur Leckagerate infolge von Permeation für einen Viton®-Ring in Abhängigkeit der Nutgeometrie.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Nut, in die der Dichtring eingebracht wird, einen positiven Einfluss auf die Leckagerate hat. Im Vergleich wird die Leckagerate infolge der Permeation durch eine Nut in dem Abstandhalter um ca. 25% reduziert.

Bezogen auf den hier zudem dargestellten Vergleich der Permeation durch zwei verschiedene Dichtringdicken belegt die Rechenansätze der Theorie: Eine Reduzierung der Permeation mit zunehmender Ringdicke verhält sich umgekehrt proportional zu der Leckagerate.

Tabelle 5.24: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation für Viton®-Ringe in Abhängigkeit der Nutgeometrie und der Ringdicke

Zeile	Ohne Nut, C2		Ohne Nut, C5	
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-O-C2-1-M1	$7,30 \cdot 10^{-6}$	P-O-C5-1-M1	$4,80 \cdot 10^{-6}$
2	P-O-C2-2-M1	$7,20 \cdot 10^{-6}$	P-O-C5-2-M1	$4,70 \cdot 10^{-6}$
3	Mittelwert	$7,25 \cdot 10^{-6}$	Mittelwert	$4,75 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 5.25: Tabellarischer Vergleich der Leckageraten infolge Permeation für Viton®-Ringe in Abhängigkeit der Nutgeometrie

Zeile	Eckige Nut, C5		Runde Nut, C5	
	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]	Versuchsnummer	Leckagerate [mbar · dm³/s]
1	P-E-C5-1-M1	$3,50 \cdot 10^{-6}$	P-R-C5-1-M1	$3,50 \cdot 10^{-6}$
2	P-E-C5-2-M1	$3,60 \cdot 10^{-6}$	P-R-C5-2-M1	$3,70 \cdot 10^{-6}$
3	Mittelwert	$3,55 \cdot 10^{-6}$	Mittelwert	$3,60 \cdot 10^{-6}$

5.2.3 Konsequenz für die Ausführung

Bei der Betrachtung der Permeation hat sich herausgestellt, dass keiner der ausgewählten Dichtringe die geforderte Leckagerate für eine Dauerhaftigkeit eines kleinformatigen VIGS von mehr als 25 Jahren einhält.

Bezogen auf das Permeationsverhalten in Abhängigkeit von Dicke und Härte des Dichtrings und in Abhängigkeit der Nut wurden die folgenden Feststellungen gemacht:

- Der Vergleich der Leckageraten infolge von Permeation für Aflas® und Viton® zeigen nicht den erwarteten höheren Permeationswiderstand für Aflas®. Die Messwerte liegen nah beieinander, im Mittel werden mit Viton® aber geringere Leckageraten erreicht.
- In Verbindung mit Viton® als Dichtringmaterial nimmt die Leckagerate infolge von Permeation mit zunehmendem Ringquerschnitt gleichzeitig ab. Ausnahmen bilden hier die Viton®-Ringe der Dicke 4 mm und Härte Shore90, der Dicke 6 mm und Härte Shore90 und der Dicke 8 mm und Härte Shore80.
- In Verbindung mit Viton® als Dichtringmaterial nimmt die Leckagerate infolge von Permeation mit zunehmender Härte gleichzeitig ab. Ausnahmen bilden hier die Viton®-Ringe der Dicke 4 mm und Härte Shore90, der Dicke 6 mm und Härte Shore90 und der Dicke 8 mm und Härte Shore80.
- Die hier betrachteten Viton®-Ringe halten die erforderliche Leckagerate für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit von Dämmstoffen nicht ein.
- Durch das Einbringen des Dichtrings in eine Nut kann die Leckagerate infolge der Permeation um ca. 25% reduziert werden.
- Die Geometrie der Nut hat hier keinen wesentlichen Einfluss auf die Leckagerate – von Bedeutung ist jedoch, dass der Ring mehr als 2 mm aus der Nut heraus ragt, damit bei Zusammenpressen des Rings nicht die Deckschichten des Versuchskörpers bzw. die Deckschicht und der Stahlrahmen in Kontakt treten und damit das Anpressen des Dichtrings verhindern.

Abschließend wird hier festgestellt, dass die Kombination aus einem Ring mit 6 mm Dicke und einer Härte von Shore75 (C2-2) eingebaut in eine eckige Nut zu den geringsten Leckageraten infolge der Permeation führt, die geforderte Grenzleckagerate für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit jedoch nicht eingehalten wird.

5.3 Gesamtleckagerate eines VIGS

Wie die vorangegangenen Untersuchungen zur Permeation des Viton®-Rings gezeigt haben, ist es nicht möglich, mit dem bisherigen VIGS-Aufbau die geforderte 25-jährige Dauerhaftigkeit für Dämmstoffe einzuhalten.

Um den Einfluss des Dichtrings auf die Leckagerate des VIGS hier dennoch abschätzen und bewerten zu können, wird im Folgenden die Dauerhaftigkeit des bisherigen VIGS-Aufbaus für das in Kapitel 3 betrachtete kleinformatige Element bestimmt.

Alle vorangegangenen Untersuchungen beziehen sich immer nur auf eine Dichtebene bzw. zwei Kontaktflächen, die mit den Einbaubedingungen im VIGS identisch sind. Dieser Ansatz muss bei der finalen Berechnung der Dauerhaftigkeit bzw. der Gesamtleckagerate eines zusammengesetzten fertigen VIGS berücksichtigt werden.

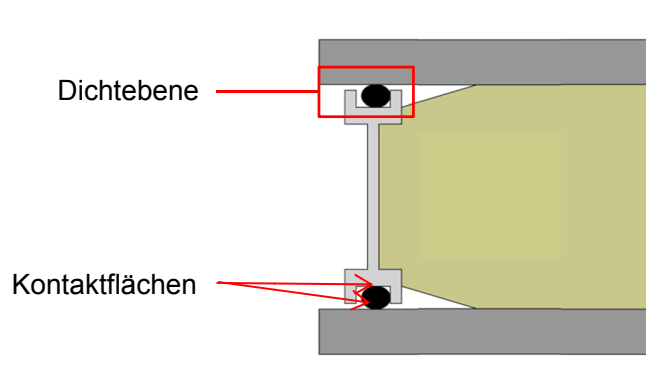


Abbildung 5.19: Darstellung Dichtebene und Kontaktfläche

Die Gesamtleckagerate wird entsprechend Kapitel 3.7 mit der folgenden Gleichung (3.9) berechnet:

$$q_{pV,ges.} = 2 \cdot q_{pV,Disk,Stahl} + 2 \cdot q_{pV,Disk,Glas} + 2 \cdot q_{pV,Perm.} \quad (3.9)$$

Mit	$q_{pV,ges.}$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten und Permeation [mbar · dm³/s]
	$q_{pV,Disk,Stahl}$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Stahl“ [mbar · dm³/s]
	$q_{pV,Disk,Glas}$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Glas“ [mbar · dm³/s]
	$q_{pV,Perm}$	Leckagerate infolge der Permeation durch den Dichtring [mbar · dm³/s]

Die in Gleichung (3.9) eingehenden Größen beziehen sich auf das VIGS. Um die Leckagerate infolge von Diskontinuitäten und Permeation auch direkt in Abhängigkeit der Messergebnisse der experimentellen Untersuchung aus Kapitel 4 berechnen zu können, wird

Gleichung (3.9) zu der folgenden Gleichung in Abhängigkeit der Kontaktlängen der einzelnen Materialien bzw. in Abhängigkeit der Länge des Dichtrings am Prüfling umgestellt.

$$q_{pV,ges.} = (q_{pV,Disk,Stahl,Versuchskörper} + q_{pV,Disk,Glas,Versuchskörper}) \cdot \frac{L_{Kontakt,VIGS}}{L_{Kontakt,Versuchskörper}} + q_{pV,Perm.,Versuchskörper} \cdot \frac{L_{Dichtring,VIGS}}{L_{Dichtring,Versuchskörper}} \quad (5.1)$$

Mit	$q_{pV,ges.}$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten und Permeation [mbar · dm ³ /s]
	$q_{pV,Disk,Stahl,Versuchskörper}$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Stahl“ am Versuchskörper [mbar · dm ³ /s]
	$q_{pV,Disk,Glas,Versuchskörper}$	Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in der Kontaktfläche „Dichtring zu Glas“ am Versuchskörper [mbar · dm ³ /s]
	$L_{Kontakt,VIGS}$	Länge der Kontaktfläche zwischen Dichtring und Deckschicht bzw. Abstandhalter am VIGS [m]
	$L_{Kontakt,Versuchskörper}$	Länge der Kontaktfläche zwischen Dichtring und Deckschicht bzw. Abstandhalter am Versuchskörper [m]
	$q_{pV,Perm.,Versuchskörper}$	Leckagerate infolge der Permeation durch den Dichtring am Versuchskörper [mbar · dm ³ /s]
	$L_{Dichtring,VIGS}$	Länge des Dichtrings im VIGS [m]
	$L_{Dichtring,Versuchskörper}$	Länge des Dichtrings im Versuchskörper [m]

Wie in Kapitel 3.7 erläutert muss die mit Helium ermittelte Leckagerate in Abhängigkeit der Art der Strömung durch die Leakage gegebenenfalls wie folgt korrigiert werden:

Die Leckagerate in Verbindung mit Diskontinuitäten liegt mit $3,5 \cdot 10^{-9}$ mbar · dm³/s bzw. $3,7 \cdot 10^{-10}$ mbar · dm³/s im Bereich der molekularen Strömung, die Leckagerate in Verbindung mit der Permeation liegt mit $3,7 \cdot 10^{-6}$ mbar · dm³/s im Bereich der viskosen Strömung. Somit muss die Leckagerate infolge Diskontinuitäten um den Faktor f_s (siehe Kapitel 3.7) korrigiert werden.

Die entsprechende Gesamtleckagerate für ein Element der Größe 0,50 x 1,00 x 0,04 m mit einem 6 mm dicken Viton® Ring der Härte Shore75 (C5) ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 5.26: Umrechnung der einzelnen Leckageraten auf die Gesamtleckagerate

Zeile	$L_{\text{Kontakt, VIGS}}$ [m]	$L_{\text{Kontakt, Versuchs-}}$ körper [m]	$L_{\text{Dichtring, VIGS}}$ [m]	$L_{\text{Dichtring, Versuchs-}}$ körper [m]	Leckagerate Diskontinuitäten [mbar · dm³/s]		Leckagerate Permeation [mbar · dm³/s]
					Stahl	Glas	
1	4 · 2,95 m	2 · 1,822 m	2 · 2,95 m	1,822 m	$\frac{1,2 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{7}}$	$\frac{1,3 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{7}}$	$3,70 \cdot 10^{-6}$
2	Gesamtleckagerate [mbar · dm³/s]						
3	1,20 · 10⁻⁵						

5.4 Resultierende Dauerhaftigkeit eines VIGS

Die Bestimmung der Dauerhaftigkeit eines VIGS wird entsprechend Kapitel 3.7 Gleichung (3.11) in Abhängigkeit des lichten Volumens des Versuchskörpers, dem zulässigen Druckanstieg Δp im Elementinnern und der Gesamtleckagerate entsprechend Kapitel 5.3 berechnet:

$$t_{\text{grenz}} = \frac{\Delta p \cdot V_{\text{VIGS}}}{q_{pV, \text{ges.}}} \quad (3.11)$$

Mit	t_{grenz}	Lebenserwartung des Versuchskörpers [s]
	Δp	zulässiger Druckanstieg [mbar]
	V_{VIGS}	lichtes Volumen Versuchskörper [dm ³]
	$q_{pV, \text{ges.}}$	Gesamtleckagerate [mbar · dm ³ /s]

Das lichte Volumen des Versuchskörpers bezieht sich auf VIGS mit Abmessungen 0,50 x 1,00 x 0,04 m.

Tabelle 5.27: Dauerhaftigkeit eines VIGS mit einem 6 mm dicken Viton®-Dichtring der Härte Shore75 und den Abmessungen 0,50 x 1,00 x 0,04 m

Zeile	Δp [mbar]	V_{VIGS} [dm ³]	$q_{pV, \text{ges.}}$ [mbar · dm ³ /s]	t_{grenz} [s]	t_{grenz} [d]	t_{grenz} [a]
1	100	13,58	$1,20 \cdot 10^{-5}$	113.166.667	1.310	4

Ergänzt wird diese Betrachtung um die resultierende Dauerhaftigkeit von VIGS mit größeren Abmessungen:

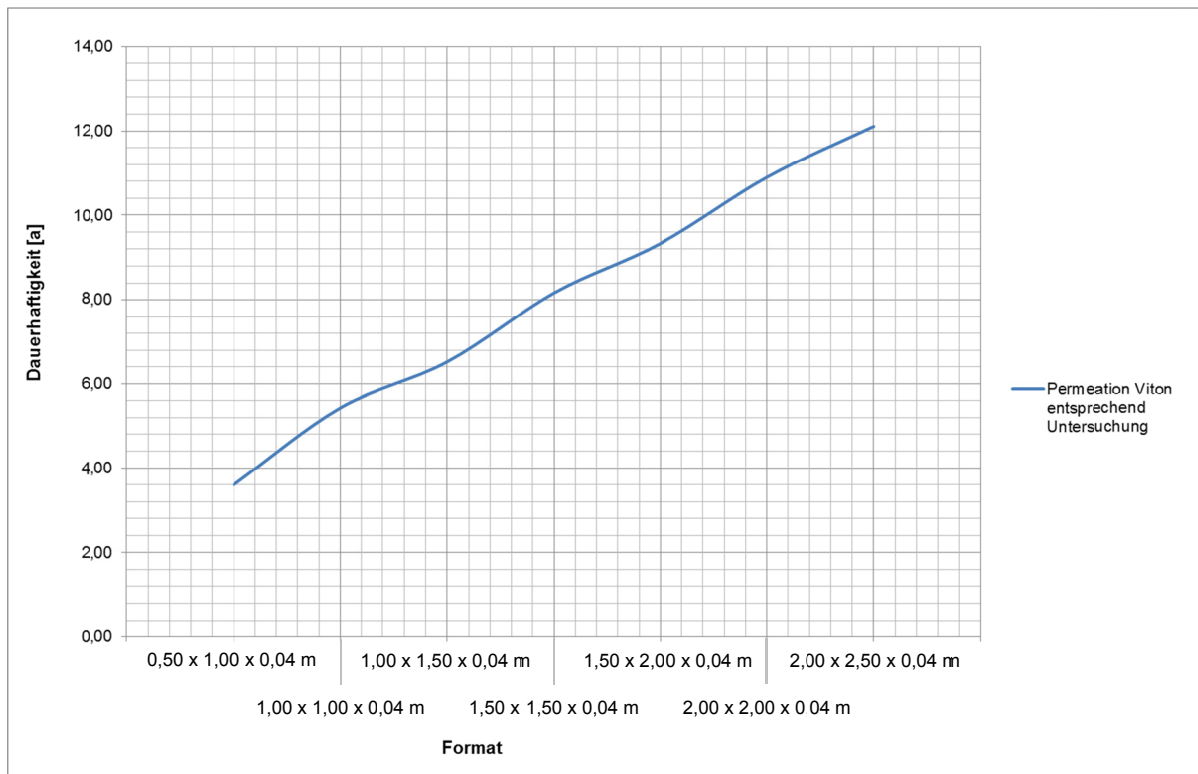


Abbildung 5.20: Dauerhaftigkeit eines VIGS mit einem 6 mm dicken Viton®-Dichtring der Härte Shore75 und variierenden Abmessungen

Mit dem hier ausgewählten Dichtring wären somit abhängig von der Größe des VIGS Dauerhaftigkeiten von bis zu zwölf Jahren möglich.

Die hier ermittelte Dauerhaftigkeit für das VIGS mit dem in dieser Arbeit dargestellten Aufbau ist nur bedingt praxistauglich. Die Elemente halten die geforderte Dauerhaftigkeit für Dämmstoffe von 25 Jahren auch mit großen Abmessungen nicht ein. Es werden weiterführende Untersuchungen und Entwicklungen zur Optimierung der Dauerhaftigkeit erforderlich. Ansätze diesbezüglich werden im Ausblick dargestellt.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Vakuumdämmelemente gewinnen aufgrund stetiger Verschärfung energetischer Anforderungen zunehmend an Bedeutung. Bekannt sind zwei Arten von Vakuumdämmelementen: VIP und VIS.

VIP finden bereits vielfach Verwendung, insbesondere als Dämmung von Haushaltsgeräten, wie beispielsweise verbaut in Kühlschränken. Der Einsatz in der Gebäudedämmung wird ebenfalls seit Jahren vorangetrieben, bietet aber Optimierungspotential. Die eingeschränkte Dauerhaftigkeit der Elemente ist in Zusammenhang mit Elektrogeräten nicht gravierend, aber ein Wärmedämmverbundsystem, das nach zwanzig Jahren die doppelte Wärmeleitfähigkeit aufweist und trotz der hohen Anschaffungskosten in diesem gealterten Zustand zu einem höheren Energieverbrauch führt, ist für den Bauherren nur selten zufriedenstellend. Insbesondere im Zusammenhang mit Feuchteeinwirkungen und starker UV-Einstrahlung kann es zu einer solchen schnelleren Alterung kommen. Zudem sind die Elemente anfällig gegenüber mechanischen Beanspruchungen. Bei einem VIP-basierenden Wärmedämmverbundsystem können beispielsweise keine nachträglichen Durchdringungen durchgeführt werden, ohne die VIP-Ebene zu beschädigen.

VIS sind aufgrund ihrer Edelstahldeckschichten nicht derart anfällig gegenüber mechanischen Beanspruchungen. Das evakuierte VIS ist aufgrund der hier geltenden Sandwichtheorie sogar sehr belastbar und wurde bereits vermehrt als Boden für Industriehallen, als Fassadenpaneel, in Loggien oder in Haustüren eingesetzt. Die hohen Anschaffungskosten werden hier grundsätzlich angenommen, weil das VIS mit seiner Edelstahlhülle auch eine hohe Dauerhaftigkeit aufweist. Die bezogen auf die Dauerhaftigkeit höherwertige metallische Hülle dieses Vakuumdämmelementes weist jedoch gleichzeitig einen hohen Temperaturendeckungskoeffizienten auf. Bei einer beidseitigen Temperaturbeanspruchung und einem hohen Temperaturgradienten über den Elementquerschnitt kommt es zu einer entgegengesetzten Verformung des Elementes, welche die Funktionalität des Elementes wesentlich beeinträchtigen kann. Die Produktion der Elemente wurde unter anderem nach Auftreten entsprechender Bauschäden zunächst eingestellt. Eine Wiederaufnahme der Produktion der Elemente wird derzeit überarbeitet.

Grundsätzlich gibt es somit zwei Arten von Vakuumdämmelementen für den Einsatz in der Gebäudehülle im opaken Bereich, beide Systeme bergen jedoch bezogen auf Praxistauglichkeit und Dauerhaftigkeit Optimierungspotential.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines alternativen Vakuumdämmelementes beschrieben, das auf den Vorteilen der beiden oben beschriebenen Elemente basieren und sich von deren Nachteilen abheben soll. Neben der Betrachtung der

Wärmebrückeneffekte dieser Elemente wird im Rahmen der Arbeit auch die Dauerhaftigkeit detailliert experimentell untersucht.

Nach einer anfänglichen Einführung in die Problematik und den Stand der Technik werden im zweiten Kapitel der Arbeit der derzeitige Aufbau des VIGS und die damit einhergehenden thermischen Eigenschaften beschrieben. Neben der Auswahl der einzelnen verwendeten Materialien wird hier auch ein thermisch optimierter Randverbund aufgezeigt. Zwecks Aufrechterhaltung eines hochwertigen Vakuums im Innern des Elementes wird eine permeationsdichte Hülle für das VIGS gefordert. Diese muss gerade im Randbereich auch den hohen Anpressdrücken infolge des Atmosphärendrucks sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung standhalten. Der eingesetzte metallische Abstandhalter im Randbereich wird vor dem Hintergrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit in seinem Querschnitt thermisch auf ein Optimum gebracht – der damit verbundene lineare Wärmedurchgangskoeffizient ist dennoch weiterhin um ein Vielfaches größer verglichen mit dem linearen Wärmedurchgangskoeffizienten eines VIP-Fassadenpaneels in einer Pfosten-Riegel-Konstruktion.

Des Weiteren wird der Evakuierungsflansch beschrieben, über den das VIGS anfänglich evakuiert wird und im eingebauten Zustand bei Bedarf re-evakuiert werden kann. Der Deckel des Flansches befindet sich hinter einer Kugel, die den eigentlichen Flansch verschließt. Durch das Abschrauben des Deckels und das Aufschrauben eines Evakuierungsstutzens, kann das Element zwecks anfänglicher Evakuierung oder Re-Evakuiierung im eingebauten Zustand mit einer Vakuumpumpe verbunden werden. Zu diesem Zweck wird die Kugel über einen Magneten weggezogen und öffnet somit das VIGS – das Element kann evakuiert werden.

Die folgenden Kapitel drei bis fünf beziehen sich auf die Dauerhaftigkeit des VIGS. Zunächst wird im dritten Kapitel die Grundlagen zur Dauerhaftigkeit eines Vakuumdämmelementes insbesondere eines VIGS betrachtet. Die drei wesentlichen Transportwege der Gase von der Seite des Atmosphärendrucks in den evakuierten Elementinnenraum werden definiert und auf das VIGS projiziert. Zu unterscheiden sind hier der Stofftransport infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen der einzelnen VIGS-Hüllmaterialien, der Stofftransport infolge von Permeation durch den Festkörper und das Ausgasverhalten der Materialien in das Elementinnere. Während das Ausgasverhalten bei entsprechender vorheriger Reinigung bzw. Behandlung der Elementinnenoberflächen vernachlässigt werden kann, haben Stofftransport durch Diskontinuitäten und Permeation teilweise einen wesentlichen Einfluss. Gemessen werden kann dieser Einfluss mit Hilfe eines Heliumleckdetektors im Rahmen einer integralen Prüfung. Dazu wird das Element bzw. der Versuchskörper einer Heliumatmosphäre ausgesetzt und evakuiert. Über die Heliumatome, die durch

Diskontinuitäten oder infolge von Permeation in das Elementinnere eindringen und dann mit evakuiert werden, wird von dem Heliumdetektor eine Leckagerate ausgegeben.

Die integrale Prüfung variiert in Abhängigkeit des zu untersuchenden Stofftransports. Der Stofftransport durch Diskontinuitäten ist schon durch kurzzeitige Heliumbeaufschlagungen der Elementhülle messbar – die Saugleistung der Pumpe ist hier zumeist so stark, dass der Detektor sehr schnell innerhalb einiger Sekunden einen Anstieg der Leckagerate anzeigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen zur Leckagerate infolge von Diskontinuitäten in den Kontaktflächen „Stahl und Dichtring“ und „Glas und Dichtring“ in Abhängigkeit unterschiedlicher Dichtringeigenschaften durchgeführt. Die Dichtringe unterschieden sich dabei in Art (Aflas[®] und Viton[®]), Dicke (4 mm, 6 mm und 8 mm) und Härte (Shore70, Shore75, Shore80, Shore90). Bei der Untersuchung der Kontaktfläche zum Glas wurde gleichzeitig der Einfluss verschiedener Beschichtungen (Klarglas, Siebdruck, Emaillebeschichtung) betrachtet.

In Zusammenhang mit der Permeation, müssen die Heliumatome erst durch das Material wandern, um in das Elementinnere zu gelangen. Dieser Vorgang dauert länger und die Messkurve hat eine flachere Steigung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Versuchskörper mehrere Stunden der Heliumatmosphäre ausgesetzt, bis sich eine konstante Leckagerate einstellte. Der Dichtring hat gegenüber den anderen VIGS-Hüllmaterialien die schlechtesten Permeationseigenschaften, weshalb nur dieser im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich der Permeation in Abhängigkeit der oben bereits genannten Eigenschaften untersucht wird. Zusätzlich wird hier der Einfluss der Nut, in die der Dichtring im VIGS eingebaut wird, untersucht.

Insgesamt wurden bei diesen Untersuchungen die folgenden Feststellungen gemacht:

- Viton[®] zeigt gegenüber Aflas[®] als Dichtringmaterial bezogen auf den Stofftransport durch Diskontinuitäten und in Form von Permeation unterschiedliche Ergebnisse. Das Leckageverhalten infolge von Diskontinuitäten ist für Viton[®]-Ringe deutlich besser als für Dichtringe aus Aflas[®]. Dahingegen ist das Leckageverhalten infolge der Permeation für beide Materialien ähnlich, wobei die mittlere Leckagerate beider Materialien für Viton[®] geringer ist, weshalb dieses Material auch bevorzugt wird.
- Bezogen auf Leckageraten infolge von Diskontinuitäten und die Eigenschaften der einzelnen Viton[®]-Ringe wurde festgestellt, dass ein zunehmender Ringdurchmesser mit einer zunehmenden Streuung der Messergebnisse und gleichzeitig mit einer zunehmenden mittleren Leckagerate verbunden ist. Gleichzeitig führt eine zunehmende Ringhärte ebenfalls zu einer zunehmenden Streuung der Leckagerate und damit zu einer zunehmenden mittleren Leckagerate.

- Bezogen auf Leckageraten infolge von Permeation und die Eigenschaften der einzelnen Viton®-Ringe wurde festgestellt, dass ein zunehmender Ringdurchmesser mit einer abnehmenden mittleren Leckagerate verbunden ist. Gleichzeitig führt eine zunehmende Ringhärte ebenfalls zu einer abnehmenden mittleren Leckagerate.
- Bezogen auf beide Stofftransporte wurde festgestellt, dass sich die Viton®-Ringe mit den Eigenschaftskombinationen 8 mm und Shore80, 4 mm und Shore90 sowie 6 mm und Shore90 nicht in das oben aufgezeigte Verhalten einpassen. Die Ringe verhalten sich im Vergleich kontrovers.
- Bezogen auf Leckageraten infolge von Diskontinuitäten und Stahldeckschichten heben sich die Kombinationen aus einem 4 mm dicken Viton®-Ring der Härte Shore75, einem 6 mm dicken Viton®-Ring der Härte Shore75 und einem 6 mm dicken Viton®-Ring der Härte Shore80 von den übrigen Ringeigenschaften bzw. Beschichtungen ab. Die Messergebnisse liegen dabei deutlich unter der geforderten Leckagerate – ohne Berücksichtigung der Permeation wären somit Dauerhaftigkeiten von mehr als 25 Jahren möglich.
- Bezogen auf Leckageraten infolge von Diskontinuitäten bei variierender Glasdeckschicht heben sich die Kombinationen aus einem 6 mm dicken Viton®-Ring der Härte Shore75 mit entweder einem Klarglas oder einem siebbedruckten Glas als Deckschichten von den übrigen Ringeigenschaften bzw. Beschichtungen ab. Die Messergebnisse liegen dabei deutlich unter der geforderten Leckagerate – ohne Berücksichtigung der Permeation wären somit Dauerhaftigkeiten von mehr als 25 Jahren möglich.
- Bezogen auf Leckageraten infolge von Permeation halten die hier betrachteten Dichtringe die erforderliche Leckagerate für eine 25-jährige Dauerhaftigkeit von Dämmstoffen nicht ein.
- Durch das Einbringen des Dichtrings in eine Nut kann die Leckagerate infolge von Permeation um 25% reduziert werden.
- Die Geometrie der Nut hat hier keinen wesentlichen Einfluss auf die Leckagerate infolge von Permeation – wichtig ist, dass der Ring mehr als 2 mm aus der Nut heraus ragen muss, damit bei Zusammenpressen des Rings nicht die Deckschichten des Versuchskörpers bzw. die Deckschicht und der Stahlrahmen in Kontakt treten und damit das Anpressen des Dichtrings verhindern.

Die Umrechnung der maßgebenden Leckagerate infolge von Permeation auf die Dauerhaftigkeit führt zu einer Lebenserwartung des kleinformatischen VIGS von vier Jahren. In Abhängigkeit der Elementgröße wächst die Dauerhaftigkeit bei einer Elementgröße von 2,00 x 2,50 x 0,04 m auf zwölf Jahre.

Die so ermittelte Dauerhaftigkeit für das VIGS mit dem in dieser Arbeit dargestellten Aufbau ist somit nicht praxistauglich. Die Elemente halten die geforderte Dauerhaftigkeit für Dämmstoffe von 25 Jahren auch mit großen Abmessungen nicht ein.

Um das VIGS praxistauglich zu gestalten, ist es folglich sinnvoll, weiterführende Untersuchungen zur Reduzierung der Permeation im Randbereich durchzuführen. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise eine sekundäre Dichtung im Randbereich zu untersuchen – die in eine Demonstrationsfassade eingesetzten VIGS wurden zusätzlich mit einer Butyldichtung über den gesamten Randbereich abgedichtet. Des Weiteren sollte eine zweilagige Dichtreihe in der Nut untersucht werden.

Vor dem Hintergrund der druckabhängigen Dichteigenschaft des Vitons® ist zudem der Einfluss des Anpressdrucks noch genauer zu untersuchen. Hier kann es gegebenenfalls erforderlich werden, das VIGS ringsum in einem Rahmen einzuspannen. Gleichzeitig würde dadurch das Abheben der Deckschichten im Rand- und insbesondere im Eckbereich reduziert. Diese Einspannung muss nicht metallisch sein, der Einsatz von Carbon wäre hier denkbar. Zudem würde dieses Material den Randbereich des VIGS noch einmal abdecken und den Stofftransport durch den Randverbund weiter reduzieren.

Ergänzt werden sollten diese Ansätze durch den Einsatz eines Getters – wie von den VIP bereits bekannt. Das Gettermaterial hat die Aufgabe, Moleküle aufzunehmen und zu binden, so dass ein Druckanstieg im Elementinnern verhindert bzw. verzögert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Willems, W.; Skottke, T.; Wies, W.; Galla, A.: Entwicklung großformatiger Vacuum Insulated Glass Sandwiches (VIGS) einschließlich Produktions- und Anwendungstechniken
Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Dortmund 2015
- [2] DIN EN ISO 572-1: Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften
Berlin: Beuth Verlag, 06.2016, Seite 8
- [3] CHEMIE.DE Information Service GmbH (Online Zitat vom 25.5.2016)
URL: <http://www.chemie.de/lexikon/Ausdehnungskoeffizient.html>
- [4] Jousten, K.: Werkstoffe – Werkstoffe der Vakuumtechnik
in Wutz Handbuch Vakuumtechnik – Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien, Wiesbaden 2013, Seite 775 ff.
- [5] DIN EN 12150-1: Glas im Bauwesen – Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas – Teil 1: Definition und Beschreibung
Berlin: Beuth Verlag, 12.2015, Seite 12ff.
- [6] DVS M 2713: Schweißen von Titanwerkstoffen / Werkstoffe – Prozesse – Fertigung – Prüfung und Bewertung von Schweißverbindungen
DVS Verband, Düsseldorf 04.2016
- [7] CHEMIE.DE Information Service GmbH (Online Zitat vom 25.5.2016)
URL: <http://www.chemie.de/lexikon/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit.html>
- [8] Fahrenwaldt, H. J.: Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung
Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 3. Auflage, Wiesbaden 2009
- [9] VIP-BAU.DE – die deutsche Internetplattform zu evakuierten Wärmedämmstoffen (Online vom 25.5.2016)
URL: http://www.vip-bau.de/d_pages/technik/vip/funktionsweise.htm
- [10] Brockhoff, E.: Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften eines Vacuum Insulated Glass Sandwiches (VIGS) unter Biegebeanspruchungen
unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Dortmund, Dortmund 2013
- [11] DIN EN 16612: Glas im Bauwesen - Bestimmung des Belastungswiderstandes von Glasscheiben durch Berechnung und Prüfung
Berlin: Beuth Verlag, 06.2013, Seite 21

- [12] DIN Arbeitsausschuss Vakuumisulationspaneele
- [13] Lambda Messtechnik GmbH Dresden (Online 25.5.2016)
URL: <http://www.lambda-messtechnik.de/de/waermeleitfaehigkeitsmessgeraet-lambda-meter-ep500e.html>
- [14] DIN 52612: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät
Berlin: Beuth Verlag, 09.1979, Seite 4
- [15] Willems, W.; Skottke, T.: Einsatz von Vakuum-Sandwichelementen in der Gebäudehülle
Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Dortmund 2011
- [16] DIN EN ISO 10211: Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnung
Berlin: Beuth Verlag, 04.2008
- [17] EN ISO 10077-2: Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen
Berlin: Beuth Verlag, 06.12
- [18] EN ISO 12631: Wärmetechnisches Verhalten von Vorhangfassaden – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten
Berlin: Beuth Verlag, 001.2013
- [19] Webaufttritt des Anbieters infomind GmbH: flixo pro (Online 25.5.2016)
URL: <http://www.flixo.de/de/products/flixo-pro/>
- [20] RAICO Bautechnik GmbH: Therm Alu – Alu Systemschnitte, 2011 (Online 25.5.2016)
URL:
http://www.raico.de/assets/web/PDFs/Download/Deutsch/Kataloge/THERM/THERM%20Alu/05_K_2011_ALU_Systemschnitte_A-V.pdf
- [21] RAICO Bautechnik GmbH: Grundlagen Fassadensysteme Therm+, 2011 (Online 25.5.2016)
URL:
http://www.raico.de/assets/web/PDFs/Download/Deutsch/Kataloge/THERM/THERM%20Stahl/01_PL_THERM_Stahl_S-I_2016_SysSchnitte.pdf
- [22] RAICO Bautechnik GmbH (Online 25.5.2016)
URL: <http://www.raico.de/de/Produkte/THERM.php>

- [23] VIP-BAU.DE – die deutsche Internetplattform zu evakuierten Wärmedämmstoffen
(Online vom 25.5.2016)
URL: http://www.vip-bau.de/pdf/demoobjekte/erlenbach_d.pdf
- [24] Jitschin, W.: Gasströmung durch Öffnungen und Leitungen
Vakuum in Forschung und Praxis, Nr. 3, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim 1998,
Seite 226 ff.
- [25] Große Bley, W.: Lecksuchtechniken - Überblick
in Wutz Handbuch Vakuumtechnik, K. Jousten, Vieweg+Teubner Verlag | Springer
Fachmedien, Wiesbaden 2013, Seite 923 ff.
- [26] Ehrlich, C. D.: A note on Flow Rate and Leak Rate Units
Journal of Vacuum Science & Technology A, 1986
- [27] Jitschin, W.: Strömung von Gasen – Strömungsarten, Begriffsdefinitionen
in Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Jousten, K., Vieweg+Teubner Verlag | Springer
Fachmedien, Wiesbaden 2013, Seite 84 f.
- [28] Große Bley, W.: Lecksuchtechniken – Eigenschaften von Lecks
in Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Jousten, K., Vieweg+Teubner Verlag | Springer
Fachmedien, Wiesbaden 2013, Seite 930
- [29] Müller, K.: Permeation durch Kunststoffe
veröffentlichte Dissertation, TU München 07.2003, Seite 4
- [30] Beckmann, W.; Seider, M. H.: Gasdurchlässigkeit von gummielastischen Werkstoffen
für Stickstoff
in Kolloid-Zeitschrift & Zeitschrift für Polymere; Band 220, Heft 2, Oktober 1967
- [31] Jousten, K. J.: Werkstoffe – Gasdurchlässigkeit und Gasabgabe von Werkstoffen
in Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Jousten, K., Vieweg+Teubner Verlag | Springer
Fachmedien, Wiesbaden 2013, Seite 791 ff.
- [32] Veldkamp, M.: Bauelemente der Vakuumtechnik und ihre Verbindungen
in Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Jousten, K. J., Vieweg+Teubner Verlag | Springer
Fachmedien, Wiesbaden 2013, Seite 820 ff.
- [33] Henglein, A.; Gutierrez, M. J.: Journal of Physical Chemistry 97, 158, 1993
- [34] Jones, A. W.; Jones, E.; Williams, E. M.: Investigation by techniques of electron
stimulated desorption of the merits of glow discharge cleaning of the surfaces of
vacuum chambers at the CERN intersecting storage ring
Vacuum, Volume 23, Issue 7, 1973, Seiten 227-230

- [35] Vigh, J. R.: UV/ozone cleaning of surfaces
Journal of Vacuum Science and Technology A 3, 1985, Seiten 1027-1034
- [36] Sherman, R.; Grob, J.; Whitlock, W.: Dry Surface cleaning using CO₂ snow
Journal of Vacuum Science and Technology B 9, 1991, Seiten 1970-1977
- [37] Tuzi, Y.; Kurokawa, Y.; Takeuchi, K.: Effect of bake-out on the adsorption kinetics of gases in a vacuum chamber
Vacuum, Volume 44, Issues 5-7, 1993, Seiten 447-449
- [38] Westerberg, L.; Hjörvarsson, B.; Wallén, E.; Mathewson, A.: Hydrogen content and outgassing of air-baked and vacuum fired stainless steel
Vacuum, Volume 48, Issues 7-9, 1997, Seiten 771-773
- [39] Van Os, T.: Ceramic Bead Blasting vs. Glass Bead Blasting
Vecom Group, Technisches Merkblatt Nummer 2005/07, 2005
- [40] Bornmyr, A.; Holmberg, B.: Handbook for the pickling and cleaning of stainless steel
Avesta Polarit Welding, 1995
- [41] Kao, P. S.; Hocheng, H.: Optimization of electrochemical polishing of stainless steel by grey relational analysis
Journal of Materials Processing Technology, Volume 140, Issues 1-3, 2003, Seiten 255-259
- [42] Webaufttritt des Anbieters plasotec GmbH (Online 25.5.2016)
URL: www.plasotec.de
- [43] Webaufttritt des Anbieters Pfeiffer Vakuum:
URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/produkte/drehschieberpumpen/zweistufig/duoline/duo-20-m/?detailPdold=1915>
- [44] DIN 28400-2: Vakuumtechnik – Benennung und Definitionen – Teil 2: Vakuumpumpen
Berlin: Beuth Verlag, 10.1980, Seite 4.
- [45] Jousten, K.; Lachenmann, R.; Jünemann, A.; Friedrichsen, U.; Lippelt, E.; Kossek, B.: Verdrängerpumpen – Einwellige Rotationsverdrängerpumpen
in Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Jousten, K., Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien, Wiesbaden 2013, Seite 291
- [46] Müller, N.; Ellefson, R.; Jousten, K.; Große Bley, W.: Partialmessgeräte und Leckdetektoren – Leckdetektoren
in Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Jousten, K., Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien, Wiesbaden 2013, Seite 696 ff.

- [47] DIN EN 1779: Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung – Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und –verfahren
Berlin: Beuth Verlag, 10.1999
- [48] DIN EN 1330-8: Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 8: Begriffe für die Dichtheitsprüfung
Berlin: Beuth Verlag, 07.1998
- [49] Große Bley, W.: Lecksuchtechniken – Lecksuchverfahren mit Heliumleckdetektors in Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Jousten, K., Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien, Wiesbaden 2013, Seite 943 ff.
- [50] DIN 53536: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung der Gasdurchlässigkeit
Berlin: Beuth Verlag (10.92)
- [51] Pfeiffer Vacuum GmbH: Know-how Book
in 'The Vacuum Technology Book', Volume II, Band 2, 2013; Seite 38

Tanja Skottke

Vakuumdämmelemente mit Glasdeckschichten

Im Zuge der Verschärfung der Energieeinsparvorgaben werden die primärenergetischen Anforderungen für neu zu errichtende Gebäude im Vergleich zum Status quo stets weiter erhöht. Der Primärenergiebedarf eines Gebäudes wird neben der Anlagentechnik von der thermischen Ausführung der Gebäudehülle bestimmt. Der Dämmung des Gebäudes kommt somit eine zentrale Bedeutung zu: Die zukünftigen energetischen Anforderungen führen zu einer weiteren Erhöhung der aktuell erforderlichen Dämmschichtdicken oder zu der Notwendigkeit hochdämmender Materialien wie beispielsweise der Vakuumdämmung. Die Vakuumelemente Vacuum Insulated Panel (VIP) und Vacuum Insulating Sandwich (VIS) stellen den derzeitigen wissenschaftlichen und technischen Status quo der Hochleistungsdämmmaterialien dar.

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung eines alternativen Vakuumdämmelementes beschrieben: Das Vacuum Insulated Glass Sandwich (VIGS) besteht aus zwei Glasdeckschichten, einem dazwischen liegenden Stützkern aus pyrogener Kieselsäure und einem umlaufenden Abstandhalter. Neben der Entwicklung ist das wesentliche Thema der Arbeit die experimentelle Untersuchung der Dauerhaftigkeit. Untersucht werden vor diesem Hintergrund die Permeationseigenschaften der einzelnen Hüllmaterialien sowie der Stofftransport durch Fehlstellen in deren Kontaktflächen am VIGS.

ISBN 978-3-8167-9906-1

