

Harald Beese, Wulf Grählert, Susann Schulz

**Entwicklung von
Permeationsmesstechnik zur
Bestimmung der für Vakuum-
Isolations-Paneele (VIP) kritischen
Gasdurchlässigkeit**

F 2896

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9237-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Abschlussbericht

Forschungsinitiative Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS),

Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-11.2 / II 3

Projektlaufzeit: 01. 07. 2011 bis 31. 07. 2013

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

In Zusammenarbeit mit FIW (München) und VARIOTEC GmbH & Co. KG (Neumarkt)

Entwicklung von Permeationsmesstechnik zur Bestimmung der für Vakuum- Isolations-Paneele (VIP) kritischen Gasdurchlässigkeit

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer

Projektleiter:

Dipl. Ing. Harald Beese

Telefon: 0351/ 83391 3356

Telefax: 0351/ 83391 3300

E-mail: harald.beese@iws.fraunhofer.de

Mitarbeiter:

Dr. Wulf Grählert

Susann Schulz

Fraunhofer-Institut
Werkstoff- und Strahltechnik
Winterbergstraße 28
D-01277 Dresden

Juni 2013

Inhalt

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Aufgabenstellung und Zielsetzung | 5 |
| 3 | Grundlagen | 7 |
| 3.1 | VIP | 7 |
| 3.2 | Gasdurchlässigkeit | 9 |
| 3.3 | Prinzipieller Aufbau von Permeationsmesssystemen | 13 |
| 3.4 | Einteilung der Permeationsmessverfahren | 15 |
| 3.5 | Stand der Permeationsmesstechnik | 16 |
| 3.6 | Internationale Normen zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit | 17 |
| 3.7 | Wärmebrückenberechnung | 18 |
| 4 | Material und Methoden | 22 |
| 4.1 | Auswahl Testverfahren | 22 |
| 4.2 | Aufbau des Messsystems | 25 |
| 4.3 | Durchführung der Messung und Messkurveninterpretation | 29 |
| 4.4 | Folienscreening | 33 |
| 4.5 | Ermittlung der Wärmebrückeneffekte der Paneelränder mit den untersuchten Folien | 35 |
| 5 | Permeationsmessung | 38 |
| 5.1 | Vergleich WDD ausgewählter Folien | 38 |
| 5.2 | Durchbruchmessungen | 39 |
| 5.3 | Temperaturabhängigkeit der WDD | 41 |
| 5.4 | Thermische Alterung | 41 |
| 5.5 | Mechanische Beanspruchung | 46 |
| 6 | Siegelnahtmessung | 52 |
| 7 | Ermittlung der Wärmebrückeneffekte der Paneelränder mit den untersuchten Folien | 58 |
| 8 | Rückschlüsse auf den Druckanstieg im VIP und die Wärmeleitfähigkeit | 62 |
| 9 | Zusammenfassung | 67 |
| 10 | Ausblick | 69 |
| 11 | Formelverzeichnis | 70 |
| 12 | Literaturverzeichnis | 72 |
| 13 | Anhang | 75 |

1 Einleitung

Vakuum-Isolationspaneele (VIP) sind aufgrund ihrer hocheffizienter Wärmeisolierung und geringem Platzbedarf sowohl für den Neubau als auch für die Bausanierung hochattraktive Komponenten. Die Langzeitstabilität der VIP wird maßgeblich von den Barriereigenschaften der verwendeten Materialien bestimmt. Bereits geringe Gaspermeation durch die verwendeten Folien oder Siegelnähte verursachen einen Druckanstieg im VIP, wodurch sich dessen Wärmedämmwirkung signifikant verschlechtert. Eine für Bauwerke typischerweise geforderte Lebensdauer von 30 bis 50 Jahren bedingt zwangsläufig die Verwendung von Materialien mit einer extrem geringen Gaspermeationsrate. Für eine diesbezüglich gezielte Material- und Technologieentwicklung ist der Einsatz einer präzisen und hochempfindlichen Messmethodik unabdingbar.

Derzeit praktizierte Untersuchungen zu den Langzeiteigenschaften von VIPs hinsichtlich deren Wärmeleitfähigkeit konzentrieren sich auf den Vergleich der Wärmeleitfähigkeit fertig prozessierter VIPs im frischen und im künstlich gealterten Zustand. Dadurch wird zwar der Einfluss der Gaspermeation durch die Folie bzw. durch die Siegelnähte auf die Wärmedämmwirkung des VIP berücksichtigt, eine direkte Bestimmung der Permeationsraten von Folie und Naht selbst erfolgt derzeit jedoch nicht. Vor allem während der Entwicklung und Erprobung verschiedener Barrierefolien und Siegelnahtausbildungen ist die derzeitige Alterungsmessung am fertigen Paneel zeit- und kostenintensiv. Für die Beurteilung einer großen Variantenvielfalt an Folien und Siegelnähten (und damit die Identifizierung der am besten geeigneten Materialien und Herstellungsprozesse, und somit für die gezielte, zuverlässige Weiterentwicklung der VIPs) ist ein Messverfahren erforderlich, mit dem ohne zeitaufwendige Bauteilprüfungen das zu erwartende Langzeitverhalten des ganzen VIP-Panels vorab beurteilt werden kann.

Im Mittelpunkt des Forschungsvorhabens steht die Messung der Wasserdampfpermeationsrate von VIP-Folien und Siegelnähten auf Basis eines speziell für diese Materialien angepassten Permeationsmesssystems sowie deren Korrelation mit dem Aufbau (Schichtenfolge, Schichtdicken etc.) der Barrierefolien und der Siegelnähte. Anhand der Korrelation der Permeationseigen-

schaften mit dem festgestellten Langzeitverhalten (Alterung) der daraus hergestellten VIP-Paneele sollen VIP-Qualitätsparameter abgeleitet werden.

Die Leistungsfähigkeit des am Fraunhofer IWS entwickelten Permeationsmesssystems erlaubt die präzise und effiziente Bestimmung der für VIP spezifizierten Permeationsraten bzgl. Feuchte, die sogenannte Wasserdampfpermeationsrate (Water Vapor Transmission Rate, WVTR; Wasserdampfdurchlässigkeit, WDD). Daraus lassen sich unmittelbar eine Bewertung des derzeitigen IST-Stands sowie die Identifizierung kritischer Parameter in der derzeit verwendeten Fertigungskette ableiten. Diese Kenntnisse ermöglichen der in das Vorhaben involvierten Firma (Verarbeiter der VIP-Folie, Hersteller der VIPs) eine gezielte Optimierung des Herstellungsprozesses und der dabei verwendeten Materialien. Die VIP-Qualität, das bedeutet die VIP Lebensdauer, kann erhöht und vor allem abgesichert werden. Der im Vorhaben generierte Kenntniskern bzgl. der Abhängigkeit der VIP-Qualität von der Materialqualität, Verarbeitungsqualität und Verarbeitungstechnologie soll einen wesentlichen Beitrag zu Erhöhung der Marktattraktivität des innovativen Baustoffes leisten.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll die Wasserdampfpermeationsrate verschiedener kommerziell verfügbarer und für VIP- Anwendungen geeigneter Barrierefolien bestimmt werden. Als Grundlage soll die am Fraunhofer IWS entwickelte Messtechnik auf Basis der Laserdiodenspektroskopie dienen. Diese bietet hinsichtlich der Nachweisgrenze (Wasserdampfdurchlässigkeit $WDD < 10^{-4} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) im Vergleich zu derzeit am Markt erhältlichen Messtechniken einen signifikanten Vorteil, da der Messbereich der Permeationsrate den für VIP-Anwendungen geforderten abdecken kann. Barrierefolien können unter Verwendung eines am Fraunhofer IWS aufgebauten Prototyps untersucht und deren Permeationsrate bestimmt werden. Die Prüfung soll bei für VIP-Anwendungen üblicherweise auftretenden Temperaturen und relativen Feuchten erfolgen.

Bestandteil der Untersuchungen soll weiterhin das Alterungsverhalten der Barrierefolien sein. Dazu sollen die ausgewählten Barrierefolien beschleunigt gealtert und in periodischen Abständen gemessen werden.

Während der Verarbeitung der Barrierefolien und beim Einsatz der VIPs kommt es zur mechanischen Beanspruchung der Folien. Da sich aufgrund von Beschädigungen die Permeationsraten deutlich von denen der Ausgangsfolien unterscheiden können, sollen neben der Wasserdampfdurchlässigkeit der Rohfolien auch die Wasserdampfdurchlässigkeit definiert beanspruchter Folien untersucht werden.

Eine zentrale Aufgabe im Projekt stellt die Charakterisierung der Siegelnaht hinsichtlich der Wasserdampfpermeation dar. Da sich die Standardmesstechnik für flache Substrate für diese Aufgabe nicht eignet, ist ein geeigneter Messadapter zu entwerfen, aufzubauen und zu testen. Zur Unterscheidung des Einflusses der Flächenpermeation und der Permeation durch die Siegelnähte ist der Anteil der Siegelnahtfläche zur Gesamtprobenfläche hinreichend zu maximieren. Die zu entwickelnde Dichtungsstrategie muss dabei zuverlässig den durch die Siegelnaht entstehenden Verzug sowie unterschiedliche Materialstärken kompensieren, sodass durch die Einspannung der Prüfkörper keine signifikanten Lecks entstehen, die dann die eigentliche Wasserdampfpermeation überlagern. Ziel der Siegelnahtuntersuchungen ist die Ermittlung der Permeationsrate von Siegelnähten in Abhängigkeit von der Siegelnahtlän-

ge für die ausgewählten Folien. Entsprechende Prüfkörper werden durch die Firma VARIOTEC GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt.

Parallel werden die Wärmebrückeneffekte der verschiedenen Folienaufbauten im Randbereich der VIPs durch zweidimensionale Berechnung ermittelt und deren Einfluss auf den Wärmedurchlasswiderstand des Vakuumpaneels beurteilt. Anhand des erarbeiteten Datenmaterials werden Strategien für optimierte VIP-Materialien und Fertigungstechnologien abgeleitet.

Die nachstehende Abbildung zeigt das abgestimmte Vorgehen im Rahmen des Vorhabens mit den oben beschriebenen Arbeitspaketen sowie die Aufgabenverteilung im Konsortium.

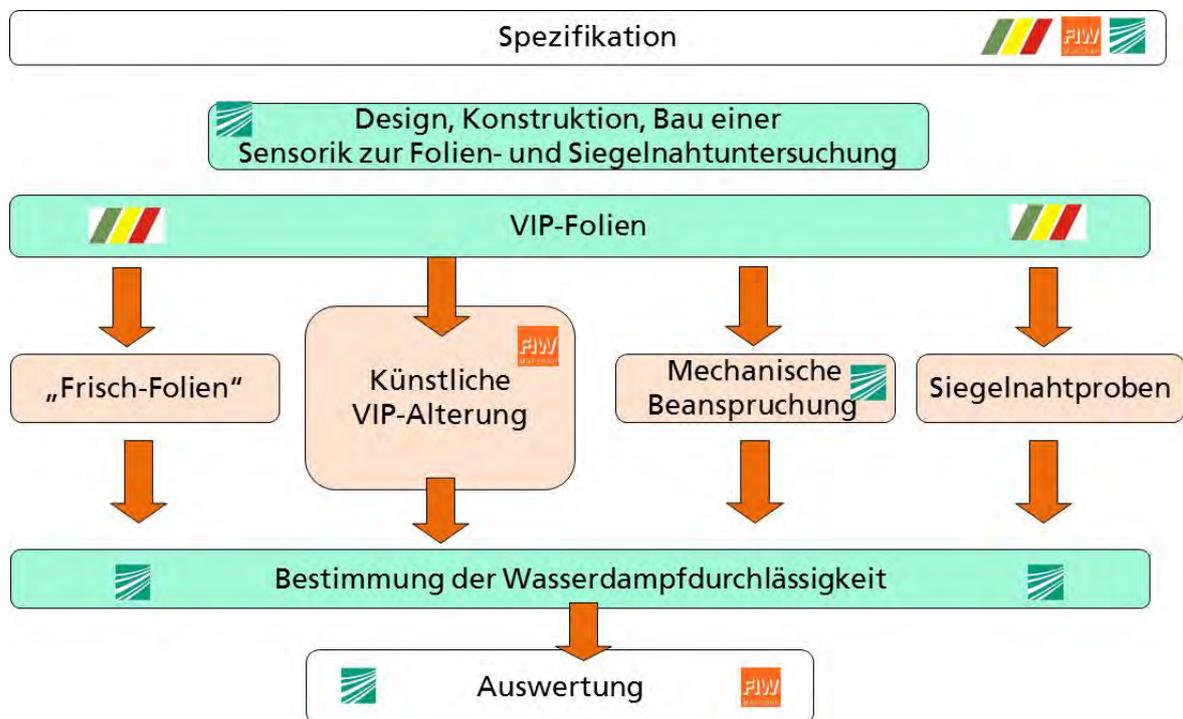


Abbildung 1: Projektstruktur und Aufgabenverteilung im Konsortium

3 Grundlagen

3.1 VIP

Das Prinzip der Vakuumdämmung ist durch den Physiker James Dewar seit 1893 bekannt und wird z.B. bei einer Thermoskanne genutzt. Diese besteht aus einem doppelwandigen verspiegelten Gefäß, dessen Zwischenraum auf einen Druck unterhalb 10^{-5} mbar evakuiert wird. Durch die geringe Anzahl an Gasmoleküle stoßen diese nicht mehr gegeneinander, sodass der Wärmetransportmechanismus der Konvektion nahezu unterbunden ist. Weiterhin wird der Wärmetransport durch Strahlung durch hoch reflektierende Oberflächen mit geringem Emissionsgrad minimiert. Über den Behälterrand, der zur mechanischen Stabilität benötigt wird, verbleibt ein geringer Wärmetransport. Vakuumisolationspaneele nutzen für die benötigte mechanische Stabilität statt eines massiven Behälterrandes einen offenporigen Stützkern, der die mechanischen Kräfte, verursacht durch den Druckunterschied und die Masse der zu isolierenden Körper, aufnehmen kann. Dieser Kern besteht z.B. aus faserverstärkter pyrogener Kieselsäure und ist von einem Polyestervlies und einer Barrierefolie umgeben.

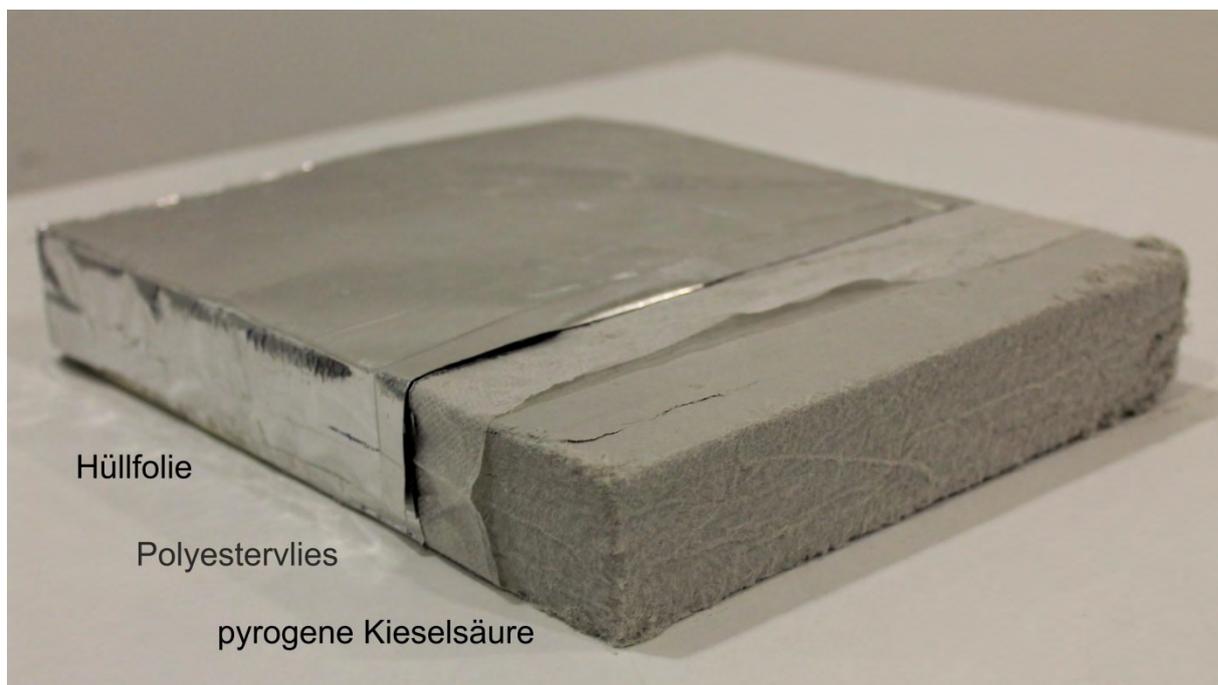


Abbildung 2: Vakuumisolationspaneel

VIP mit einem solchen Aufbau erreichen Wärmeleitfähigkeiten von $0,005 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Tabelle 1).

Tabelle 1: Spezifische Wärmedämmkosten verschiedener Dämmstoffe [1], VIP 1 und VIP 2 zeigen einen oberen bzw. unteren λ -Werte gegenwärtig verfügbarer VIP

| Material | WD-Kosten e_{WD} [Fr/m ³] | Leitfähigkeit λ [W/mK] | Kosten pro Wärmedurchlasswiderstand $K_{\text{R, spez}}$ [Fr/(m ² K/W)] |
|-------------------------------|---|---|---|
| Glasfaserplatten 40 kg | 203 | 0,033 | 6,70 |
| Steinwolle 35 kg | 115 | 0,040 | 4,60 |
| Steinwolle 100 kg | 250 | 0,040 | 10,00 |
| EPS 30 kg | 198 | 0,035 | 7,00 |
| XPS 33 kg | 520 | 0,034 | 17,70 |
| PU | 322 | 0,028 | 9,00 |
| Kork ca. 130 kg | 460 | 0,042 | 19,30 |
| Holz-Weichfaserplatten 150 kg | 230 | 0,040 | 9,20 |
| Zellulosefüllung ca. 50 kg | 180 | 0,040 | 7,20 |
| Schaumglas 130 kg | 616 | 0,040 | 24,60 |
| VIP 1 | 2.000 | 0,015 | 30,00 |
| VIP 2 | 2.000 | 0,005 | 10,00 |

Detaillierte Berechnungsgrundlagen von Wärmetransportmechanismen in VIP können unter [2] oder [3] gefunden werden

3.2 Gasdurchlässigkeit

Der durchgelassene Stoffmengenstrom \dot{n} wird in der Regel auf eine Probenfläche A normiert. Bei Wasserdampf wird diese Stoffmengenstromdichte als Wasserdampfdurchlässigkeit (WDD_t) bzw. Gasdurchlässigkeit bezeichnet und gibt die Stoffmenge n eines Gases, eines Dampfes oder einer Flüssigkeit an, die in einer definierten Zeitspanne Δt einen Festkörper durchdringt. Angegeben wird stets die Durchlässigkeit für den stationären Zustand ($t \rightarrow \infty$). Der im Englischen als Water Vapor Transmission Rate (WVTR) mit der SI-Einheit $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bezeichnet.

$$WDD_t = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{A \cdot \Delta t} = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}}{A} = \frac{WDD}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (3.1)$$

Für technische Anwendungen wird die Wasserdampfdurchlässigkeit (WDD) als Massenstromdichte mit der Einheit $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ angegeben. Gasdurchlässigkeiten können ohne Kenntnisse des Probenaufbaus bestimmt werden. Sie sind daher immer abhängig von der jeweiligen Probe und den vorliegenden Messbedingungen.

Gasdurchlässigkeiten sind nur bei gleichen Messbedingungen direkt miteinander vergleichbar. Die anzugebenden Messbedingungen sind der Prüfgaspartialdruck auf beiden Seiten der Probe und die Temperatur. Der Wasserdampfpartialdruck wird in der Praxis oft indirekt als relative Feuchte angegeben und bezieht sich damit immer auf die Messtemperatur. Eine Temperaturerhöhung um 10 K führt in etwa zu einer Verdopplung des Wasserdampfpartialdruckes und somit zu einer höheren WDD der Probe. Für Wasserdampfdurchlässigkeitsmessungen wird deshalb mindestens eine Temperaturkonstanz von ± 1 K gefordert.

Ein Großteil der bei der Permeationsmessung zu untersuchenden Proben besteht aus Materialverbunden eines Polymersubstrates mit einer oder mehreren dünnen anorganischen Schichten eines Metalls oder Metalloxids im Wechsel mit anorganischen Schichten. Metalle gelten, außer gegenüber Wasserstoff, als undurchlässig gegenüber Gasen und Dämpfen. Ihre dünnen Schichten lassen sich jedoch auf großen Flächen nicht fehlerfrei herstellen. Der Transport des Prüfgases durch diese Festkörper erfolgt durch verschiedene Mechanismen der Konvektion und der Diffusion. Abbildung 3 zeigt für die Gasdurchlässigkeit relevante Transportmechanismen. Abgesehen von der Lö-

sungsdiffusion (g) benötigen die dargestellten Transportmechanismen Kanäle in Form von durchgehenden Poren, Kapillaren oder Fehlstellen.

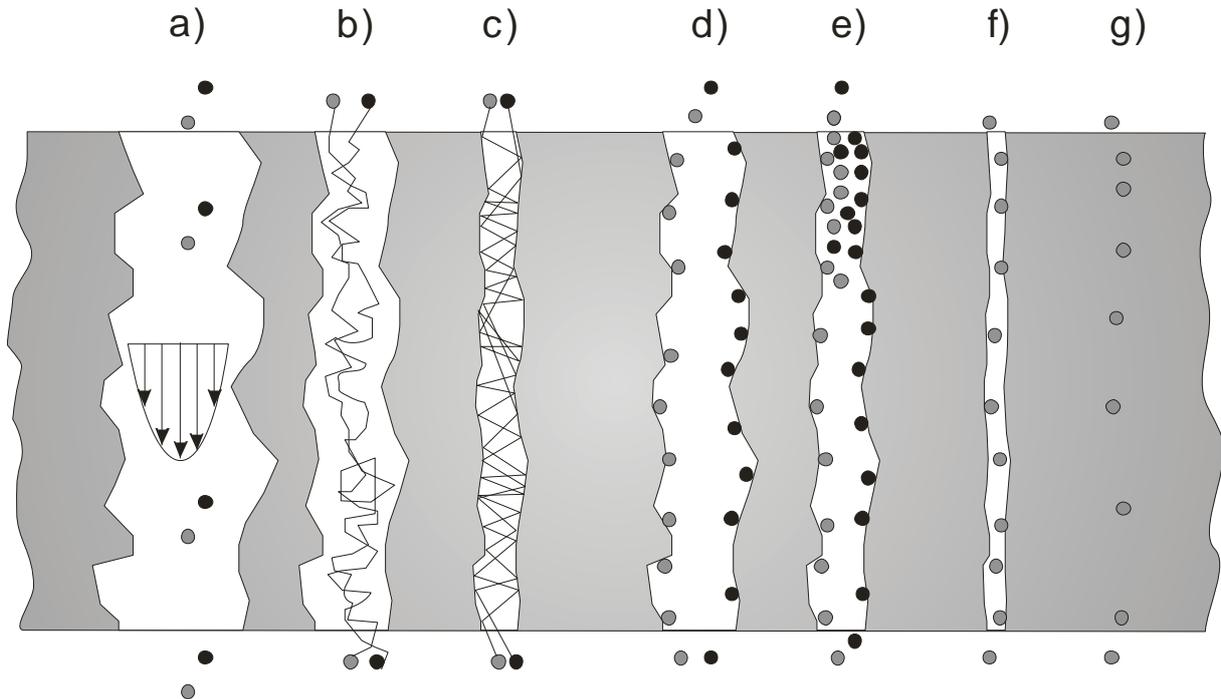


Abbildung 3: Stofftransportmechanismen durch Festkörper, a) laminarer Fluss, b) molekulare Diffusion, c) Knusenddiffusion, d) Oberflächen diffusion, e) Stofftransport durch Kapillarkondensation, f) Konfigurable Diffusion, g) Lösungsdiffusion

Die Mechanismen der Gasdurchlässigkeit werden häufig mit den Begriffen Permeation und Leck zusammengefasst, wobei deren Abgrenzung nicht ganz eindeutig ist. Mit Permeation wird in der Regel ein Stofftransport aufgrund von Diffusion, oft sogar nur der Stofftransportmechanismus der Lösungsdiffusion bezeichnet. Als Leck wird dagegen sowohl der Stofftransport aufgrund von turbulenter und laminarer Strömung, als auch der diffusive Transport durch Poren und sogar das Ausgasen von Flüssigkeiten sogenannten „virtuellen Lecks“ beschrieben. Der Stofftransport durch Lösungsdiffusion zählt allgemein nicht zu den Lecks.

Unabhängig vom Messverfahren bestimmt die Gasdurchlässigkeitsprüfung zunächst nur die Stoffmengenstromdichte (Gleichung) bzw. die Massenstromdichte (z.B. WDD). Aus ihnen lassen sich mit der Dicke der Probe l weitere Kenngrößen wie der Permeationskoeffizient P und die Permeance \mathbf{P} ableiten:

$$P = \mathbf{P} \cdot l = \frac{WDD \cdot l}{\Delta p} \quad (3.2)$$

Der Permeationskoeffizient ist eine stoffspezifische Größe und lässt sich nur für isotrope Proben, deren Durchlässigkeit ausschließlich auf dem Mechanismus der Lösungsdiffusion beruht, berechnen. Im Gegensatz zur Bestimmung

der WDD muss demzufolge für die Bestimmung des Permeationskoeffizienten der Probenaufbau bekannt sein. Polymere ohne makroskopische Fehlstellen beispielsweise sind isotrop und für Wasserdampf löslich, sodass für sie ein Permeationskoeffizient ermittelt werden kann. Dagegen sind beschichtete Polymere anisotrope Verbundwerkstoffe, für die aufgrund der unterschiedlichen auftretenden Transportmechanismen eine Bestimmung des Permeationskoeffizienten unzulässig ist. Eine Verdopplung der Probendicke (Substrat und Barrierschicht) resultiert hier nicht zwangsläufig in einer Halbierung der Durchlässigkeit.

Abgesehen vom Stofftransport durch Strömung, welcher für die Anwendung bei VIP aufgrund der hohen Gasdurchlässigkeit ausgeschlossen werden muss, basieren die Transportmechanismen b) bis g) auf Diffusion. Hier kann in erster Näherung von einer Proportionalität von Partialdruckgradient und der Gasdurchlässigkeit ausgegangen werden, weshalb eine Normierung auf den Partialdruckunterschied und damit die Bestimmung der Permeance zulässig ist.

Eine weitere Permeationskenngröße, der Diffusionskoeffizient, kann aus dem zeitlichen Verlauf eines Durchbruchexperimentes des Permeaten durch die Probe abgeleitet werden. Ausgehend vom 2. Fick'schen Gesetz,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

welches die zeitliche und örtliche Beziehung von Konzentrationsunterschieden beschreibt, leitet Barrer [4] folgenden Zusammenhang für die Permeation in ein geschlossenes Gefäß her:

$$D = \frac{l^2}{6 \cdot \Theta} \quad (3.4)$$

Vorausgesetzt wird dabei, dass zum Zeitpunkt $t = 0$ kein Permeat in der Probe gelöst und zu allen Zeitpunkten die Konzentration auf der Permeatenseite viel kleiner als die Konzentration auf der Prüfgasseite ist. Die Durchbruchzeit Θ ergibt sich dann aus der Differenz der Zeit zwischen der Prüfgaszugabe und der Zeit bei der die Verlängerung des konstanten Konzentrationsanstiegs die Zeitachse schneidet.

Crank [5] zeigt, wie der Diffusionskoeffizient D aus einem Durchbruchexperiment mit kontinuierlicher Verdünnung ermittelt wird:

$$D = \frac{l^2}{7.199 \cdot t_{0.5}} \quad (3.5)$$

Die Zeit $t_{0,5}$ kennzeichnet dabei die Zeit, bei der 50 % der Gleichgewichtskonzentration erreicht sind.

Mit der Gleichung

$$P = D \cdot S \tag{3.6}$$

ist bei einem bekannten Permeationskoeffizienten und einem bekannten Diffusionskoeffizienten dann die Löslichkeit berechenbar.

Die Temperaturabhängigkeit des Permeationskoeffizienten steht nach der Arrhenius-Gleichung im Zusammenhang mit der Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit S und des Diffusionskoeffizienten D . Die Aktivierungsenergie E_p setzt sich dabei aus der Lösungswärme ΔH_s und der Aktivierungsenergie des Diffusionsprozesses E_D zusammen. S_0 und D_0 beschreiben die maximale Löslichkeit bzw. den maximalen Diffusionskoeffizienten bei $T \rightarrow \infty$.

$$P(T) = S_0 D_0 \cdot e^{-\frac{\Delta H_s + E_D}{R \cdot T}} = P_0 \cdot e^{-\frac{E_p}{R \cdot T}} \tag{3.7}$$

Die Temperaturabhängigkeit des Permeationskoeffizienten lässt sich in einem „Arrhenius Graphen“ darstellen, bei dem der Permeationskoeffizient logarithmisch über $1/(R \cdot T)$ aufgetragen wird.

Was eine Wasserdampfdurchlässigkeit von $1 \times 10^{-x} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ bedeutet, soll an dieser Stelle noch einmal verdeutlicht werden.

Die Wasserdampfdurchlässigkeit WDD von $10^x \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ist äquivalent zu:



Abbildung 4: WDD äquivalente Massenstromdichten

Die in diesem Kapitel beschriebenen Kenngrößen dienen neben der reinen Beschreibung der Gasdurchlässigkeit zur Charakterisierung deren Zeit-, Temperatur und Feuchteabhängigkeit. Beim Einsatz von VIP unter realen Bedingungen ändern sich diese Umgebungsbedingungen ständig. Zur Abschätzung der VIP Lebensdauer muss daher nicht nur die Gasdurchlässigkeit unter Prüfbedingungen berücksichtigt werden, sondern die integrale Gasdurchlässigkeit für alle beim Anwendungsfall auftretenden Umgebungsbedingungen. Das zeitliche Verhalten der Gasdurchlässigkeit bestimmt weiterhin die Messzeit bei der Bestimmung der WDD unter genormten Prüfbedingungen und damit die Dauer bis zum Erhalt belastbarer Werte.

3.3 Prinzipieller Aufbau von Permeationsmesssystemen

Die Mehrheit der Permeationsmesssysteme ist für die Durchlässigkeitsprüfung von Membranen, Barrierefolien und dünnen Platten ausgelegt. Diese planen Proben werden im Folgenden als Barrierefolie bezeichnet. Für die Messung anderer Prüfkörper, wie z. B. Flaschen und Rohre, müssen Adapter verwendet werden. Die meisten Permeationsmessgeräte bestehen aus zwei Kammerhälften, die durch die zu messende Probe voneinander getrennt sind (siehe Abbildung 5). In der einen Kammerhälfte, dem Prüfgasraum, auch als „Feedside“ oder „Dampfraum“ bezeichnet, befindet sich das Prüfgas oder Prüfgasgemisch, welches z. B. aus Wasserdampf und Stickstoff besteht. Dieses Prüfgas wandert entlang eines Partialdruckgradienten durch die Probe in die zweite Kammerhälfte, den Permeatenraum. Das durch die Probe hindurch tretende Prüfgas wird dort als Permeat bezeichnet und einem Detektor zugeführt. Die Kammerwände bestehen aus einem inpermeablen Material, in der Regel Edelstahl, Aluminium oder Glas. Zur Abdichtung des Prüfgasraumes gegenüber der Atmosphäre werden O-Ringe oder Vakuumsfett eingesetzt.

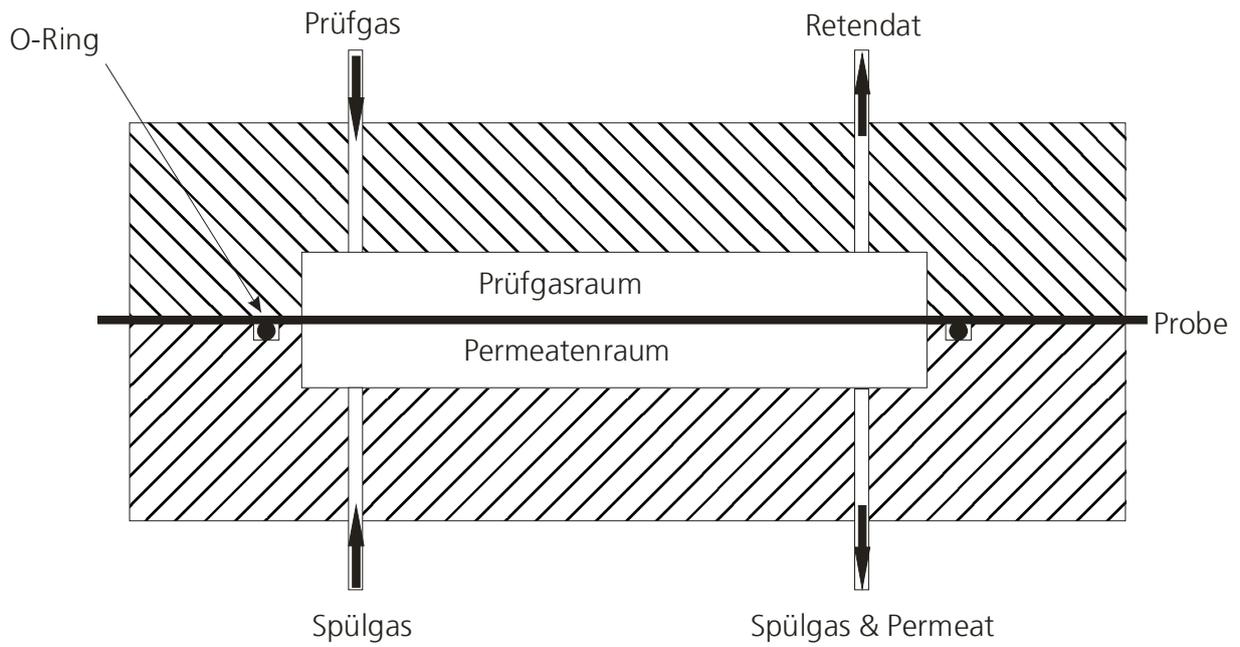


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Permeationsmesssystems

3.4 Einteilung der Permeationsmessverfahren

Permeationsmessverfahren beruhen immer auf einem Partialdruckunterschied. Eingeteilt [6], [7], [8], [9] werden sie deshalb nach dem Absolutdruckunterschied zwischen der Prüfgasseite und der Permeatenseite in:

- a) *Absolutdruckmethode*,
- b) *Isostatische Methode*,
- c) *Quasi-isostatische Methode*.

Die *Absolutmethode* oder *statische Methode* (a) setzt, wie der Name sagt, einen Absolutdruckunterschied zwischen den beiden Kammerhälften voraus. Aufgrund des Druckunterschiedes kann es bei der Prüfung von Barrierefolien zur Beschädigung der Probe kommen. Um dies zu verhindern, werden oft Stützstrukturen verwendet, die allerdings die Permeationsfläche maskieren. Für die Permeationsmessung nach der Absolutdruckmethode ist kein anderes Gas als das Prüfgas notwendig.

Bei der *isostatischen Methode* (b) stehen beide Kammerhälften im ständigen Druckausgleich. Der für die Permeation notwendige Partialdruckunterschied wird meist durch Spülen mit einem „permeatenfreien“ Trägergas erreicht, weshalb diese Methode auch oft als Trägergasmethode bezeichnet wird.

Die *quasi-isostatische Methode* (c) ist durch einen annähernd gleichen Druck in beiden Kammerhälften gekennzeichnet. Gegenüber der isostatischen Methode besteht jedoch nicht die Möglichkeit eines Druckausgleichs mit der anderen Kammerhälfte bzw. der Umgebung.

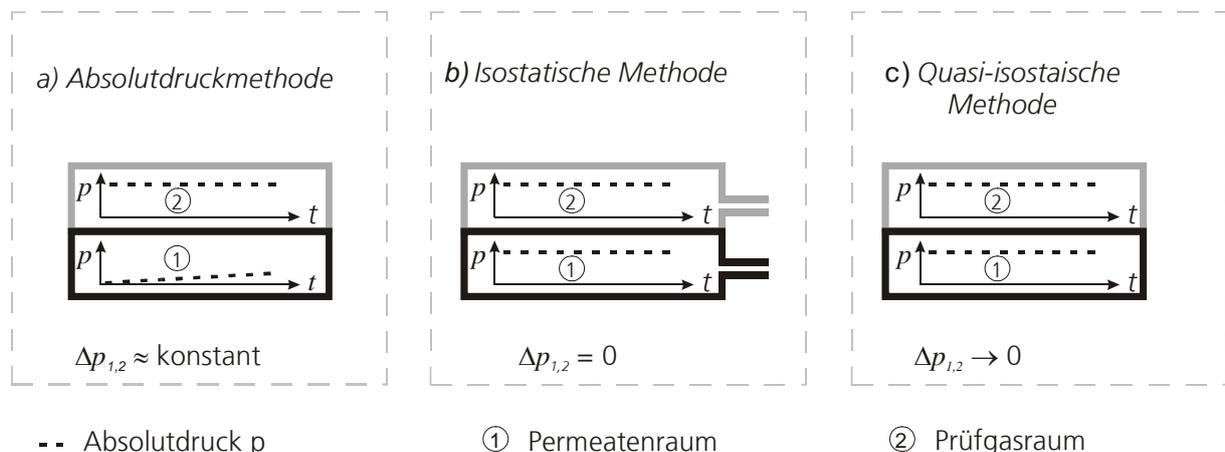


Abbildung 6: Klassifizierung der Permeationsmessmethoden

3.5 Stand der Permeationsmesstechnik

Für die Bestimmung der WDD existiert eine Reihe von Messsystemen mit einer Vielzahl an stoffspezifischen und stoffunspezifischen Sensoren. Einen Überblick über die derzeit verfügbare kommerzielle Wasserdampfpermeationsmesstechnik mit ihren jeweiligen Messbereichen gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Stand der kommerziell verfügbaren Wasserdampfpermeationsmesstechnik

| Methode | Hersteller | Modell | Sensor | Stoffspezifisch | Wasserdampf | untere Nachweisgrenze | obere Nachweisgrenze | |
|---------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|-------------|--|--|-----|
| | | | | | | WDD / g m ⁻² d ⁻¹ | WDD / g m ⁻² d ⁻¹ | |
| Absolutdruckmethode | Brügger | GDP-C | manometrisch | nein | ja | 0,5 cm ³ /1 cm ³ /0,0002 | 30000 cm ³ /20000 cm ³ | |
| | Brügger | Deltaperm | volumetrisch | nein | ja | | | |
| | Technolox | Microperm | manometrisch | nein | ja | | | |
| quasi-isosatische Methode | Moccon | Permatran - W Model 1/50 | gravimetrisch | nein | ja | 0,1 | 100 | |
| | Moccon | Permatran - W Model 101K | gravimetrisch | nein | ja | 500 | 100000 | |
| | Systech | Lyssy L80-5000 | kapazitiver oder nein | nein | ja | 0,03 | 10000 | |
| | Labthink | PERME W3/030 | gravimetrisch | nein | ja | 0,1 | 10000 | |
| | Labthink | PERME W3/060 | gravimetrisch | nein | ja | 0,1 | 10000 | |
| | Labthink | PERME W3/0120 | gravimetrisch | nein | ja | 0,1 | 10000 | |
| | Labthink | PERME TSY-T3 | gravimetrisch | nein | ja | 0,1 | 10000 | |
| | Labthink | PERME TSY-W1 | kapazitiver oder nein | nein | ja | 0,1 | 1000 | |
| | GBP1 Packaging | W 300 type | gravimetrisch | nein | ja | 0,02 | 10000 | |
| | GBP1 Packaging | W 320 type | gravimetrisch | nein | ja | 0,02 | 10000 | |
| | GBP1 Packaging | W 330 type | gravimetrisch | nein | ja | 0,02 | 10000 | |
| | Gintronic | Easyperm 650 | kapazitiver | nein | ja | 0,03 | 10000 | |
| | Gintronic | GravTest 6300/6400 | gravimetrisch | nein | ja | | 10000 | |
| | Isoatischen Methode | IMT | | GC | | | | ? |
| | | Japanlink | | GC | | | | |
| | Isoatischen Methode | Systech | Modell 7000 | columnetrisch | ja | ja | 0,002 | 180 |
| | | Brügger | WDDG | columnetrisch | ja | ja | 0,005 | 10 |
| | | Moccon | Aquatran Model 1 | columnetrisch | ja | ja | 0,0005 | 5 |
| | | Moccon | Permatran - W Model 398 | columnetrisch | ja | ja | 0,05 | 500 |
| | | labthink | PERME W3/330 | columnetrisch ? | ja | ja | 0,001 | 40 |
| labthink | | PERME W3/230 | columnetrisch ? | ja | ja | 0,001 | 100 | |
| labthink | | PERME TSY-W2 | columnetrisch ? | ja | ja | 0,008 | 40 | |
| labthink | | PERME TSY-W3 | elektrolytisch? | ? | ja | 0,001 | 50 | |
| labthink | | PERME TSY-W3/3 | elektrolytisch? | ? | ja | 0,001 | 50 | |
| Hilase | | Wasul-PermSystems | photoakustisch | ja | ja | | | |
| Moccon | | Permatran - W 3/33 | infrarot | ja | ja | 0,005 | 100 | |
| Moccon | | Permatran - W Model 700 | infrarot | ja | ja | 0,005 | 100 | |
| Moccon | | AQUATRAN Model 2 | columnetrisch | ja | ja | 0,00005 | 5 | |
| Sempa Systems | | HIBaStens | infrarot Laser | ja | ja | 0,000005 | 100 | |

Ultrabarrierebereich <10⁻³ g m⁻² d⁻¹

Die Tabelle zeigt Messgeräte zur Bestimmung der Wasserdampfpermeationsraten von Foliensubstraten mit einer Nachweisgrenze von $WVTR < 10^{-1} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Für Prüfkörper existieren derzeit nur kommerzielle Lösungen zur Bestimmung der Sauerstoffpermeationsrate von Kunststoffflaschen [10], [11].

3.6 Internationale Normen zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit

Für die Bestimmung der WDD existieren mehrere nationale und internationale Normen. Eine Auswahl relevanter Normen zeigt Tabelle 3. Spezielle Normen für Baustoffe wie Unterspannbahnen etc. sind aufgrund der hohen Durchlässigkeit und des Umfangs nicht aufgeführt.

Tabelle 3: Auswahl nationaler und internationaler Normen zur Bestimmung der WDD

| Methoden Verfahren | ISO | DIN | ASTM |
|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Absolutdruckmethoden | | | |
| manometrisch | | DIN 53380-2 | |
| manometrisch oder GC | ISO 15105-1 | | |
| volumetrisch | ISO 2782 ISO 2556 | DIN 53380-1 DIN EN ISO 2556 | |
| quasi-isostatische Methoden | | | |
| gravimetrisch | ISO 2528 | DIN 53122-1 | ASTM E 96 ASTM D 1653 |
| relative Feuchte | ISO 15106-1 | | ASTM E398 |
| isostatische Methoden | | | |
| columetrisch | ISO 15106-3 | | |
| infrarot | ISO 15106-2 | DIN EN ISO 15106-2 | ASTM F 1249 |

Die Normen zur WDD sind direkt mit dem Messprinzip, dem Aufbau des Messsystems sowie den Vorschriften zur Auswertung gekoppelt. In den Normen wird nur teilweise der Messbereich empfohlen bzw. eine Mindestempfindlichkeit an den Sensor gestellt. Aufgrund der hohen messtechnischen Anforderungen deckt derzeit keine Norm die Bestimmung der Permeationsraten im Ultrabarrierebereich ($WDD < 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) ab. Um auch für diesen Messbereich weitestgehend vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, empfiehlt es

sich, bei der Auswahl der Messbedingungen auf die Standardmessbedingungen z. B. aus der ISO 15106-3 (DIN EN ISO 15106-3) zurückzugreifen:

- 1) $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$; $90\% \pm 2\% \text{ r. F.}$
- 2) $38\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$; $90\% \pm 2\% \text{ r. F.}$
- 3) $40\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$; $90\% \pm 2\% \text{ r. F.}$
- 4) $23\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$; $85\% \pm 2\% \text{ r. F.}$
- 5) $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$; $75\% \pm 2\% \text{ r. F.}$

3.7 Wärmebrückenberechnung

Wärmebrücken an Bauteilanschlüssen weisen gegenüber der ungestörten Fläche eine erhöhte Wärmestromdichte und damit einen lokal erhöhten Wärmeverlust auf. Ihr physikalisches Merkmal ist, dass die Isothermen (Linien gleicher Temperatur) an dieser Stelle gegenüber dem ungestörten Bauteil einen verzerrten Verlauf aufweisen. Bei homogenen Bauteilen mit einer konstanten Temperaturdifferenz stellen sich immer oberflächenparallele Isothermen ein. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten an einer Wärmebrücke wird ein Temperaturgradient in Richtung der Wärmebrücke erzeugt.

Je nach Beschaffenheit der angrenzenden Baustoffe ergibt sich zur Wärmebrücke hin eine unterschiedlich starke Querleitung. Die Querleitung ist allerdings bei normalen Bau- und Dämmstoffen (mit Ausnahme von massiven Beton- und Stahlbauteilen) nicht sehr ausgeprägt. Durch die örtlich erhöhte Wärmestromdichte wird nicht nur in dem betreffenden Bereich die Oberflächentemperatur des Bauteils reduziert, sondern auch ein zusätzlicher Wärmeverlust verursacht. Aufgrund der Beschaffenheit von VIPs lassen sich thermische Schwachstellen jedoch nicht vollkommen vermeiden. Wie im Forschungsbericht „Optimierung VIP“ [3] ausführlich beschrieben und untersucht treten Wärmebrückeneffekte im Bausystem VIP an den folgenden Stellen auf:

- Wärmebrücken am Paneelrand, die je nach verwendeter Folie und Art der Randausbildung sehr unterschiedlich sein können
- Wärmebrücken aufgrund der Stoßausbildung zwischen 2 Kanten aneinander grenzender VIPs, die sehr stark von der Spaltweite und dem den Spalt füllenden Stoff abhängig sind (Komprimbänder, Klebebänder etc.)

- Wärmebrücken der Konstruktion, d.h. der Befestigungselemente und der baulichen Einbindung der VIPs in konventionelle Konstruktionen – hier kommt es aufgrund der großen Unterschiede der Wärmeleitfähigkeiten der beteiligten Baustoffe zu Wärmebrücken, die bei Anwendung herkömmlicher Dämmstoffe möglicherweise unkritisch wären

Die Wärmebrückenwirkung wird für zweidimensionale Fälle durch den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ in $W/(m \cdot K)$ charakterisiert. Die Ermittlung erfolgt mit der Methode der „Finite-Differenzen“. Der Ψ -Wert gibt an, welcher Wärmeverlust pro laufenden Meter Anschlusslänge und Kelvin Temperaturdifferenz zusätzlich zum Wärmeverlust des ungestörten Paneels durch das Anschlussdetail entsteht. Als Bezugswert dient die ungestörte, eindimensional gerechnete Fläche des Paneels ohne Wärmebrücken. Berechnet wird üblicherweise der Rand eines Elementes, ohne Nachbarelement. Um den Einfluss einer Stoßkante zweier Elemente zu erhalten, muss der für einen Rand ermittelte Wert verdoppelt werden. Für die Berechnung werden die Foliendeckschichten im verschweißten Zustand betrachtet.

Bei der überwiegenden Anzahl der am Markt angebotenen VIP sind die jeweils längeren Kanten der rechteckigen Dämmplatten mit einer Folienlage (konzentrische Anordnung der einzelnen Schichten) ausgeführt. An den beiden kürzeren Kanten werden die obere und die untere Folienlage miteinander verschweißt und die Schweißnaht anschließend nach einer Seite umgeklappt. Bei einigen Produkten wird die Schweißnaht bis in die Fläche der VIP gefaltet und dort festgeklebt.

Kürzere Kanten:

Die obere und untere Folienlage werden verschweißt und der Schweißbereich anschließend nach einer Seite umgeklappt. Das führt dazu, dass die Schichtenfolge der Folie dreimal nebeneinander zu liegen kommt. Zugrunde liegt das folgende Prinzip:

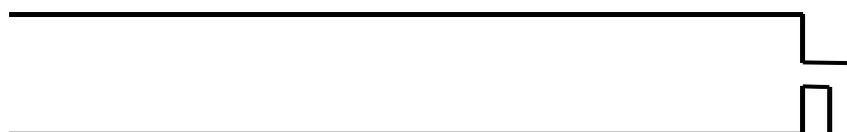


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Randausbildung "überlappend Mitte" - üblicherweise an den kürzeren Seiten eines Paneels verwendet

Für die kürzeren Seiten ist auch eine zweite Ausführung denkbar, die der ersten Möglichkeit ähnlich ist, mit dem Unterschied, dass die Verschweißung nicht in der Mitte des Paneels erfolgt, sondern an der Kante an einer Seite. Auch hier kommen drei Folienlagen auf jeder Seite des VIP-Stoßbereichs zu liegen, die als Wärmebrücke wirken. Gegenüber der ersten dargestellten Möglichkeit ergeben sich aber nur minimale Unterschiede im Ψ -Wert, wie die analytischen Modellrechnungen von A. Binz [13] zeigen. Diese analytische Annäherung wird durch eigene Untersuchungen (z.B. im Rahmen des Projektes „VIP Optimierung“) gestützt.



Abbildung 8: Randausbildung "überlappend Rand" - Alternative Ausbildung zu "Überlappend Mitte" – wird teilweise noch verwendet bei Paneelen großer Dicke

Längere Kanten:

Die längeren Kanten der VIPs werden üblicherweise einlagig und ohne Verschweißung ausgeführt. Die Schweißnaht, welche den Beutel zu einer Röhre schließt, wird vor dem Herstellen der Verschweißungen der kürzeren Seiten vorgenommen und die Röhre dann so weitergedreht, dass diese in der Fläche zu liegen kommt. Gegenüber den drei nebeneinander liegenden Folienlagen der ersten beiden Randausbildungen ist hier die Wärmebrückenwirkung merklich kleiner.



Abbildung 9: Randausbildung "konzentrisch" oder "einlagig" - üblicherweise bei den längeren Kanten der Paneele eingesetzt.

Der Ψ -Wert am Rand eines Elements wird maßgeblich beeinflusst von der Dicke und der Anzahl der metallischen Schichten in der Folie [3]. Zusätzlich spielen die Art und die Dicke der Kunststoffschichten eine Rolle. Ein idealer Spalt würde keine Hohlräume zwischen den aneinandergesetzten Folienlagen aufweisen. Da aber die Folien wellig sind und sich durch die Verschweißung verformen, liegen sie nicht vollflächig aufeinander. Der Spalt zwischen den (umgeklappten) Folien eines VIPs muss mit einem Stoff gefüllt werden. Hier werden für die Berechnung i.d.R. 0,1 bis 0,5 mm Luftschicht innerhalb der Umklappung angesetzt.

In diesem Projekt stehen die Untersuchung der Permeation und die Anwendung der Laserspektroskopie für die Messung der eingedrungenen Gase im Vordergrund, nicht die Anwendung der Paneele am Bau. Aus diesem Grund werden für die Berechnungen der Rand-Wärmebrückeneffekte nur die Paneele ohne den Einfluss eines Spaltes zwischen den Paneelen betrachtet. Es wird der Einfluss der jeweiligen Folie auf den Wärmedurchgang unterschiedlich dicker Paneele untersucht. Solche Einflüsse sind abhängig vom Randanteil der Paneele im Verhältnis zu deren Flächeninhalt. Bei kleinen Paneelen wirken sich die Wärmebrücken der Ränder deutlich stärker aus. Die Untersuchungen werden aus diesem Grund für eine Vielzahl üblicher Paneelformate durchgeführt.

4 Material und Methoden

4.1 Auswahl Testverfahren

Zur Wahl geeigneter Hüllfolien und ihrer Qualitätskontrolle ist ein aussagefähiger Test ohne den Arbeits- und Kostenaufwand einer VIP-Herstellung notwendig. Die Messzeit für einen solchen Test soll signifikant unter der Zeit zum Feststellen einer Wärmeleitfähigkeitsänderung am VIP liegen und die maßgeblichen Transportprozesse und Gase berücksichtigen.

Wasserdampf ist neben Stickstoff und Sauerstoff das in der Atmosphäre am häufigsten auftretende Gas wodurch ein hoher Partialdruckunterschied über die Hüllfolie gegeben ist. Zudem sind viele Polymere für Wasserdampf weitaus stärker durchlässig als für die inerten.

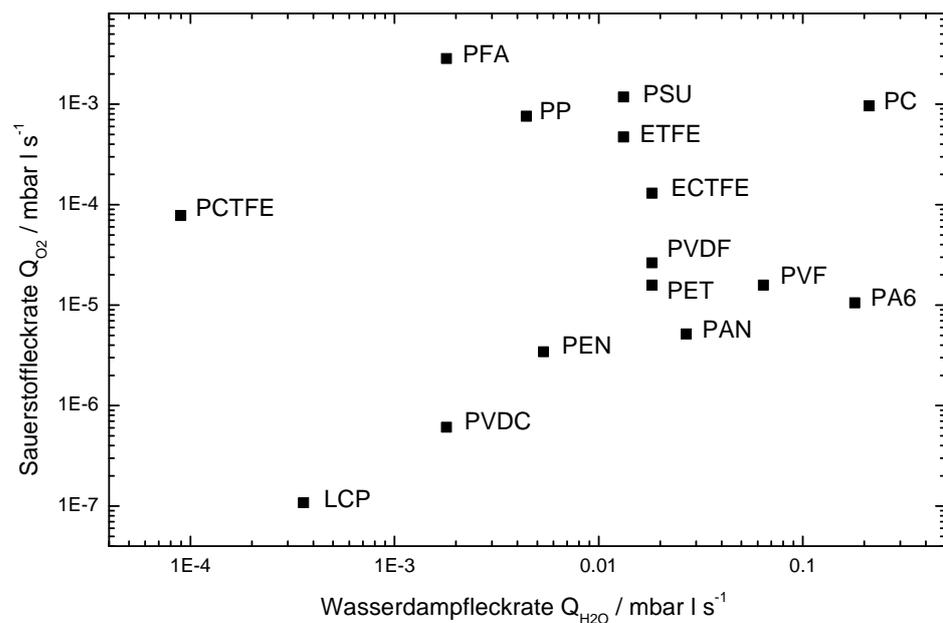


Abbildung 10: Leckraten für ein VIP der Dimension 500 x 500 x 20 mm³ durch 100 µm Polymermaterial, 23°C 85 % r.F.

Für metallisierte Polymerefolien sinkt zudem die Durchlässigkeit von Wasserdampf nicht im gleichen Maße wie die der inerten Gase. Ursache ist die bei kondensierbaren Dämpfen an den Poren und Fehlstellen der Metallisierung zusätzliche auftretenden Transportmechanismen wie z.B. die Kapillarkondensation. Für das hier definierte Standard VIP (500 x 500 x 20 mm³) mit einer 3-fach metallisierten Hüllfolie (Hanita V08621 [14]) bedeutet das für Sauerstoff (21%) eine Leckrate von $6,6 \times 10^{-10}$ mbar l s⁻¹ und für Wasserdampf (38%; 90

% r.F.) eine Leckrate von $9 \times 10^{-5} \text{ mbar l s}^{-1}$ und somit einen Unterschied um den Faktor 137000.

Weiterhin besitzt Wasserdampf mit $1870 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ bei 273 K und mit $2060 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ bei 373 K gegenüber Sauerstoff mit $920 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ bei 298 K und Stickstoff mit $1040 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ eine höhere Wärmekapazität. Dies äußert sich wie in Abbildung 11 gezeigt in einer höheren Wärmeleitung für Wasserdampf.

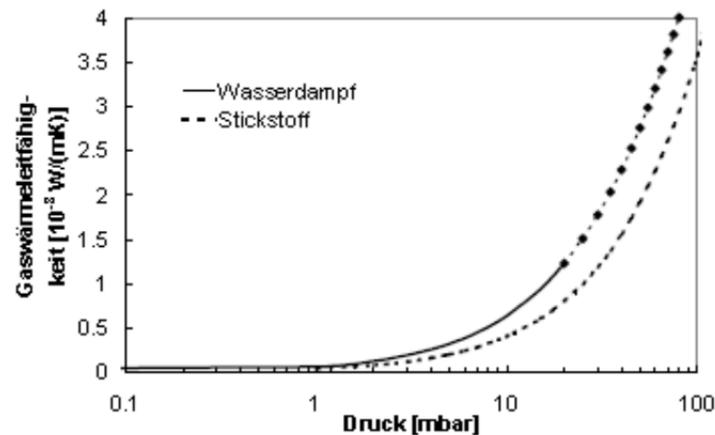


Abbildung 11: Wärmeleitfähigkeit für Stickstoff und Wasserdampf bei 20°C in pyrogener Kieselsäure, oberhalb von 20 mbar tritt Kondensation auf [2]

Unter diesen Voraussetzungen wurde Wasserdampf als signifikante Spezies identifiziert und die Wasserdampfdurchlässigkeit als geeignete Vergleichsgröße ausgewählt.

Vor der Entscheidung für ein spezifisches Messverfahren steht zunächst die Frage, nach welcher Methode die Messung erfolgen soll. Von den Umgebungseinflüssen bildet die Absolutdruckmethode am besten die Verhältnisse am VIP ab und scheint damit die bevorzugte Methode. Untersuchungen zeigen jedoch, dass sowohl bei der Absolutdruckmethode, als auch bei der quasi-isostatischen Akkumulation in der Gasphase die Wasserdampfdurchlässigkeit, aufgrund von Adsorption, mit einem Faktor zwischen 2 und 35 unterbestimmt wird [15], [16].

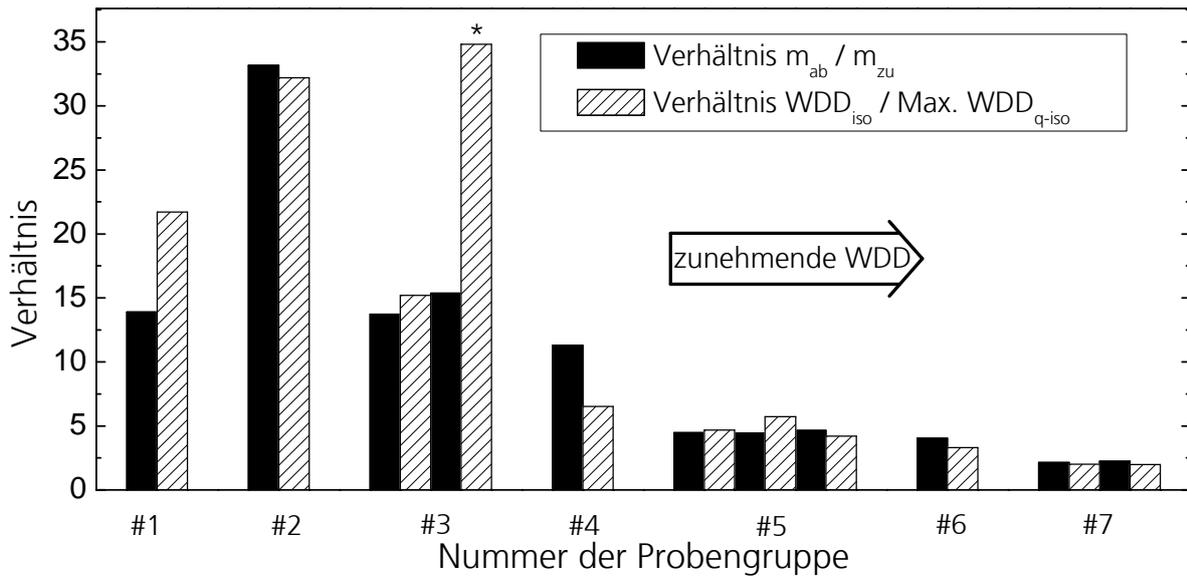


Abbildung 12: Verhältnis der quasi-isostatisch ermittelten WDD zur isostatisch ermittelten WDD für 7 verschiedener Proben; zum Vergleich ist der Quotient aus der nach der quasi-isostatischen Permeationsmessung ausgespülten Masse an Wasserdampf und der zuvor akkumulierten Masse in der Gasphase dargestellt; * Ausreißer; [16]

Diese Unterbestimmung ist abhängig von der Wasserdampfkonzentration, dem Probematerial, den inneren Oberflächen des Messsystems und der Temperatur und kann durch eine Isotherme beschrieben werden.

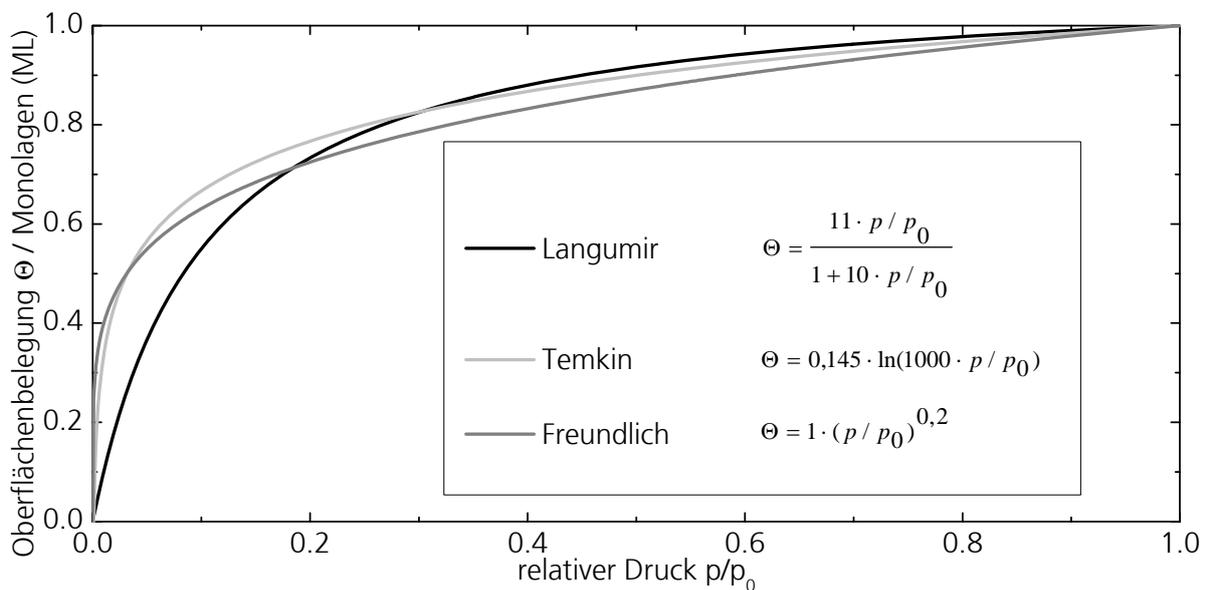


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Langumir-, Temkin und Freundlich Sorptionsisotherme

Aufgrund der zahlreichen Einflüsse und vor allem der Probenabhängigkeit ist die Vergleichbarkeit der mit diesen Methoden ermittelten Durchlässigkeiten nicht gegeben.

Ein Verfahren, das die Menge des durch die Barriere permeierten Wasserdampfes vollständig bestimmt, ist das isostatische Trägergasverfahren. Im Gegensatz zu den Anwendungsbedingungen am VIP wird diese Messung ohne

Druckdifferenz über die Folie durchgeführt. D.h. Strömungslecks, die höhere Leckraten bewirken, werden bei diesem Testverfahren nicht berücksichtigt. Da für Strömungslecks notwendige durchgehende Kanäle in der Barrierefolie fertigungstechnisch ausgeschlossen werden können und nur nach starker mechanischer Beschädigung auftreten, kann auf deren Prüfung verzichtet werden.

Als Verfahren zur vergleichbaren Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit soll deshalb das isostatische Trägergasverfahren eingesetzt werden. Wie in Tabelle 2 gezeigt, sind derzeit nur wenige kommerziell verfügbare Messsysteme in der Lage, die für VIP geforderten geringen Wasserdampfdurchlässigkeiten von $10^{-5} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ [3] nachzuweisen. Aus diesem Grund kommt ein neu entwickeltes Permeationsmesssystem mit einem hochempfindlichen Laserspektrometer zum Einsatz.

4.2 Aufbau des Messsystems

Das HiBarSens Permeationsmesssystem nutzt den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Aufbau, bei der die Messzelle aus zwei Kammerhälften besteht, die durch die zu messende Barriere voneinander getrennt sind. Anders als bei Messsystemen bei denen das Sensorelement, aufgrund des Schutzes vor hoher Feuchte, in einer externen Messzelle platziert werden muss, findet beim HiBarSens Permeationsmessgerät die Permeatenmessung direkt unterhalb der Barriere statt. Dieser Aufbau ermöglicht eine kleinere inneren Oberfläche und demzufolge eine geringere Beeinflussung durch Adsorption und Desorption sowie schnellere Ansprechzeiten.

Als Sensor wird ein Laserdiodenspektrometer mit einer Emissionswellenlänge von $1,4 \mu\text{m}$ eingesetzt. In Kombination mit einer Mehrfachreflexionsanordnung ermöglicht dies Konzentrationsmessungen im Bereich von 0,3 ppm bis 500 ppm. Die in diesem Projekt verwendeten Laserdiodenspektrometer wurden am nationalen metrologischen Institut der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) kalibriert. Weitere Vorteile des optisch-spektroskopischen Sensors sind der geringe Wartungsaufwand, die Driftfreiheit, die nichtinvasive Funktionsweise und die hohe Selektivität.

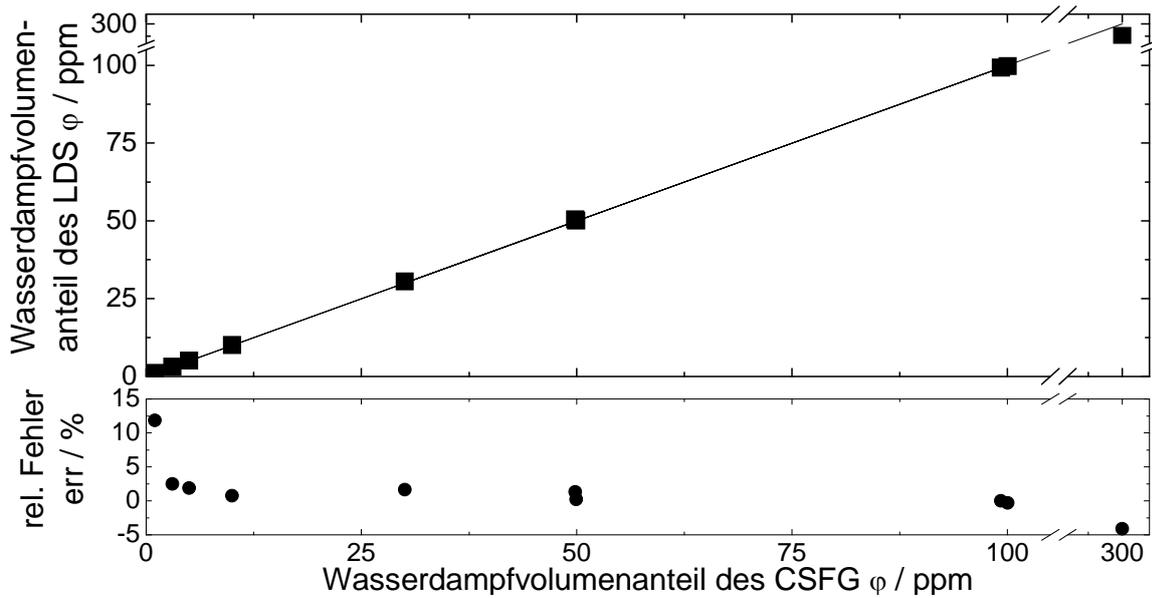


Abbildung 14: Messpunkte und relative Fehler des Permeationsmesssystems gegenüber dem coulometrischen Spurenfeuchtgenerator (CSFG) der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)

Abbildung 15 zeigt den schematischen Aufbau des vom Fraunhofer IWS, zwischen 2008 und 2012, entwickelten Messsystems. Zur Konditionierung der Messzelle und zum Spülen der Bereiche in denen der Laserstrahl außerhalb der Messzelle geführt wird, wird Stickstoff benötigt. Dieser wird in einem Adsorptionsgasreiniger unter die unter Konzentrationsnachweisgrenze des Laserdiodenspektrometers getrocknet.

HiBarSens[®] Aufbau

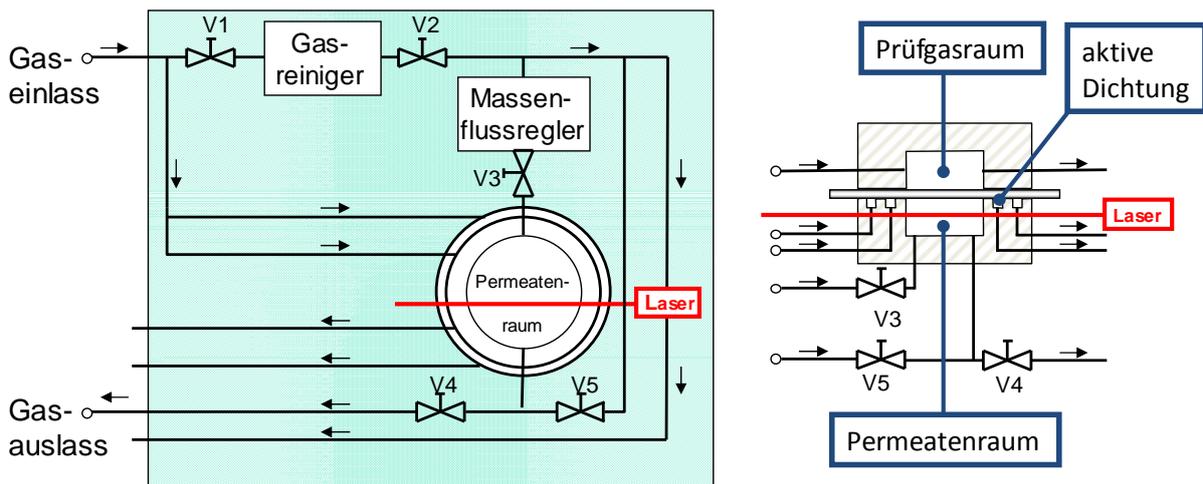


Abbildung 15: Schematischer Aufbau des HiBarSens[®] - Permeationsmesssystems

Weiterhin wird ein kontinuierlicher Stickstofffluss für die aktive Dichtung benötigt. Die Dichtstelle zwischen der Barrierefolie und dem Messzelle ist aufgrund der großen umlaufenden Länge und dem häufigen Probenwechsel die kritischste Dichtstelle. Die bisher für diese Dichtung eingesetzte O-Ringe oder das Vakuumfett genügen den Anforderungen zum Nachweis von 1×10^{-5}

g m⁻² d⁻¹ alleine nicht. O-Ringe speichern zudem große Wasserdampfmen- gen und gasen über einen längeren Zeitraum aus. Dies überlagert den zu messen- den Wasserdampfstrom durch die Probe. Um das Eindringen von Wasser- dampf aus der Atmosphäre durch die Dichtstelle zu verhindern werden des- halb um die Messzelle umlaufende gespülte Kanäle angeordnet. Zum Aus- gleich von Probenunebenheiten und Kratzern im Bereich der Dichtungsfläche wird weiterhin eine dünne Schicht Vakuumfett verwendet.

Die Temperierung des Messsystems erfolgt mit Hilfe eines Wärmeträgermedi- ums und eines Thermostaten durch in der Messzelle eingebrachte Kanäle. Die Arbeitstemperatur ist in einem Bereich zwischen 10 °C bis 50 °C wählbar, wobei eine Temperaturkonstanz von ± 0,05 K erreicht wird.

Für die Erzeugung einer relativen Feuchte im Bereich von 95 % - 50 % wird ein Wasserdampfgenerator nach dem Zweidruckprinzip eingesetzt. Der Zwei- druckgenerator bietet gegenüber anderen bei der Permeationsmessung übli- chen Ansätzen, wie der Feuchteinstellung über gesättigte Salzlösungen (DIN EN ISO 483) oder über Schwefelsäure (DIN EN ISO 15106-3) eine deutlich ein- fachere und flexiblere Handhabung. Aufgrund seiner Zuverlässigkeit wird das Zweidruckgeneratorprinzip vielerorts als nationales Primärnormal eingesetzt [18]. Neben den DIN Messbedingungen fordern die Anwender oft eine Prüf- gasbereitstellung von 100 % r. F.. Diese wird durch den Einbau einer wasser- getränkte Glasfritte in den Prüfgasraum realisiert.

Bei der Permeationsmessung nach dem **Trägergasverfahren** sind die Ventile V1 bis V4 geöffnet (Abbildung 15) und die Messzelle wird mit einem trocke- nen Stickstofffluss gespült. Der Gasfluss wird durch einen Massenflussregler (MFC) im Bereich zwischen 3 und 50 sccm eingestellt. Durch die Mischung des Permeationsstromes und des Trägergasflusses ergibt sich eine Wasser- dampfkonzentration in Stickstoff, welche mit dem Laserdiodenspektrometer gemessen wird. Die Wasserdampfdurchlässigkeit **WDD** berechnet sich dann aus der Konzentration, hier in Form des Wasserdampfvolumenanteil φ und dem Spülgasfluss \dot{V} nach folgender Beziehung:

$$WDD = \frac{\dot{V} \cdot p \cdot M_{H_2O}}{A \cdot R \cdot T} \cdot \frac{\varphi}{(1 - \varphi)} \quad (4.1)$$

Diese Beziehung gilt nur für den stationären Zustand, wenn der Konzentrati- onsgradient in der Probe voll ausgebildet ist und somit die gemessene WDD keine zeitabhängige Änderung mehr zeigt. Zu diesem Zeitpunkt ist auch die

Gaskonzentration im Gleichgewicht mit der Oberflächenbeladung der Messzelle und der Probe, sodass keine Unter- bzw. Überbestimmung durch Adsorption bzw. Desorption das Messergebnis beeinflusst. Mit dem beschriebenen Aufbau sind Wasserdampfdurchlässigkeitsmessungen im Bereich $9 \times 10^{-5} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ bis $100 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ möglich. Die untere Nachweisgrenze wird dabei neben der unteren Konzentrationsnachweisgrenze auch durch den minimal einstellbaren Gasstrom bestimmt.

Für die Bestimmung geringerer WDD wurden zwei weitere Verfahren entwickelt, die ebenfalls den Permeationsstrom vollständig erfassen [15]. Diese wurden mit demselben Aufbau realisiert.

Das **Diffusionsverfahren** nutzt anstelle des Trägergasflusses einen kontinuierlichen Permeatenabtransport auf Basis von Diffusion. Im Vergleich zum Trägergasverfahren lässt sich durch Diffusion der Abtransport des Permeaten weiter reduzieren, sodass sich eine höhere Wasserdampfkonzentration in der Messzelle einstellt. Diese kann entweder mit geringerer Messunsicherheit bestimmt werden bzw. ermöglicht die Bestimmung geringerer WDD. Einen schematischen Aufbau des sogenannten „Diffumeters“ zeigt.

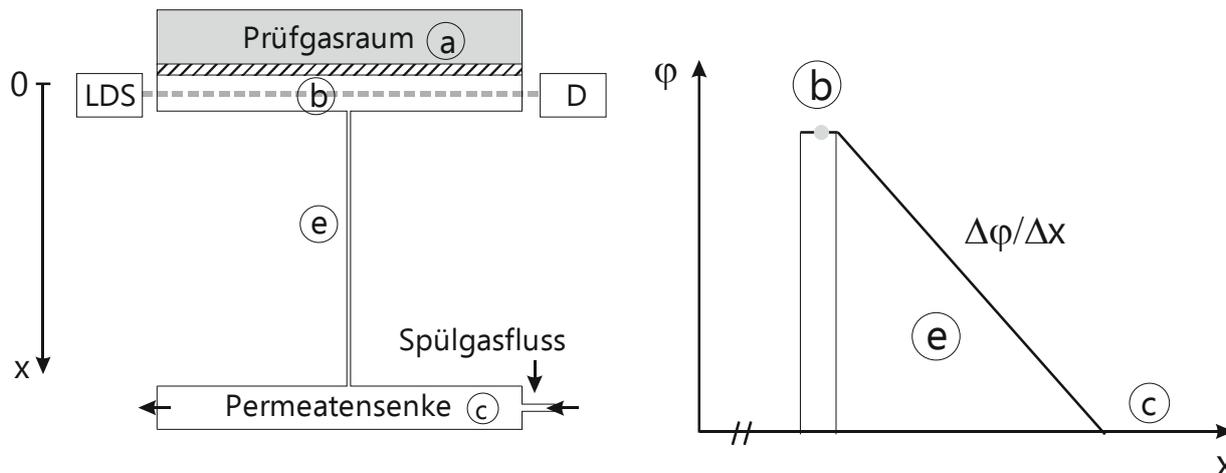


Abbildung 16: Schematischen Aufbau des Diffumeters

Der durch die Probe permeierende Wasserdampfstrom diffundiert anschließend entlang eines Weges x zu einer Permeatensenke, an der der Permeat mit Hilfe eines Spülgasflusses abtransportiert wird (Abbildung 15 Ventil V5). Die Permeatensenke gewährleistet am Ende der Diffusionsstrecke eine stabile und niedrige Konzentration des Permeaten. Entlang des Weges x bildet sich in Folge dessen ein Konzentrationsgradient aus, der gemäß dem 1. Fick'schen Gesetz auf die Stoffmengenflussdichte J zurückzuführen ist. Die Wasserdampfdurchlässigkeit errechnet sich dann bei bekannter Diffusionskonstante aus dem durch Messung bestimmten Konzentrationsgradienten entlang des

Weges x , der Probenflächen A und der Querschnittsfläche der Diffusionsstrecke $A_{\text{Diffusionsquerschnitt}}$ wie folgt:

$$WDD = -D \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p}{R \cdot T} \cdot \frac{A_{\text{Diffusionsquerschnitt}}}{A} \quad (4.2)$$

Mit dem im Aufbau realisierten Dimensionen ergibt sich eine untere Nachweisgrenze der WDD von $5 \times 10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Das **Kombinationsverfahren** [16] nutzt eine Massenbilanz zum vollständigen Erfassen der WDD. Wasserdampf, welcher sich während einer Akkumulationsphase an den inneren Oberflächen der Messzelle und der Probe angelagert hat, wird in einer anschließenden Spülphase wieder ausgetragen. Damit so viel Wasserdampf ausgespült wird, wie in der vorangegangenen Akkumulationsphase angereichert wurde, ist dieser Vorgang zyklisch mit festen unteren und oberen Konzentrationsumschaltpunkten zu wiederholen. Nach mehreren Zyklen stellen sich an den Umschaltunkten die zur Berechnung der WDD notwendigen jeweils gleichen Oberflächenbeladungen ein. Bestimmt wird die WDD indem die ausgespülte Masse an Wasserdampf m auf die Probenfläche A und die Zeit für einen vollständigen Akkumulations- und Ausspülzyklus $t_{\text{total, u}}$ bezogen wird. Ermittelt wird die ausgespülte Masse an Wasserdampf m dabei aus dem Integral des Wasserdampfvolumenanteils und den Gasfluss über die Ausspülzeit.

$$WDD = \frac{m}{t_{\text{total}} \cdot A} = \frac{\int (\varphi(t) \cdot \dot{V} \cdot \psi_2) dt \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p}{R \cdot T \cdot t_{\text{total}} \cdot A} \quad (4.3)$$

Mit dem im Aufbau realisierten Kombinationsverfahren sind abhängig von den gewählten Umschaltpunkten und dem Spülgasfluss untere Nachweisgrenze der WDD von $10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ möglich.

4.3 Durchführung der Messung und Messkurveninterpretation

Für die Messung der im Projekt ausgewählten Barrierefolien für VIP-Anwendungen zeigte sich die Nachweisgrenze der Messung nach dem Trägergasverfahrens als hinreichend, weshalb es, wenn nicht anders gekennzeichnet, als Standardmessverfahren in den folgenden Untersuchungen eingesetzt wird.

Die Barrierefolien werden zunächst auf DIN A4 zugeschnitten. Diese Größe bietet neben der Messfläche (Durchmesser 131 mm) genügend Überstand zur Einspannung der Folie in das Messsystem und Abstand von evtl. beschädigten

Bereichen um die Schnittkante. Zunächst wird auf die Dichtfläche der unteren Kammerhälfte ein dünner Film Vakuumfett aufgetragen und die Probe aufgelegt. Zu diesem Zeitpunkt ist die Permeatenkammer hoher atmosphärischer Feuchte (2000 ppm – 30000 ppm) ausgesetzt. Als nächstes wird die obere Kammerhälfte (Prüfgaskammer) abgesenkt und mit einem Drehmoment von 10 Nm angezogen. Die Bediensoftware wird gestartet und die für die Messung gewünschten Messbedingungen (Temperatur, relative Feuchte, Trägergasstrom) eingestellt. Der Trägergasstrom von typischerweise 30 sccm oder 50 sccm trägt jetzt die im Volumen der Permeatenkammer befindliche und von den Wänden desorbierte Feuchte heraus. Dabei sinkt die gemessene Wasserdampfkonzentration (siehe Abbildung 17). Diese Phase wird als Konditionierungsphase bezeichnet. Gleichzeitig dringt aufgrund der Durchlässigkeit Wasserdampf durch die Probe, der zu einer Mischungskonzentration führt, aus der nach Gleichung (4.1) die Wasserdampfdurchlässigkeit bestimmt werden kann. Als Wasserdampfdurchlässigkeit kann dabei nur der Wert im stationären Zustand (keine zeitliche Änderung der Konzentration / WDD) bezeichnet werden. Der häufigste Fehler bei der Bestimmung der WDD ist ein zu zeitiger Abbruch der Messung bevor die Gleichgewichtskonzentration erreicht ist.

Bei der Entscheidung, wann ein Gleichgewichtszustand erreicht ist und die Messung abgebrochen werden kann, gilt es, zwischen dem Erhalt gesicherter Ergebnisse sowie dem Probendurchsatz und somit den Kosten für die Permeationsmessung abzuwägen. Durch die Vielfalt möglicher Proben und Permeationsmechanismen obliegt es dem Nutzer des Messgerätes die Abbruchentscheidung zu treffen. Er verfügt zudem über zusätzliche Kenntnisse zum Probenaufbau und Erfahrungen aus vorangegangenen Messungen, die dabei einfließen können.

Zur Bestimmung der WDD wird durch den Benutzer ein Zeitbereich festgelegt, in dem die WDD konstant ist und für diesen Bereich der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

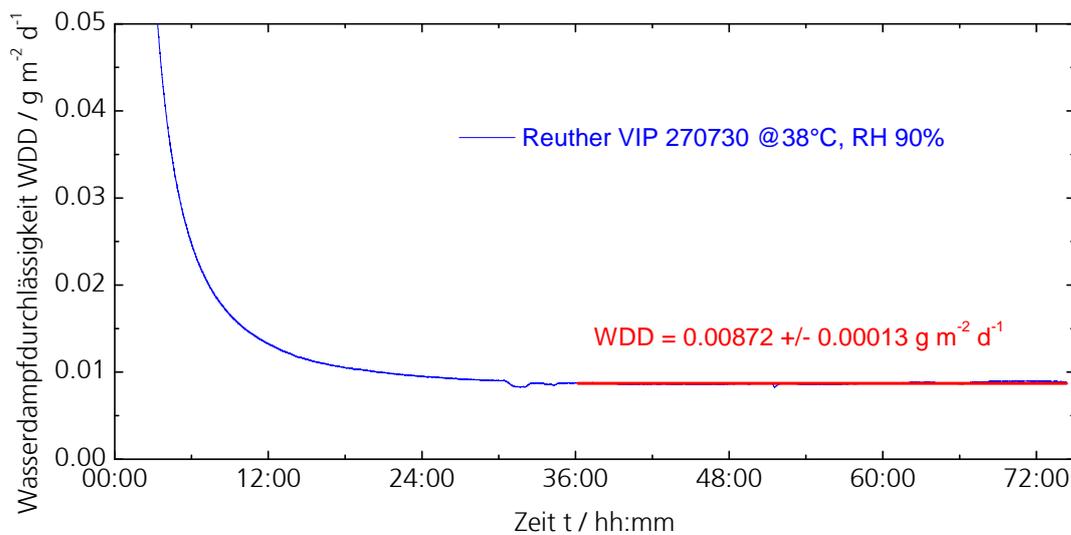


Abbildung 17: typischer Verlauf einer Messkurve zur Bestimmung der WDD

Zur Planung der durchzuführenden Messungen soll an dieser Stelle die minimale Messzeit für eine Barrierefolie abgeschätzt werden. Die Messzeit ist allgemein vom WDD-Zielbereich der Folie sowie vom Schichtaufbau abhängig. Zur Abschätzung der minimalen Zeit bis zum Erreichen des Zielbereiches wird die entsprechend notwendige Zeit zur Messzellenkonditionierung bei Verwendung einer 100 µm dicken Aluminiumfolie herangezogen. Bei der „Permeationsmessung“ von Aluminiumfolie wird die Konditionierungszeit ausschließlich durch das Ausgasen (Desorption) des an der Oberfläche gebundenen Wasserdampfes bestimmt.

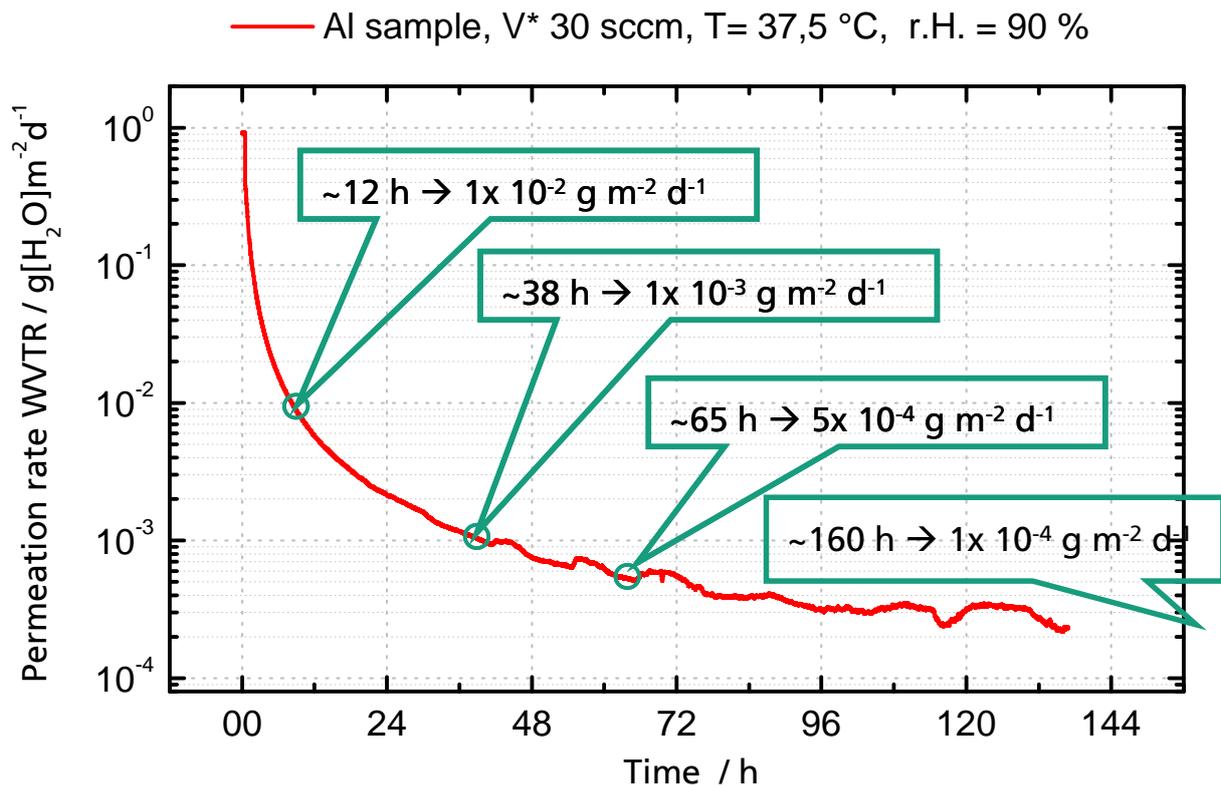


Abbildung 18: Konditionierungszeit der Permeationsmesszelle, abgeleitet aus Messung mit einer Aluminiumprobe

Bei realen Barrierefolien kommt es zusätzlich zu einem Ausgasen der in der Barrierefolie sorbierten Feuchte. Abhängig vom Schichtaufbau stellt sich der zu messende Gleichgewichtszustand entsprechend später ein. Schichtaufbauten mit mehrfachen Wechselschichten können Durchbruchzeiten bis zu > 60 Tagen bedingen [19]. Für die spezifizierten 3-fach Aluminium-beschichteten Barrierefolien wird eine minimale Messzeit von 1 - 2 Tagen abgeschätzt.

Als Standardmessbedingungen für die hier vorgestellten Proben wurden die Messbedingungen nach ISO 15106-3 Satz 2 bei 38°C und 90 % relative Feuchte gewählt. Diese Messbedingungen stellen die - im Rahmen der DIN-Normen - höchsten Anforderungen an die Barriere und sichern zudem die Vergleichbarkeit mit Literaturdaten anderer Barrierematerialien. Für Anwendungen, wie z. B. bei VIP-Installationen unter dem Dach, sind Temperaturen von $70 \text{ }^\circ\text{C} - 75 \text{ }^\circ\text{C}$, bei Fassadeninstallationen: $60 \text{ }^\circ\text{C} - 65 \text{ }^\circ\text{C}$ und hinter Glas Temperaturen $> 80 \text{ }^\circ\text{C}$ relevant. Da eine Berücksichtigung dieses Hochtemperaturbereiches eine Erweiterung des bisherigen HiBarSens Arbeitstemperaturbereiches sowie der allermeisten kommerziellen Messsysteme erfordert, soll für diese Anwendungsfälle die WDD aus Messungen bei verschiedenen Temperaturen im Arbeitsbereich des Messsystems extrapoliert werden (siehe Abschnitt 5.3).

4.4 Folienscreening

Grundsätzlich kommen für VIP drei Folientypen in Frage [20]

- I. Aluminiumfolie-Polymer-Verbundfolien
- II. Polymerverbundfolien
- III. metallisierte, mehrschichtige Verbundfoliensysteme

Aufgrund der geringeren Wärmeableitung am Paneelrand gegenüber Aluminiumfolie-Polymer-Verbundfolien und der vergleichsweise niedriger Durchlässigkeit gegenüber Polymerverbundfolien sind metallisierte Kunststofffolien vorrangig geeignet [20]. Aufgebaut sind diese metallisierten Kunststofffolien in der Regel aus einem Laminat einzelner dünner metallisierter Kunststofffolien. Typische Dicken für eine Einzelfolie sind 10 µm – 100 µm Polymerfolie mit 25 -150 nm Aluminiumschicht. Da Metalle allgemein als undurchlässig gegenüber Gasen (außer Wasserstoff) gelten, ist die Durchlässigkeit durch solche Folien auf Fehlstellen in den dünnen Schichten zurückzuführen. Fehlstellen können u. a. durch Unebenheit oder Verschmutzung des Substrates (Partikel) entstehen. Für derartige Verbundfolien errechnet sich die Durchlässigkeit, analog dem Widerstand einer Reihenschaltung, aus dem Kehrwert der Summe der Kehrwerte der einzelnen Durchlässigkeiten.

$$\frac{1}{WDD_{ges}} = \sum_{j=1}^z \frac{1}{WDD_j} \quad (4.4)$$

Neuere Konzepte für Barrierefolien nutzen eine Trägerfolie mit mehreren anorganischen und organischen Schichten im Wechsel. Die organischen Schichten sind mit < 1 µm deutlich dünner und dienen nur zur Planariesierung. Sie sollen damit das Fortpflanzen von Defekten auf der jeweils nachfolgenden Barrierschichten verhindern und gleichzeitig den Diffusionsquerschnitt zwischen nicht übereinander liegenden Fehlstellen und damit die WDD einschränken [21]. Durch die geringen Herstellungsmengen und fehlende Produktionstechnik sind diese neuartigen Folien eher hochpreisig.

Für den Einsatz metallisierter Kunststofffolien zur Herstellung von Vakuumsulationspaneelen müssen folgenden Grundanforderungen erfüllt werden:

- kommerzielle verfügbar > 1000(0) m²
- Bahnbreite > 1 m
- Preis < 10 € / m²
- Wasserdampfdurchlässigkeit WDD < 0,1 g m⁻² d⁻¹
- gute Laminierbarkeit, Kompatibilität mit Kleb- und Baustoffen
- geringe Wärmeleitfähigkeit
- ausreichende Festigkeit
- hohe Langzeitstabilität , Korrosionsfestigkeit

Unter Beachtung dieser Anforderungen wurden nachstehende kommerziell verfügbare Barrierefolien ausgewählt:

| Foliennummer | Hersteller | Bezeichnung | Schichtaufbau |
|--------------|------------|----------------------|------------------------------|
| 1 | Hanita | V07421 | 2-fach Aluminium beschichtet |
| 2 | Hanita | V08621 | 3-fach Aluminium beschichtet |
| 3 | Rexor | Rexotherm CIV 8 C 90 | 3-fach Aluminium beschichtet |
| 4 | Braun | Vakuumfolie | 2-fach Aluminium beschichtet |
| 5 | Reuther | VIP 270730 | unbekannt |



Die Datenblätter der aufgeführten Folien befinden sich im Anhang. Um von identischen Ausgangsmaterialien für die verschiedenen Beanspruchungstests auszugehen und damit direkt vergleichbare Ergebnisse zu gewinnen, wurde von jedem Folientyp eine Rolle für die nachfolgenden Untersuchungen reserviert.

Abbildung 19: metallisierte Barrierefolie auf der Rolle

4.5 Ermittlung der Wärmebrückeneffekte der Paneelränder mit den untersuchten Folien

Die Berechnung wird mit Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit der beteiligten Materialien durchgeführt. Als Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit werden Werte nach (DIN EN ISO 10077-2), (DIN 4108-4) beziehungsweise die von den Herstellern angegebenen Werte verwendet.

Die Vakuum-Dämmelemente bestehen aus einem Stützkern aus pyrogener Kieselsäure, welcher mit einer Barrierefolie verpackt ist. Berechnet werden Elemente in den Nenndicken 10 mm, 20 mm und 40 mm.

Für die Produktion dauerhaft funktionstüchtiger VIP sind nicht alle untersuchten Folien tauglich. Die Berechnungen werden daher nur für die besten dreilagigen Folien der Permeationsmessreihe (Hanita V08621 und Rexor „Rexotherm CIV 8 C 90“) durchgeführt.

Die erste Folie ist Hanita V08621 mit einer Gesamtdicke der Aluminiumschichten von ca. 100 nm. Für die Berechnung werden drei separate Schichten der Dicke 33 nm verwendet. Aufbau der metallisierten Barrierefolie V08621 von innen nach außen:

| | |
|-------------------------------|-------|
| Polyethylen (LLDPE) | 50 µm |
| aufgedampfte Aluminiumschicht | 33 nm |
| Polyethylenterephthalat (PET) | 15 µm |
| aufgedampfte Aluminiumschicht | 33 nm |
| Polyethylenterephthalat (PET) | 15 µm |
| aufgedampfte Aluminiumschicht | 33 nm |
| Polyethylenterephthalat (PET) | 15 µm |

Die zweite Folie ist Rexor Rexotherm CIV 8 C 90 mit einer Gesamtdicke der Aluminiumschichten von ca. 240 nm. Für die Berechnung werden drei separate Schichten der Dicke 80 nm verwendet. Aufbau der metallisierten Barrierefolie Rexotherm CIV 8 C 90 von innen nach außen:

| | |
|-------------------------------|-------|
| Polyethylen (LLDPE) | 50 µm |
| Polyethylenterephthalat (PET) | 12 µm |
| aufgedampfte Aluminiumschicht | 80 nm |
| Polyethylenterephthalat (PET) | 12 µm |
| aufgedampfte Aluminiumschicht | 80 nm |
| Polyethylenterephthalat (PET) | 12 µm |
| aufgedampfte Aluminiumschicht | 80 nm |

In der nachfolgenden Tabelle sind die Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Materialien der VIP-Elemente dargestellt.

Tabelle 4: Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit (*üblicher Messwert der Wärmeleitfähigkeit für den ungestörten Bereich in Paneelmitte nach Alterung der Paneele; kein Bemessungswert)

| Material | Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m·K) |
|-------------------------------------|--|
| Polyethylenterephthalat (PET) | 0,24 |
| Stützkern aus pyrogener Kieselsäure | 0,0045* |
| Aluminium | 160 |
| Polyethylen (LLDPE) | 0,33 |
| dünne Luftschlitze (stehend) | 0,030 |

Für die Berechnung und Auswertung werden folgende Temperaturen und Übergangswiderstände verwendet (DIN 4108-4), (DIN EN ISO 6946):

$$\theta_i = 20^\circ\text{C} \quad R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W} \quad \theta_e = -5^\circ\text{C} \quad R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Die Berechnung der beiden Randausbildungen „konzentrisch“ und „überlappend Mitte“ ergeben für die beiden Folien V08621 und CIV 8 C 90 die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Ψ -Werte. Die Berechnung wurde für den Rand eines Paneels durchgeführt. Wenn zwei Paneele nebeneinander eingebaut werden, muss der Rand-Wärmebrückeneffekt für beide Paneele berücksichtigt werden.

Tabelle 5: Berechnete Werte für die linearen Wärmedurchgangskoeffizienten der Ränder von Paneelen unterschiedlicher Dicke bei beiden Folien. Berechnet wurden die Randausbildungen "konzentrisch" und "überlappend Mitte".

| Paneeldicke | V08621 konzentrisch | V08621 überlappend | CIV 8 C 90 konzentrisch | CIV 8 C 90 überlappend |
|-------------|---------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|
| mm | W/(m·K) | W/(m·K) | W/(m·K) | W/(m·K) |
| 10 | 0,0028 | 0,0041 | 0,0041 | 0,0059 |
| 20 | 0,0017 | 0,0027 | 0,0026 | 0,0040 |
| 30 | 0,0012 | 0,0020 | 0,0019 | 0,0030 |
| 40 | 0,0010 | 0,0016 | 0,0015 | 0,0024 |

Die Berücksichtigung der Rand-Wärmebrückeneffekte in der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Paneele erfolgt über den Umweg des Wärmetransports in der Fläche und über die Wärmebrücken der Kanten (Q_{WB}). Diese Effekte wer-

den addiert und anschließend auf das gesamte Paneel gleichmäßig verteilt. Die Berücksichtigung erfolgt nach dem folgenden Prinzip:

$$Q_{WB} = \Delta\theta \cdot (U \cdot A + \sum (\psi \cdot l)) \quad (4.5)$$

Mit:

| | |
|----------------|---|
| $\Delta\theta$ | Temperaturdifferenz am Paneel |
| U | der U-Wert des betrachteten Paneels; eindimensional berechnet in der Paneelmitte (ohne Wärmebrückeneffekte) |
| A | die Fläche des betrachteten Paneels |
| Ψ | die Wärmebrückeneffekte der (beiden) Randausbildung(en) |
| l | die zum jeweiligen Ψ -Wert gehörende Länge |

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit eines Paneels wird aus der Fläche des Paneels, dem Wärmestrom durch das Paneel inklusive der Rand-Wärmebrückeneffekte und der Dicke des Paneels berechnet. Die Berechnung wird hier mit Hilfe eines Zwischenschritts dargestellt (U-Wert inklusive Wärmebrückenwirkung).

$$U_{WB} = Q_{WB} / (A \cdot \Delta\theta) \quad (4.6)$$

Und

$$\lambda_{eq} = d / (1/U_{WB} - \sum R_s) \quad (4.7)$$

Mit:

| | |
|----------------|---|
| λ_{eq} | äquivalente (effektive) Wärmeleitfähigkeit des Paneels inklusive Wärmebrückeneffekte |
| d | Dicke des Paneels (Nennstärke inkl. Foliendeckschichten) |
| R_s | dieselben Wärmeübergangswiderstände auf der Innen- und Außenseite des Paneels wie sie für die Berechnung des U-Werts des ungestörten Paneels verwendet wurden |

5 Permeationsmessung

5.1 Vergleich WDD ausgewählter Folien

Zunächst wurden die im Datenblatt der ausgewählten Proben angegebene WDD überprüft. Dazu wurden von jedem Folientyp drei A4-Blätter jeweils 48 h lang bei 38°C und 90 % r.F. gemessen. Die Messkurven in Abbildung 20 zeigt nach Durchlaufen eines Minimums eine annähernd konstante WDD.

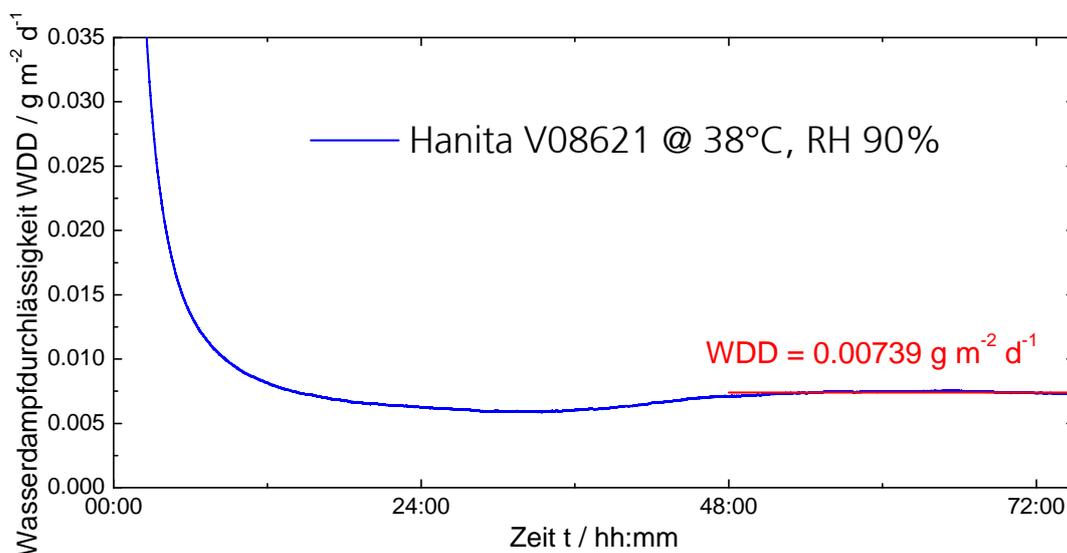


Abbildung 20: Wasserdampfdurchlässigkeit einer Barrierefolie (Hanita V08621)

In Tabelle 6 sind die Mittelwerte der drei Einzelmessungen, die Standardabweichung und die WDD aus dem Datenblatt zusammengefasst. Die ermittelten Werte liegen in allen Fällen unter den im Datenblatt angegebenen WDD-Werten.

Tabelle 6: Vergleich gemessener Wasserdampfdurchlässigkeiten mit den Angaben aus dem Datenblatt

| Foliennummer | Hersteller | Bezeichnung | WVTR / g m ⁻² d ⁻¹ Datenblatt | WVTR ° / g m ⁻² d ⁻¹ HiBarSens | Standardabw. g m ⁻² d ⁻¹ HiBarSens |
|--------------|-----------------|----------------------|---|--|--|
| 1 | Hanita | V07421 | < 0.02** | 0,0141 * | 0,0020 |
| 2 | Hanita | V08621 | < 0.01** | 0,0086* | 0,0001 |
| 3 | Rexor | Rexotherm CIV 8 C 90 | < 0.03* | 0,0137* | 0,0019 |
| 4 | Braun | Vakuumfolie | | 0,3000* | 0,0128 |
| 5 | Reuther | VIP 270730 | < 0.1* | 0,0083* | 0,0004 |
| * | 38°C 90 % r. F | | | | |
| ** | 38°C 100 % r. F | | | | |
| ° | 48 h Messzeit | | | | |

5.2 Durchbruchmessungen

Zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens wird die Durchbruchzeit einer Hanita V08621 bei 38°C nach einem Sprung von 0% r.F. auf 90 %r.F. ermittelt. Aus dieser Durchbruchzeit kann man, auch wenn der homogene Probenaufbau nicht gegeben ist, die in der Barrierefolie gelöste Menge Wasserdampf zumindest überschläglich bestimmen. Diese Wassermenge kann während einer typischen Evakuationsphase von 10 min nicht entfernt werden, was dazu führt, dass der Wasserdampf teilweise in das evakuierte VIP desorbiert.

Nach Einlegen der Barrierefolie wurden zunächst beiden Seiten der Probe trockengespielt. Nach 240 h wurde Wasser in den Wasserdampfgenerator gegeben und ein Konzentration- bzw. WDD-Anstieg beobachtet.

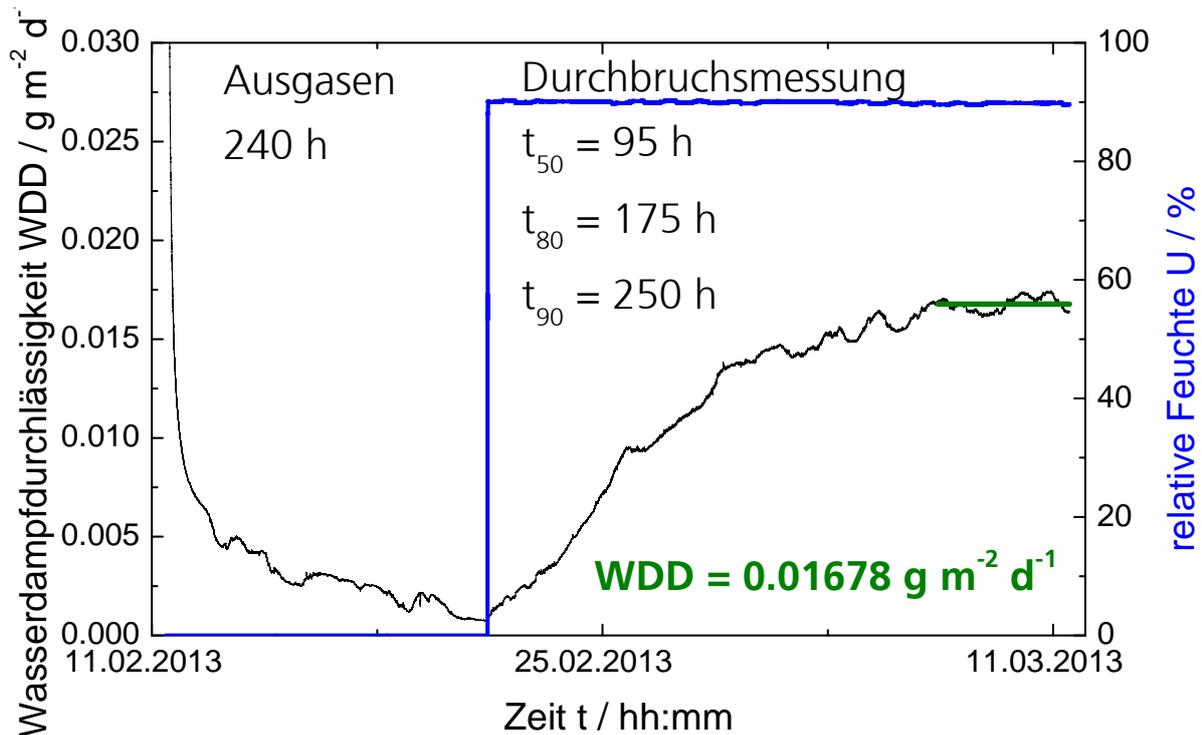


Abbildung 21: Durchbruchmessung von Wasserdampf durch einer Barrierefolie (Hanita V08621) bei 38 °C und einem Sprung auf 90 % r.F.

Der Gleichgewichtswert stellt sich im Gegensatz zu den vorher ermittelten Wert von $8,6 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in dieser Messung bei etwa der doppelten WDD mit $1,68 \times 10^{-2} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ein, obwohl die Folie unbeschädigt ist. Die ermittelte Durchbruchzeit betrug bei diesem Experiment 95 h. Zum Erreichen von 80 % des Gleichgewichtswertes wurden 175 h benötigt und für 90% vom Endwert 240 h oder 10,5 Tage (vgl. 4.3, [19]). Eine zuverlässige Wasserdampfdurchlässigkeit kann demzufolge erst nach einer Messzeit von > 10 Tagen bestimmt werden. Vor dieser Zeit ist der angezeigte Wert durch das Ausgasen des in der Barrierefolie gebundenen Wasserdampfes und die Abtransportrate aus der umgebenden Gasphase bestimmt. Das Ausgasen hängt wiederum von den vorherigen Lagerbedingungen der Barrierefolie ab. Bei Lagerung mit geringer Feuchte kann so die Messkurve ein flaches ausgeprägtes Minimum durchlaufen, welches fälschlicherweise als stationärer Zustand interpretiert werden kann und somit zu einer Unterbestimmung der WDD führt. Mit $1,68 \times 10^{-2} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ liegt die ermittelte WDD jetzt oberhalb der im Datenblatt spezifizierten WDD.

Da Messungen bis zum Erreichen des stationären Zustandes nicht mit dem Messplan und der Messkapazität vereinbar sind, sollen für die folgenden Messungen nach unterschiedlicher thermischer und mechanischer Beanspruchung 48 h Messungen an Laboratmosphäre gelagerter Proben durchgeführt wer-

den. Diese Messungen zeigen zwar nicht die wahre WDD, können jedoch signifikante Beschädigungen schnell erkennen.

Mit der Durchbruchzeit von 95 h kann bei Annahme, dass ausschließlich Lösungsdiffusion auftritt, eine Diffusionskonstante von $3,82 \times 10^{-15} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ und eine Löslichkeit von $0,82 \text{ g m}^{-3} \text{ Pa}$ berechnet werden.

5.3 Temperaturabhängigkeit der WDD

Unterschiedliche Einsatztemperaturen der VIP erfordern die Kenntnis der Durchlässigkeit bei verschiedenen Temperaturen. Bestimmt wurden die Temperaturabhängigkeit der WDD / Permeance einer Hanita V08621 Probe anhand von fünf Messpunkten im Bereich zwischen 20 °C und 40 °C . Die Messdauer pro Messpunkt betrug dabei > 10 Tage, sodass korrekte Ergebnisse angenommen werden können. Die graphische Darstellung im Arrheniusplot zeigt die erwartete lineare Abhängigkeit.

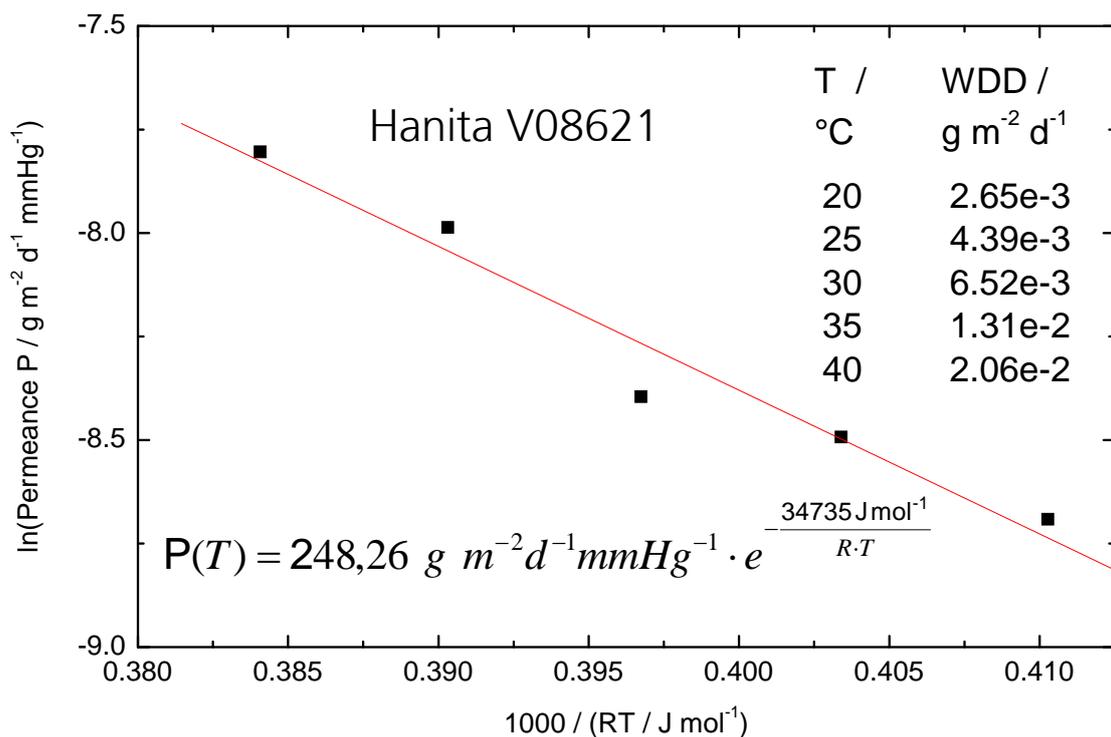


Abbildung 22: Arrheniusgraph der Permeance einer Barrierefolie (Hanita V08621)

5.4 Thermische Alterung

Im Zulassungsverfahren für Vakuumpaneele für Anwendungen am Bau ist eine Schnellprüfung bzw. die zeitraffende Alterung von VIP vorgeschrieben.

Entsprechend dieser Vorgaben wurden Proben (A4 Blätter) von jedem Folientyp zunächst einer Kurzzeit - Klimawechselprüfung (8 Tage) und anschließend

einer 3 monatigen Lagerung in einer Klimakammer bei 80 °C bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 5 % ausgesetzt. Die Prüfprozedur wird im Folgenden beschrieben:

1. Die WDD von drei „frischen“ Proben jedes Folientyps wurde bestimmt, zwei weitere Reserveproben wurden in Laboratmosphäre (ca. 23°C und 50% r.F.) gelagert
2. 25 Proben jedes Folientyps wurde einer Klimawechselbeanspruchung zwischen -15°C und + 80°C mit einem Zyklus pro Tag, 8 Tage lang ausgesetzt. Hierbei wird die Temperatur im Klimaschrank über einen Zeitraum von 3 Stunden verändert und bleibt dann für 9 Stunden konstant bei der neuen Temperatur (ein vollständiger Zyklus beträgt 24 h).
3. Die WDD von drei Proben jedes Folientyps wurde nach der Klimawechselbeanspruchung bestimmt, zwei weitere Reserveproben wurden in Laboratmosphäre gelagert
4. Die restlichen Proben wurden bei einer konstanten Temperatur von +80°C gelagert und jeweils 5 Proben nach 10; 20; 60 und 90 Tagen entnommen, davon wurden drei Folien geprüft und 2 für etwaige Wiederholungsmessungen an Laboratmosphäre gelagert.

Diese Prozedur entspricht etwa einer realen Alterung von 5 – 10 Jahren. Durch die periodischen Probenentnahme ergeben sich 5 Alterungsschritte, die im Folgenden mit 1-5 gekennzeichnet werden. Nach Alterungsschritt 1 haben die Folien die Klimawechselbeanspruchung durchlaufen. Nach den 10; 20; 60 und 90 Tagen Temperaturlagerung entsprechend die Alterungsschritte 2-5. Alterungsschritt 0 entspricht „frischen“ Folien.

Beim Durchlaufen der Alterungsprozedur zeigten alle Proben ein starkes Einrollen und wurden während der höheren Alterungsstufen zusätzlich mit Gewichten fixiert.

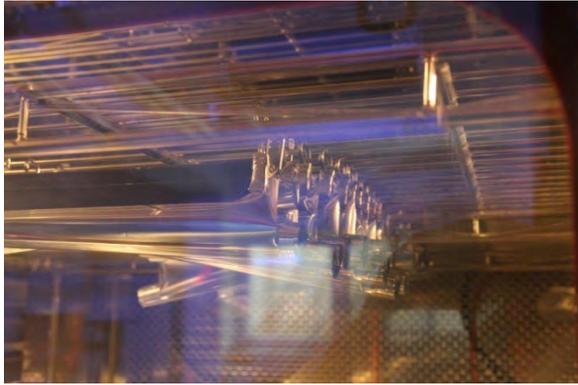


Abbildung 23: Einrollen während Alterungstest ohne Fixieren

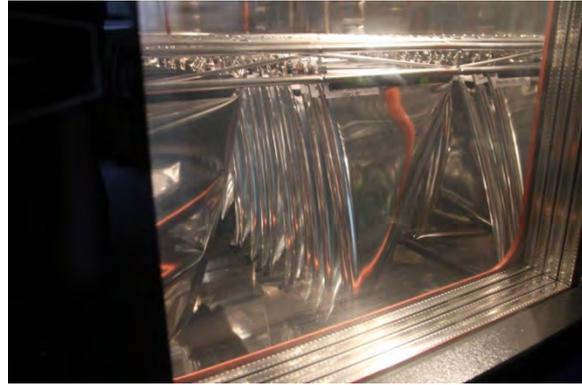


Abbildung 24: Verformung der Folien während Alterungstest mit Fixieren

Abgesehen von der Hanita V08621Folie und dem Einrollen zeigen die ausgewählten Folien keine optischen Mängel nach der Alterungsprozedur. Die Hanita V08621Folie zeigt ab der dritten Alterungsstufe zunehmend Delamination.

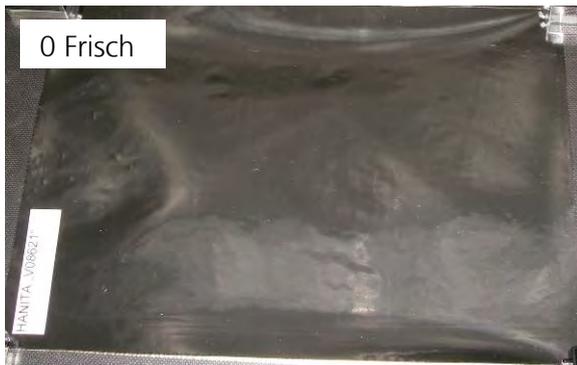




Abbildung 21: Bilder der Hanita VIP V08621 nach den Alterungsstufen 0-5, zunehmende Delamination ab der 3. Alterungsstufe

Die gemessenen WDD steigt bis zum 2. Alterungsschritt um ca. 70 % an und fällt anschließend wieder auf annähernd den WDD-Wert der unbehandelten Folien. Aufgrund der hohen WDD der Braun Folie und der damit verbundenen schlechten graphischen Vergleichbarkeit sind diese Ergebnisse in Abbildung 25 nicht dargestellt. Die vollständigen Daten sind im Anhang als Diagramm und Tabelle zu finden.

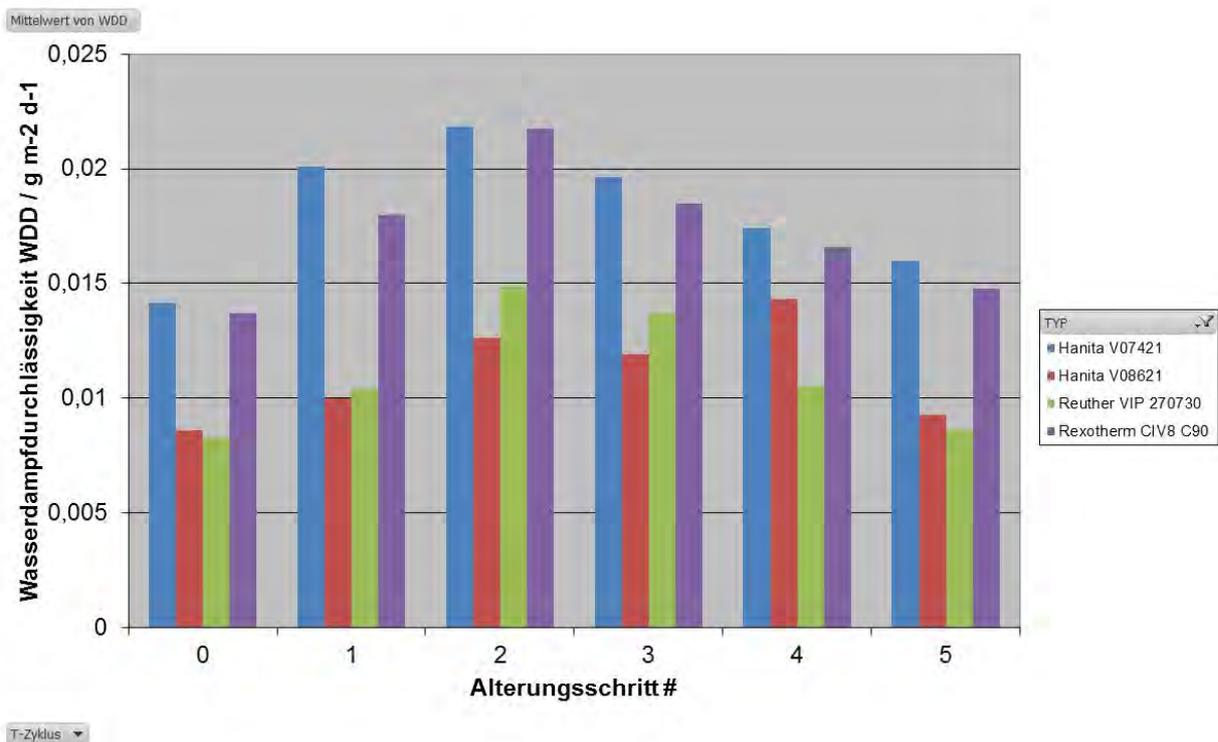


Abbildung 25: gemessene Wasserdampfdurchlässigkeit nach Alterungsstufen 0-5 ohne Braunfolie; 38 °C, 90 % r.F.

Eine weitere, auf die WDD lediglich der Hanita V08621 und der Reuther VIP 270730 reduzierte, Darstellung ist in Abbildung 26 zu finden. Hier sind neben der WDD die Standardabweichungen der drei Einzelmessungen eingezeichnet.

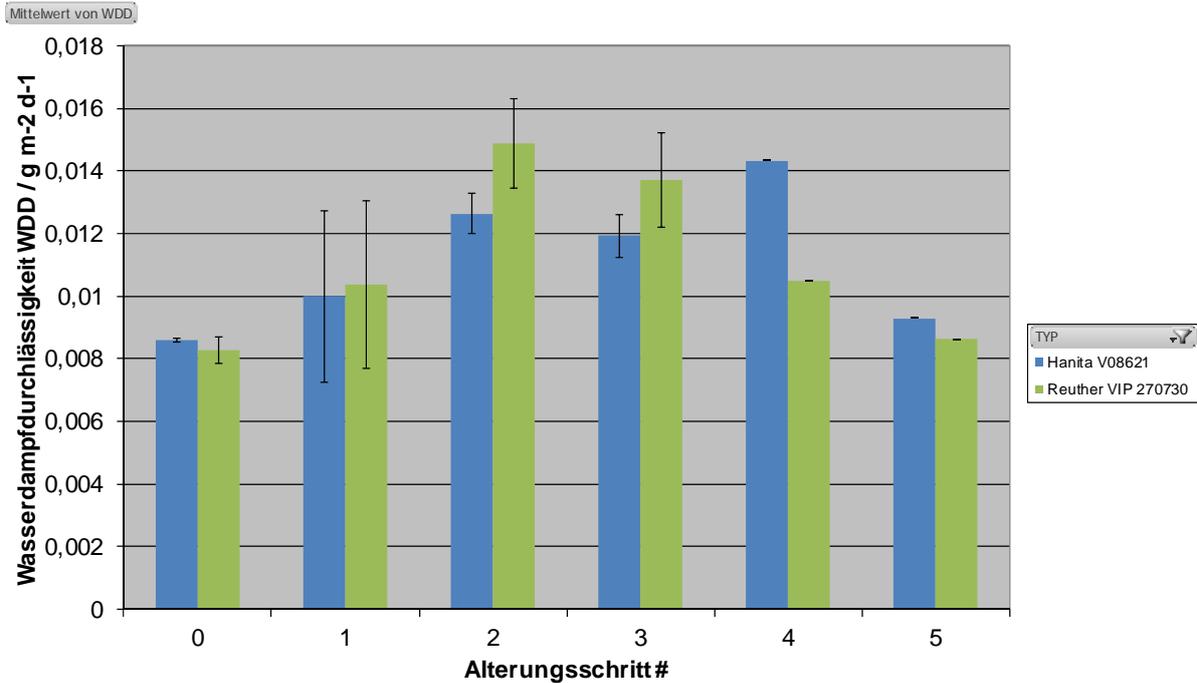


Abbildung 26: gemessene Wasserdampfdurchlässigkeit nach Alterungsstufen 0-5 für Hanita V08621 und Reuther VIP 270730; 38 °C, 90 % r.F.

Die geringe Streuung der jeweils drei Messwerte bei jeder Alterungsstufe deutet auf einen signifikanten Unterschied zwischen den Messwerten der Alterungsstufen und nicht auf eine geräteseitige Messunsicherheit. Der unerwartete Verlauf der WDD mit zunehmender Alterung muss daher eine anderen Ursache haben. Diese Ursache ist die bereits in Abschnitt 5.2 beschriebene lange Durchbruchzeit in Kombination mit den vorherigen Lagerbedingungen der Folien. Die Proben wurden über einen Zeitraum von einem Jahr gemessen. Die unbehandelten Proben wurden im Winter bei geringer Luftfeuchte gelagert und konnten somit weniger Wasser lösen als die Proben nach dem zweiten und dritten Alterungsschritt, die im Sommer bei hoher Luftfeuchtigkeit gelagert wurden. Die Messung nach dem 5. Alterungsschritt erfolgte wieder im Winter, sodass diese wieder lediglich einer geringen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt war. Diese Theorie wurde durch die wiederholte Messung bereits nach dem zweiten und dritten Alterungsschritt gemessener Proben im Winter bestätigt.

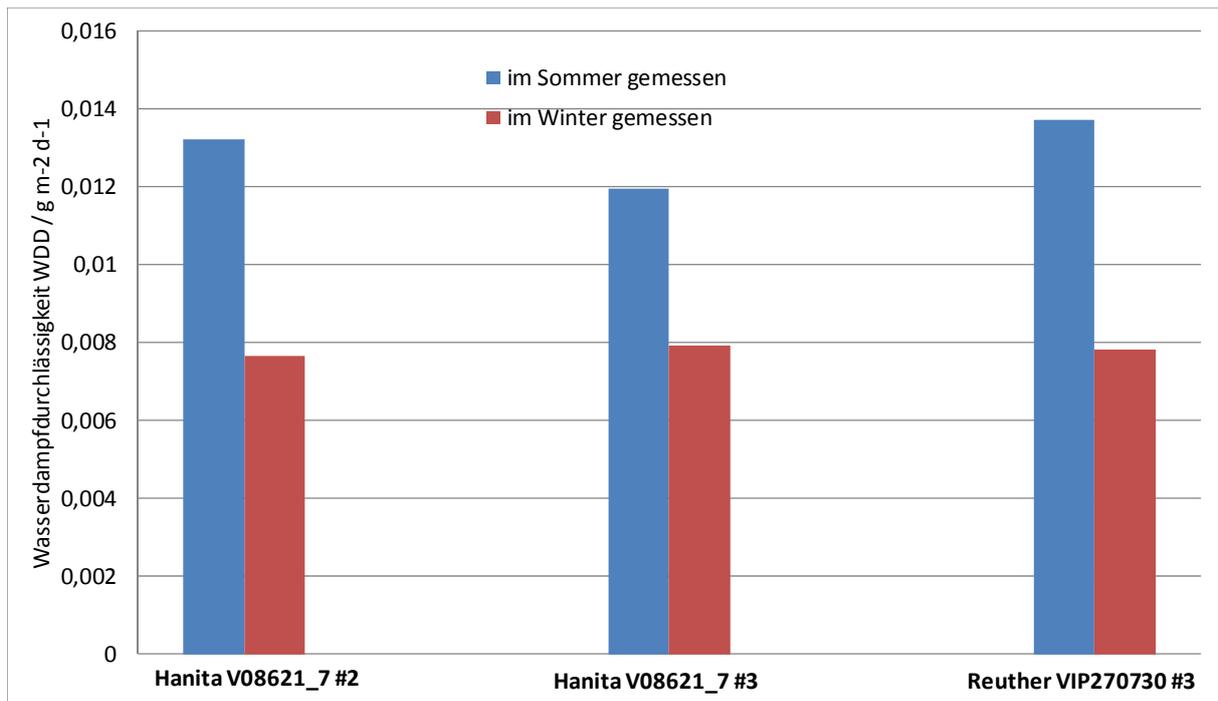


Abbildung 27: Unterschied der nach 48 h gemessenen Wasserdampfdurchlässigkeiten für Messungen im Sommer und Winter, Hanita V08621_7 #2 = identische Probe, Hanita V08621 #3 und Reuther VIP 270730 #3 gleiche Charge und Vergleich mit Mittelwert aus thermischen Alterungstests

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Messung mit einer Messzeit kürzer als die Durchbruchzeit, besser länger als die t_{90} -Zeit, nur bedingt vergleichbare Ergebnisse liefert, obwohl aus dem zeitlichen Verlauf der Konzentration / WDD während der Messung vermeidlich konstante Werte ersichtlich sind (vgl. Abbildung 17 und Abschnitt 5.2).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass kein signifikanter Anstieg der WDD nach der thermischen Alterung auftritt. Eine signifikante Schädigung der Folien konnte nicht gefunden werden. Die Delamination bei der Hanita V08621 zeigt ebenfalls keinen negativen Einfluss auf deren WDD. Dies führt zu dem Schluss, dass die metallisierte Schicht intakt und vollständig auf der Substratfolien erhalten bleibt, während sich die einzelnen metallisierten Folien voneinander lösen.

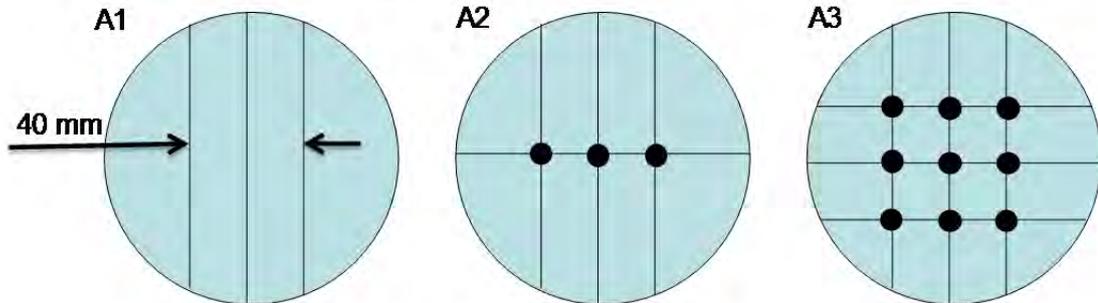
5.5 Mechanische Beanspruchung

Knicktest

Der Knicktest soll definiert und somit objektiv die während der Produktion und im späteren Einsatz auftretenden Belastungen der Folie abbilden und durch eine sich anschließende Messung deren Einfluss auf die Wasserdampfdurchlässigkeit zeigen.

Für eine objektive Einschätzung wurde ein Prüfplan festgelegt, der den Einfluss von Knicklänge, Knickwinkel und Kreuzungspunkten systematisch untersucht. Abbildung 28 zeigt die für die Prüfung vorgesehenen Falzmuster.

90°- Biegung, kein Biegeradius, mit Falzbein



180°- Biegung, kein Biegeradius, mit Falzbein

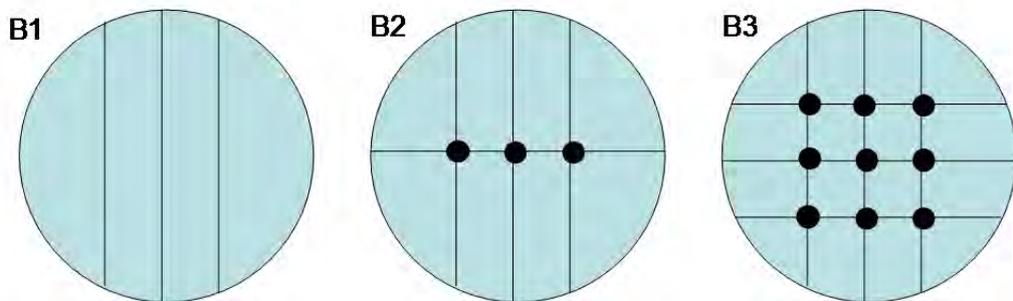


Abbildung 28: Falzmuster für Knittertest
Die zugehörigen Knicklängen und die Anzahl von Knickpunkten sind in Tabelle 7 angegeben. Typ A wird mit einem Winkel von 90 ° geknickt und Typ B mit einem Winkel von 180 °.

Tabelle 7: Kennzahlen zu verschiedenen Knickmustern

| Knickmuster | Knicklänge l / mm | Knickpunkte |
|-------------|-------------------|-------------|
| O | 0 | 0 |
| A1 / B1 | 391 | 0 |
| A2 / B2 | 522 | 3 |
| A3 / B3 | 783 | 9 |

Für die Barrierefolie (Hanita V08621) sind die Messergebnisse der WDD in Abbildung 29 dargestellt.

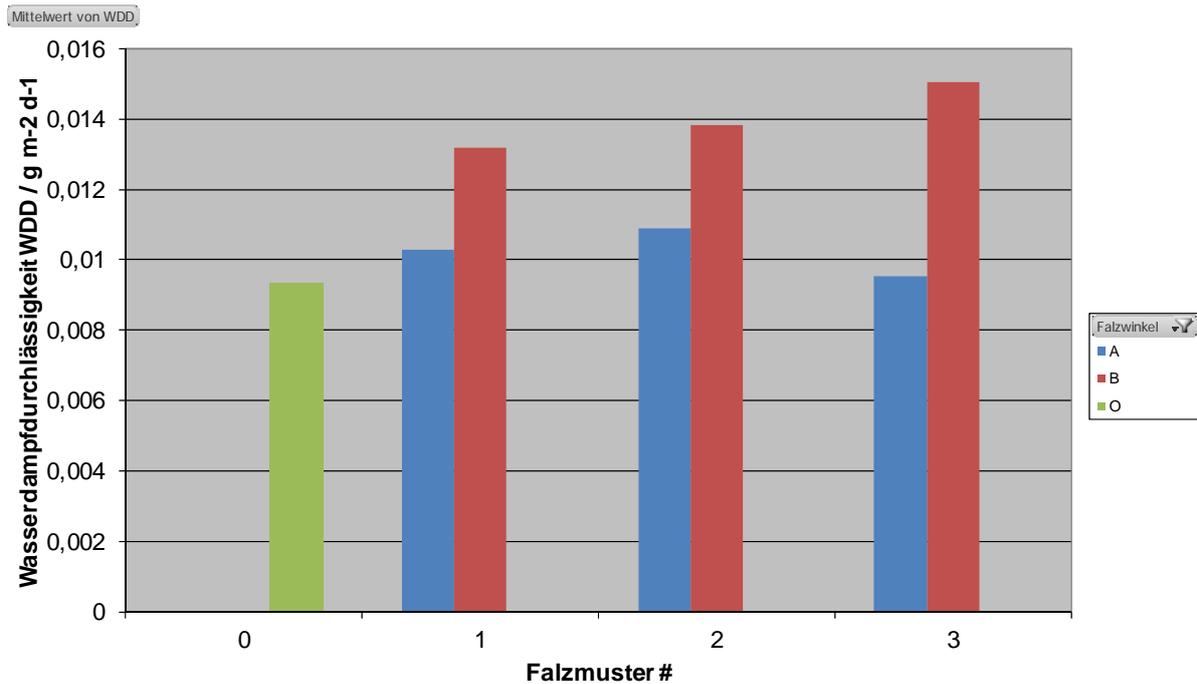


Abbildung 29: WDD vor bzw. nach dem Knicktest einer Barrierefolie (Hanita V08621) bei 38°C, 90%r.F.

Die Messungen der Knicktests wurden über einen Zeitraum von 3 Monaten durchgeführt. Gemessen wurden jeweils 3 Proben pro Knickmuster. Die Messdaten können in tabellarischer Form im Anhang gefunden werden. Wie aus Abbildung 29 zu erkennen, liegen die WDD der Typ B Proben über denen der Typ A Proben und der Probe ohne Knickstellen. Dies gilt auch für Messungen, bei denen Typ A und Typ B direkt nacheinander gemessen wurden, sodass hier eine Signifikanz vorliegt. Eine eindeutige Korrelation mit der Knicklänge lässt sich jedoch nicht feststellen. Typ A mit Knickstellen zeigen nur eine geringfügig höhere WDD als die Probe ohne Knickstellen und mit steigender Knicklänge sogar eine fallende WDD, sodass hier kein signifikanter Unterschied vorliegt, sondern von einem Einfluss der Lagerbedingungen ausgegangen werden muss. Die Messungen wurden mit ähnlichem Ergebnis für die Reuther VIP 270730 wiederholt (siehe Anhang).

Bestimmung der WDD nach Strecktest

Durch das Evakuieren während des Herstellungsprozesses eines VIP entstehen Zugkräfte auf die Barrierefolie. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Beschichtung einer metallisierten Folie ab einer Streckung von 1 % bis 3 % reißt und damit die Durchlässigkeit deutlich ansteigt. Aus diesem Grund wurde die durch den Herstellungsprozess hervorgerufene Längenänderung der Barrierefolie (Hanita V08621) überprüft, indem vorgefertigte Tüten zur Aufnahme des

VIP-Stützkerns mit Messmarkierungen im Abstand von 20 mm versehen wurden und diese nach dem Herstellen des VIP und anschließendem Aufschneiden noch einmal vermessen wurden. Die Messmarkierungen sind bei der in Abbildung 30 dargestellten Tüte 3 an beiden längeren und einer kürzeren Kante aufgebracht.

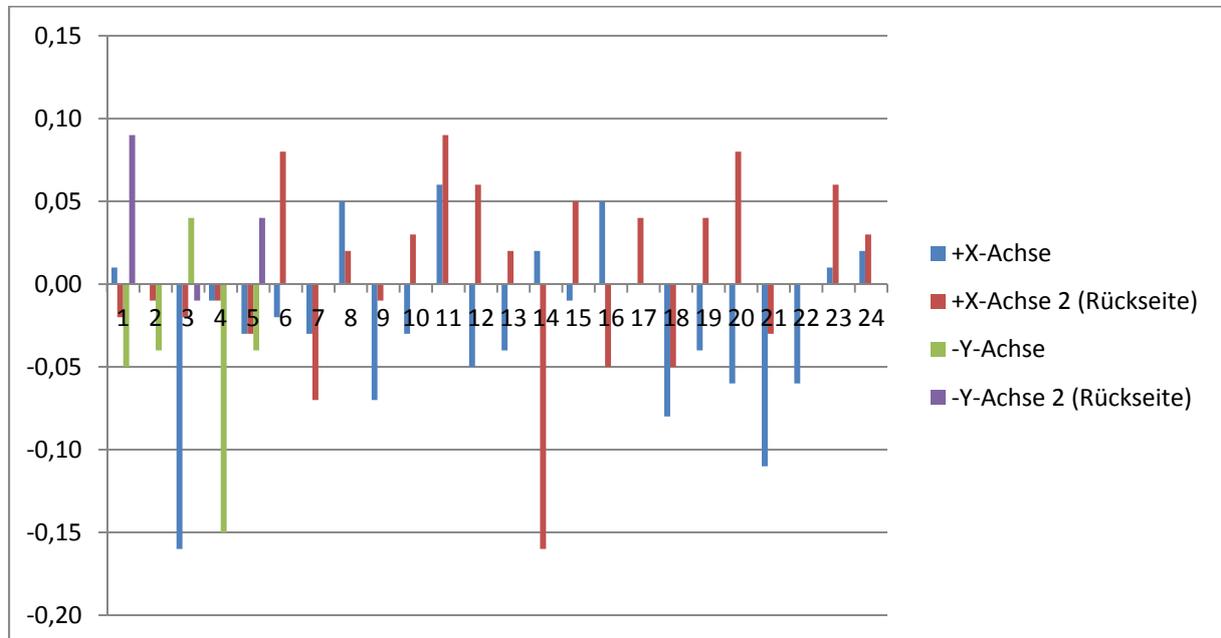


Abbildung 30: Längenänderung von 20 mm Abschnitten verursacht durch VIP-Herstellungsprozess

Tüte 3 zeigt die größten Längenänderungen mit maximal 0,16 mm bzw. 0,8 %. Anschließend wurde die WDD der drei wieder aufgeschnittenen Tüten gemessen.

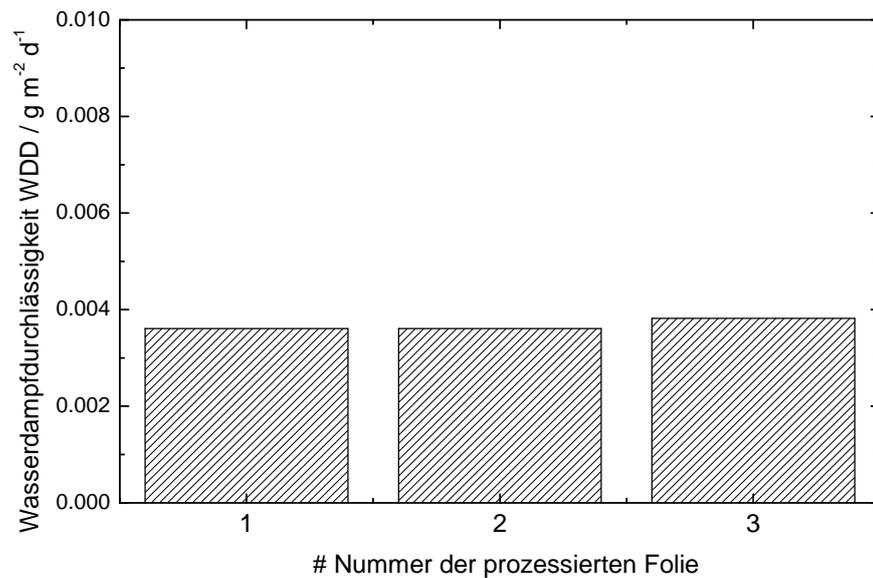


Abbildung 31: gemessene Wasserdampfdurchlässigkeiten nach einer Barrierefolie (Hanita V08621) bei 38 °C und 90 % r. F. nach Prozessieren eines VIP und anschließendem Aufschneiden

Die WDD der prozessierten Proben zeigen mit $3,61 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ bis $3,8 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ unerwartet niedrige Werte, die nicht mit den Lagerbedingungen und der Messzeit erklärt werden können. Vermutlich liegt hier eine Probe aus einer anderen Foliencharge vor.

Lastwechselbeanspruchung

Mit einer Lastwechselbeanspruchung soll das Ermüdungsverhalten und die damit einhergehenden Risse in der Metallisierung untersucht werden. Diese führen zu einer höheren Durchlässigkeit und frühzeitigen Alterung des VIP. Der Testaufbau für die Lastwechselbeanspruchung besteht aus einer festen Einspannung und einer beweglichen Einspannung mit einem Hub von 3 mm (einstellbar) für die Barrierefolie. Aufgrund der geringen Elastizität der Barrierefolie kann durch den Antrieb sowie die Einspannung nicht genügend Kraft für eine Dehnung der Probe entsprechend des eingestellten Hubs aufgebracht werden, sodass die Barrierefolie für eine Lastwechselbeanspruchung mit einem zylinderförmigen Gewicht (260 g) beschwert wurde.

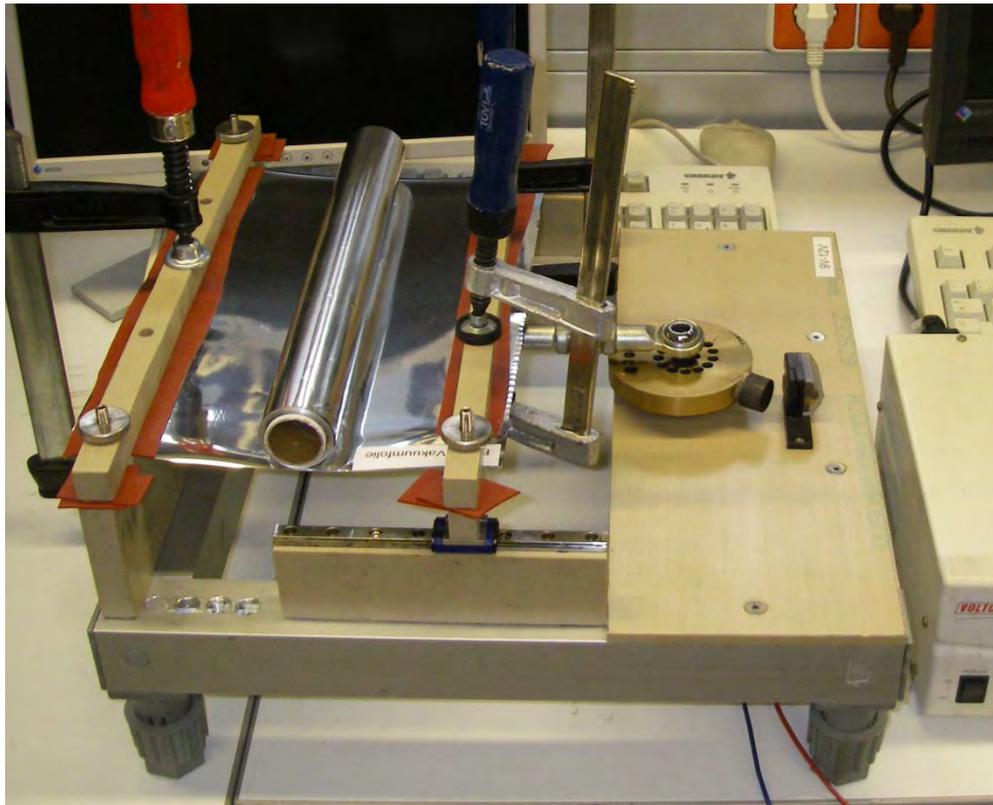


Abbildung 32: Aufbau für Lastwechselprüfung der Barrierefolien für VIP

Durchgeführt wurden WDD Messungen nach 25500 bzw. 164000 Lastwechseln. Die abnehmende WDD mit steigender Zyklenzahl ist wieder auf die Lagerbedingungen zurückzuführen und bedeutet, dass keine signifikante Schädigung der Barrierefolie auftritt.

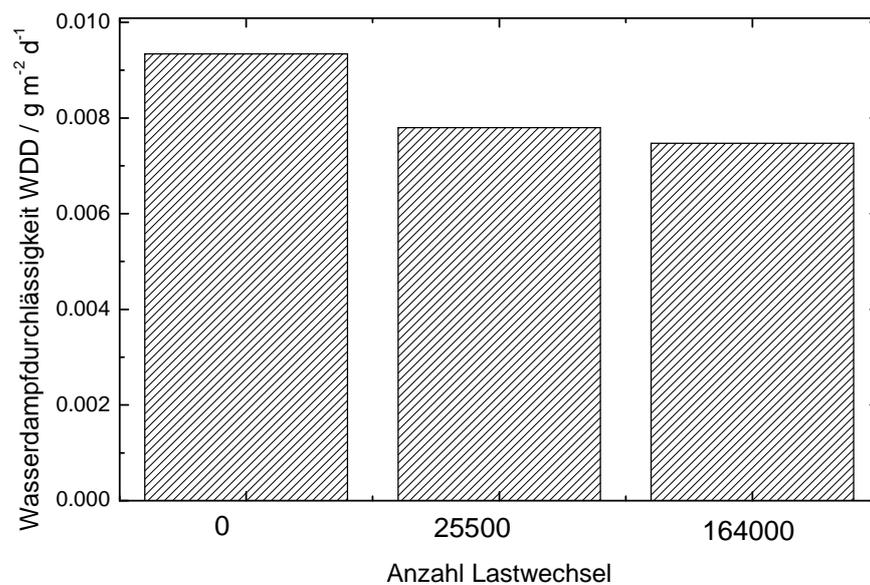


Abbildung 33: gemessene Wasserdampfdurchlässigkeiten nach der Lastwechselprüfung einer Barrierefolie (Hanita V08621); 38 °C, 90% r. F.

6 Siegelnahtmessung

Die Siegelnaht beschreibt den Bereich, an dem zwei Barrierefolien miteinander verklebt oder zusammen laminiert sind. An dieser Füge­stelle existiert pro­zess­bedingt keine schützende Metallisierung und es ergibt sich ein Pfad für das Eindringen von Wasserdampf bzw. anderer Gase, die sogenannte Quer­diffusion. Allgemein wird die Durchlässigkeit durch diese Füge­stelle durch die verwendeten Materialien, deren geometrischen Dimensionen (Höhe und Breite) und deren Verarbeitung (Sauberkeit, Siegeltemperatur, Anpressdruck usw.) bestimmt. Die Charakterisierung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Siegelnaht ist eine messtechnische Herausforderung, da Siegelnähte unterschiedliche Geometrie und Form aufweisen und somit eine Herausforderung bei deren Abdichtung darstellen.

Zunächst wurde eine Variante untersucht, bei der eine Folie innerhalb der Messfläche des Permeationsmesssystems auf eine Trägerfolie laminiert wurde.



Abbildung 34: Probe mit auflaminierten Strukturen zeigt Welligkeit durch Verzug

Aufgrund von Verzug und Welligkeit der Trägerfolie führt diese Variante zu Dichtigkeitsproblemen. Zudem ist die damit erreichbare Siegelnahtlänge stark limitiert und das Verhältnis zwischen Siegelnahtlänge zu Folienfläche nur be-

grenzt einstellbar. Gefordert ist demnach eine Lösung, die flexibel die Untersuchung von Prüfkörpern ermöglicht und dabei die bei VIP auftretenden Kanten, Falzungen und Ecken berücksichtigt. bzw. deren Variationen ermöglicht. Beispielhafte werden in Abbildung 35 Prüfkörper gezeigt, die diesem Anspruch gerecht werden.

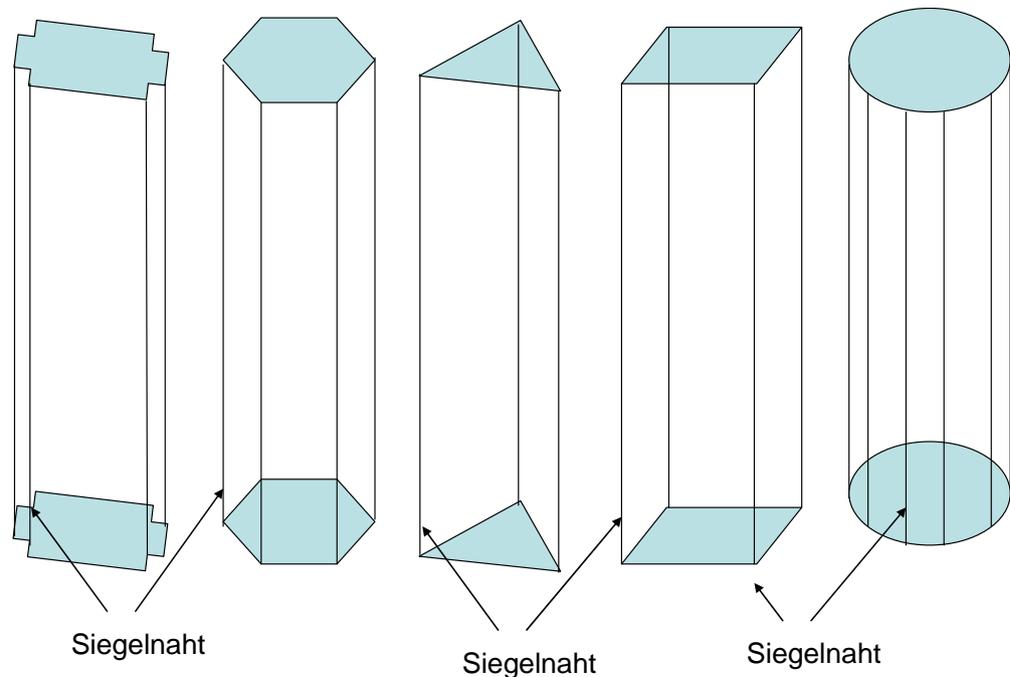


Abbildung 35: Prüfkörper zum Prüfen der Wasserdampfdurchlässigkeit von Siegelnähten

Zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit solcher Prüfkörper müssen zum einen definierte Umgebungsbedingungen eingestellt werden und zum anderen eine zuverlässige Probenahme aus dem Inneren der Prüfkörper gewährleistet werden, ohne dass dadurch das Messergebnis beeinflusst wird.

Als Messverfahren für die Durchlässigkeitsbestimmung der Folientüten kommt wieder das Trägergasverfahren zur Anwendung. Hierzu wird ein Messadapter verwendet, der das Trägergas durch die Folientüte leitet, welches anschließend einer externen Messzelle zugeführt wird. Die Messzelle besteht aus einem 500 mm langen Edelstahlrohr mit einem Innendurchmesser von 4 mm. Durch Minimierung der Messzellenoberfläche und des Messzellvolumens können hier auch bei kleinen Gasflüssen zwischen 3 sccm und 30 sccm sehr kurze Ansprechzeiten erreicht werden. Als Sensor zur Detektion von Wasserdampf wird wieder ein Laserdiodenspektrometer eingesetzt.

Um die Umgebungsbedingungen (relative Feuchte und temperatur) auch für große Proben gezielt einstellen zu können befindet sich die die Folientüte und der Messadapter in einem Klimaschrank.

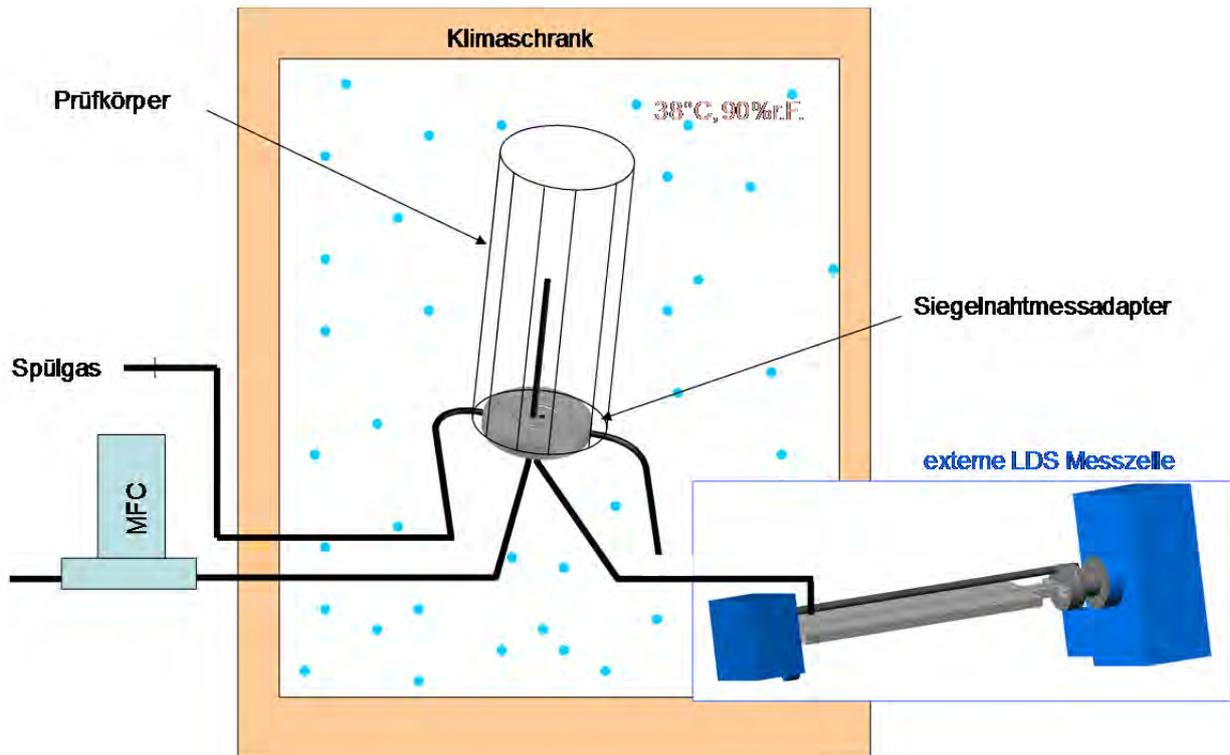


Abbildung 36: Prinzipskizze des Messaufbaus zur Siegelnahtuntersuchung

Zur Abdichtung der Prüfkörper am Messadapter wird wieder das bewährte Prinzip der aktiven Dichtung mit zwei umlaufenden gespülten Kanälen angewendet (vgl. Abschnitt 4.2). Der für die Dichtung notwendige flächige Anpressdruck im Dichtungsbereich kann aufgrund des geschlossenen Prüfkörpers nicht von oberhalb aufgebracht werden. Stattdessen wird im inneren des Formkörpers auf einer ebenen Folienfläche eine Stahlscheibe mit zentraler Bohrung fixiert. Diese Bohrung deckt sich mit einer runden Öffnung im Prüfkörper durch die der Messadapter das Trägergas ein- bzw. ausleitet. Die Oberfläche des Siegelnahtadapters ist geschliffen. Zum Ausgleich kleinerer Oberflächenfehler wird zwischen Prüfkörper und Messadapter ein dünner Film Vakuumfett aufgetragen. Die Anpresskraft des Stahlrings gegen den Messadapter wird von 10 NdFeB Magnete mit einer Haltekraft von je 58 N aufgebracht. Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen das Dichtungsprinzip und den Messadapter für die Siegelnahtprüfung.

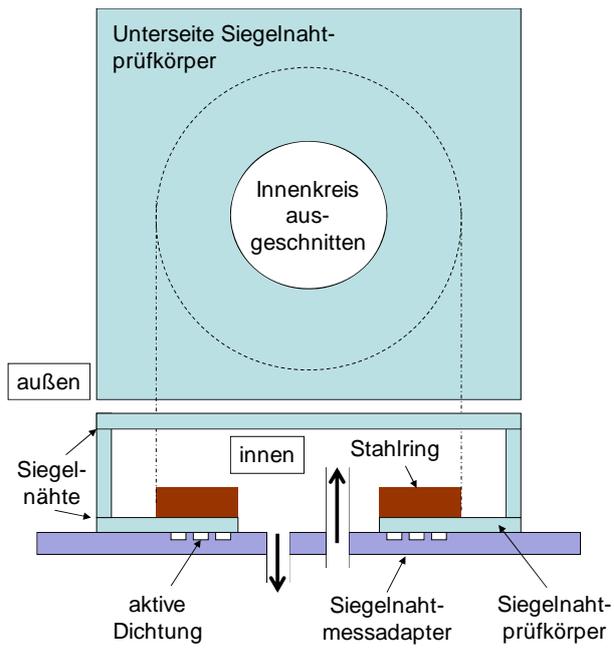


Abbildung 37: Prinzipskizze zur Abdichtung von Prüfkörpern



Abbildung 38: Messadapter für die Siegelnahtprüfung

Für die Siegelnahtprüfung wurden von der Firma VARIOTEC GmbH & Co. KG drei Prüfkörper angefertigt.



Abbildung 39: Vorderseite Siegelnahtprüfkörper



Abbildung 40: Rückseite Siegelnahtprüfkörper

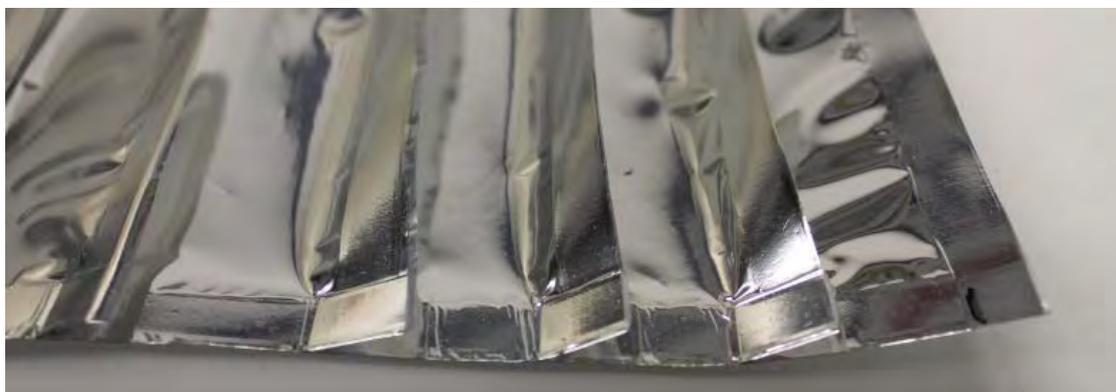


Abbildung 41: Falzungen und Ecken eines Siegelnahtprüfkörpers im Detail

Für die Prüfkörper wurde die Barrierefolie Hanita V08621 gewählt. Die Siegelnahtbreite beträgt 10 mm. Weitere Parameter der Siegelnahtprüfkörper zeigt Tabelle 8:

Tabelle 8: Parameter der Siegelnahtprüfkörper, * Oberfläche A der Siegelnahtprobe abzüglich Adapterfläche

| | | Siegelnahtprobe I | Siegelnahtprobe II | Siegelnahtprobe III |
|---------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| lange Siegelnähte | Anzahl | 11 | 11 | 11 |
| | Länge l / mm | 470 | 487,5 | 495 |
| kurze Siegelnähte | Anzahl | 2 | 2 | 2 |
| | Länge l / mm | 295 | 290 | 300 |
| Kickstellen 90° | Anzahl | 36 | 36 | 36 |
| Kickstellen 0° | Anzahl | 4 | 4 | 4 |
| gesamte Siegelnaht | Fläche* / m² | 0,268 | 0,273 | 0,287 |
| | Länge l / m | 5,760 | 5,943 | 6,045 |
| WDD @38°C RH90% | | 0,0211 | 0,0212 | 0,1674 |

Die Siegelnahtlänge der Probekörper entspricht ca. dem 6-fachen der Siegelnahtlänge des in dieser Arbeit definierten Standard Vakuum Isolationspaneels (500 x 500 x 20) während die Oberfläche ca. halb so groß ist.

Die Siegelnahtproben I und II zeigen gegenüber der Ausgangsfolie eine um 26 % höhere WDD. Da diese höhere Durchlässigkeit nicht auf die Lagerbedingungen zurückgeführt werden kann, liegt hier entweder eine Querdiffusion durch die Siegelnaht oder eine Beschädigung z.B. an den Ecken des Probekörpers vor. Zudem ist die Herstellung eines solchen Probekörpers fertigungstechnisch anspruchsvoller als ein Standard VIP. Mit den Ergebnissen der Voruntersuchungen erscheint eine Beschädigung der Folie an den Knickpunkten als die wahrscheinlichste Ursache.

Die Siegelnahtprobe III zeigt gegenüber der Ausgangsfolie keine erhöhte WDD. Eine Beschädigung ist daher auszuschließen. Abbildung 42 zeigt die Messkurve der Siegelnahtprobe III sowie deren t80, t90 und t95 Ansprechzeiten. Die hier ermittelten Antwortzeiten liegen geringfügig über den in Abschnitt 5.2 ermittelten Zeiten.

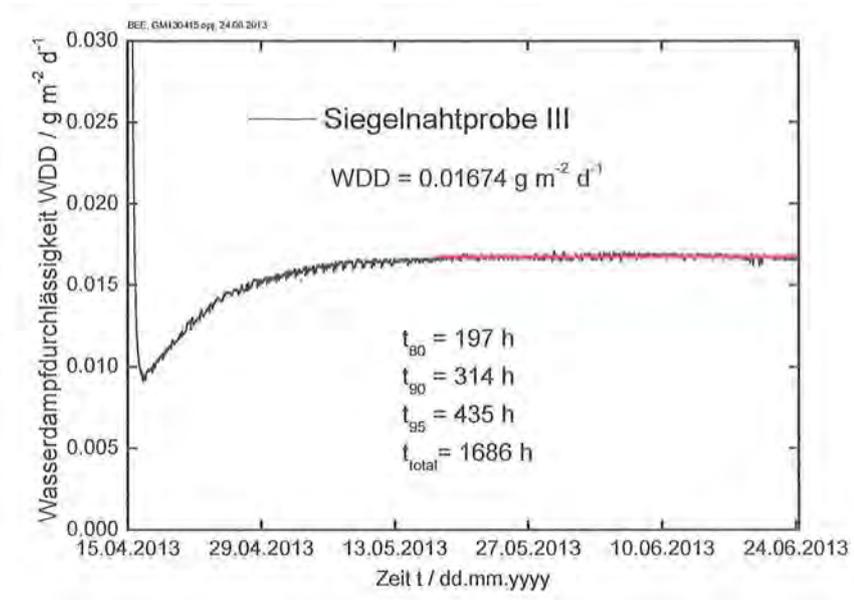


Abbildung 42: Wasserdampfdurchlässigkeitsmessung der Siegelnahtprobe III bei 38 °C und 90 % r.F.

Für das Ableiten allgemeingültiger Aussagen zum Beitrag der Permeation durch die Siegelnähte wird eine größere repräsentative Anzahl an Messungen benötigt, die noch gewonnen werden muss. Zudem müssen zur Trennung der Einflüsse von Flächenpermeation, Knickstellen und Siegelnahtpermeation die Parameter der Prüfkörper unabhängig voneinander variiert werden.



Abbildung 43: Prüfkörper mit Siegelnahtmessadapter in Klimaschrank

7 Ermittlung der Wärmebrückeneffekte der Paneelränder mit den untersuchten Folien

Die Ψ -Werte der Wärmebrücken nehmen (bei identischer Ausbildung der Wärmebrücke) mit zunehmendem Wärmedurchlasswiderstand der Konstruktion ab, ihr Anteil am Wärmeverlust nimmt jedoch zu. Dies ist in den folgenden beiden Abbildungen anhand der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Paneelen unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Dicke dargestellt. Die Darstellung erfolgt getrennt für die beiden untersuchten Folientypen. Deutlich wird die Abhängigkeit der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von der Plattengröße – oder präziser - von dem Verhältnis aus Umfang und Fläche des betrachteten Paneels. Für kleine Plattenabmessungen erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit mitunter beträchtlich. Die Variation der Dicke zeigt den zunehmenden Einfluss der Wärmebrücken-Problematik bei sehr gut gedämmten Konstruktionen. Für dicke Platten (hier bis 40 mm Paneeldicke) ergeben sich größere Erhöhungen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Wärmebrücken-Effekte.

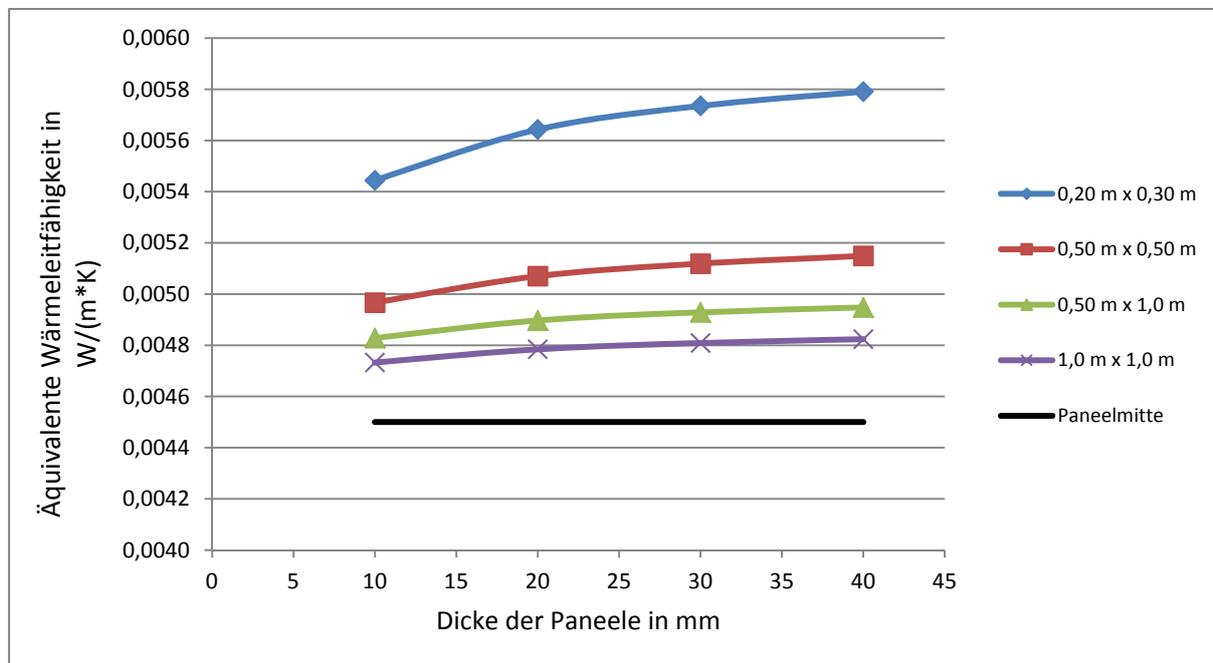


Abbildung 44: Rexor CIV 8 C 90: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Paneelen unterschiedlicher Abmessungen - aufgetragen über der Nenndicke der Paneele

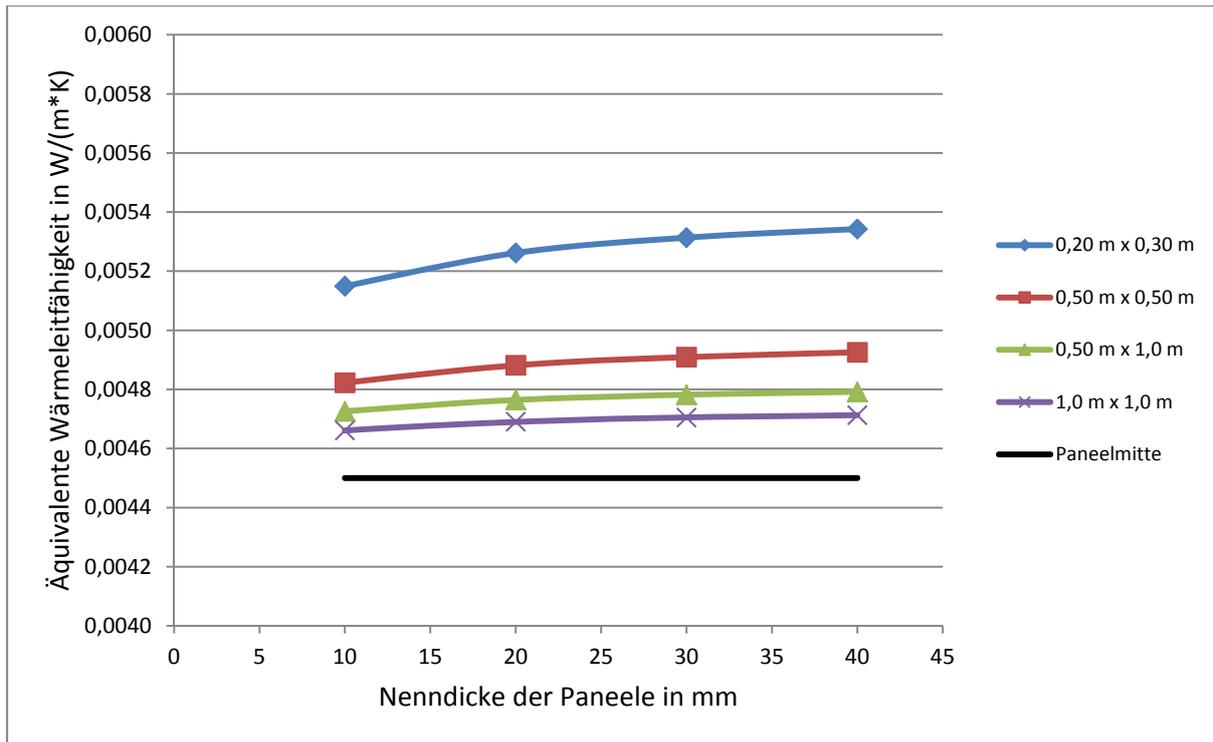


Abbildung 45: Hanita V08621: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Paneelen unterschiedlicher Abmessungen - aufgetragen über der Nennstärke der Paneele

Der starke Einfluss der Paneelgröße auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit lässt sich anhand eines Koeffizienten U/A für die Paneelgröße (Umfang in m geteilt durch die Fläche in m^2) darstellen. Kleine Werte für U/A entsprechen großen Paneelen und damit einem kleinen Anteil der Rand-Wärmebrücken. $U/A = 3,0$ entspricht hier beispielsweise den Paneelabmessungen 2 m x 1 m. $U/A = 10,0$ entspricht einem Paneel der Abmessungen 0,4 m x 0,4 m. Wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit für mehrere Paneeldicken über diesem Koeffizienten aufgetragen, ergeben sich für bauübliche Abmessungen und Paneele mit normalen Seitenverhältnissen annähernd lineare Zusammenhänge. Nachfolgend ist die äquivalente Wärmeleitfähigkeit für die beiden Folientypen getrennt über dem Koeffizienten U/A aufgetragen.

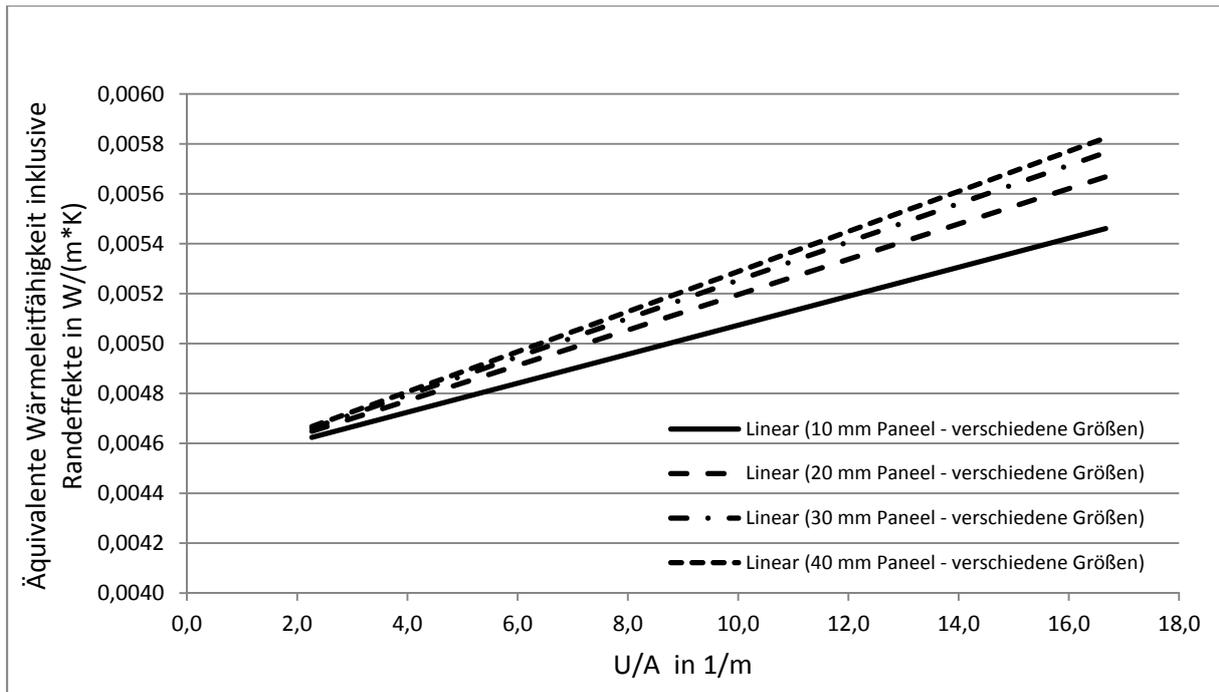


Abbildung 46: Rexor CIV 8 C 90: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit (inklusive Randeﬀekte) der Paneele unterschiedlicher Nenndicke, aufgetragen über dem Koeffizienten aus Umfang und Fläche der betrachteten Paneele.

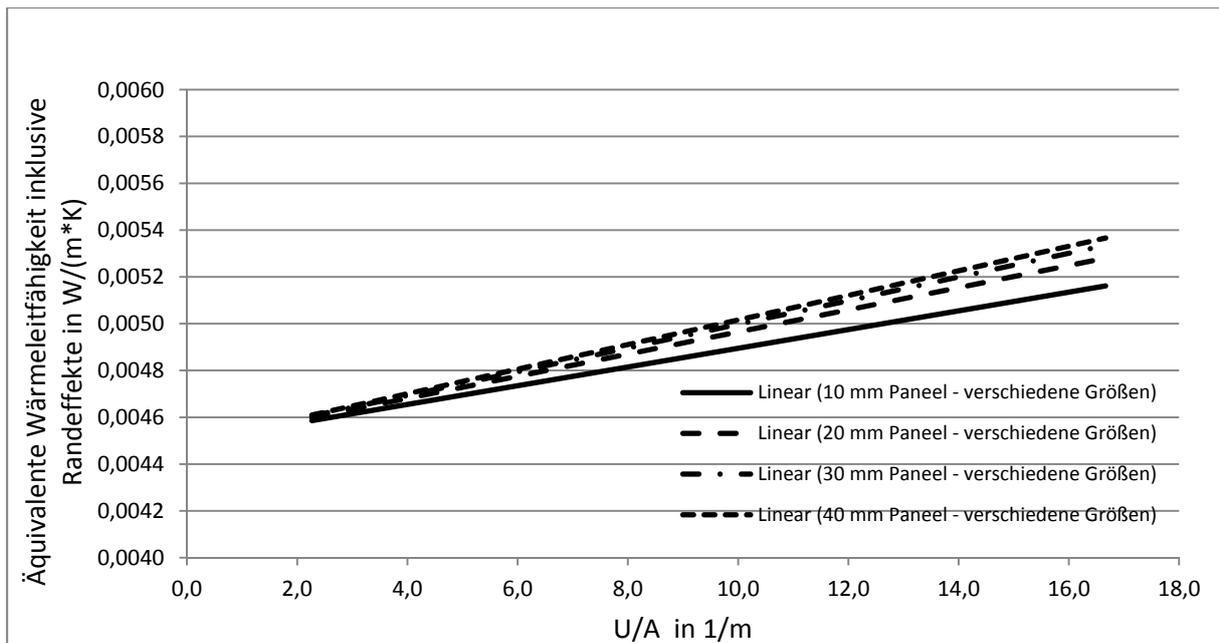


Abbildung 47: Hanita V08621: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit (inklusive Randeﬀekte) der Paneele unterschiedlicher Nenndicke, aufgetragen über dem Koeffizienten aus Umfang und Fläche der betrachteten Paneele.

Die Barrierefolie Hanita V08621 zeigt etwas kleinere Wärmebrückenwirkungen und erhöht somit den Wärmedurchgang durch die aus ihr hergestellten Paneele weniger als die Rexor Folie CIV 8 C 90. Hier wirkt sich die Dicke der Barrierschichten aus Aluminium direkt aus. Die Rexor Folie weist mit insgesamt ca. 240 nm Aluminium mehr als doppelt so viel Aluminium im Querschnitt auf wie die Hanita V08621. Der Aufbau der Kunststoffschichten ist bei beiden Folien ähnlich. Diese sind auch nur unerheblich am Wärmetransport

beteiligt. Beide Folien sind aus wärmetechnischer Sicht für die Produktion von VIP für den Baubereich geeignet.

Für die im Baubereich übliche Paneel-Abmessung 1,0 m x 0,5 m wird die Verminderung des in Paneelmitte eindimensional berechneten Wärmedurchlasswiderstands nachfolgend für die beiden untersuchten Folientypen verglichen. Schon für dünne Paneele führt die Wärmebrückenwirkung der Ränder hier zu einer Verminderung der Wärmedurchlasswiderstände von 5 bzw. 7 Prozent. Die Wärmebrückenwirkung metallisierter Kunststoffschichten in Barrierefolien für die VIP Herstellung muss in der Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Paneele berücksichtigt werden. Sie kann auch für dünne Paneele und hochwertige, metallisierte Folien nicht vernachlässigt werden.

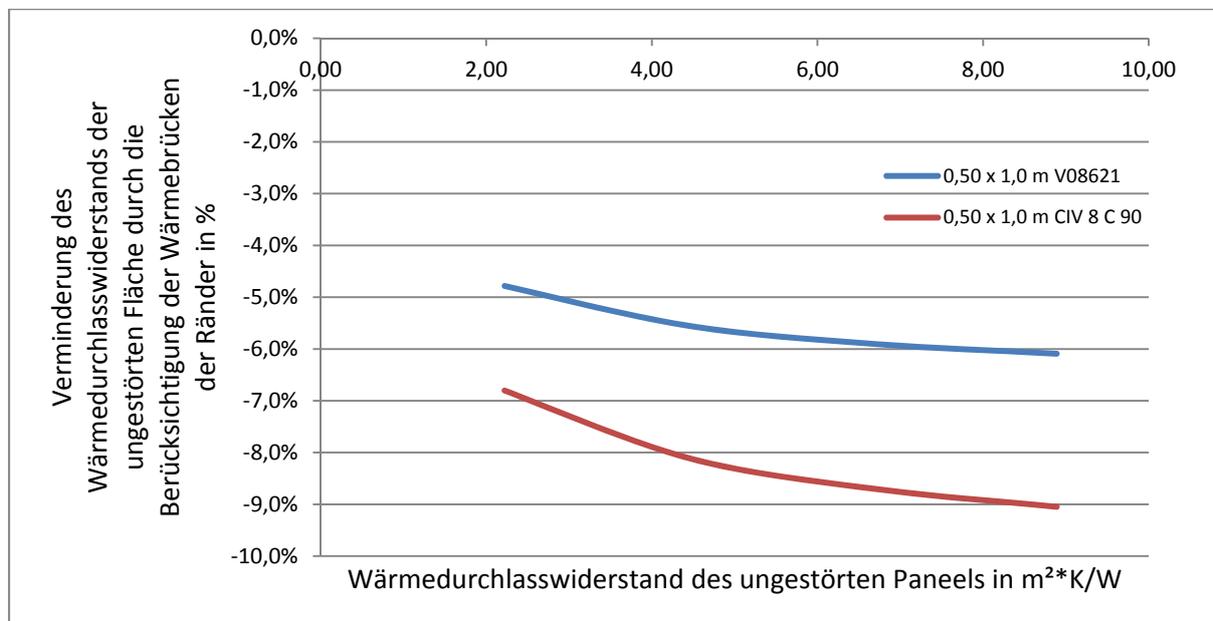


Abbildung 48: Verminderung des Wärmedurchlasswiderstands der ungestörten Fläche durch die Berücksichtigung der Wärmebrücken der Ränder in Prozent. Dargestellt sind Paneele der Abmessungen 1,0 x 0,5 m aus beiden untersuchten Folien.

8 Rückschlüsse auf den Druckanstieg im VIP und die Wärmeleitfähigkeit

An dieser Stelle sollen die ermittelten Wasserdampfdurchlässigkeiten und deren Temperaturabhängigkeit genutzt werden, um den Druckanstieg in VIP vorherzusagen. Dazu wurde auf Wetterdaten aus den letzten 8 Jahren von der privaten Messstation Friedberg in Hessen zurückgegriffen [25].

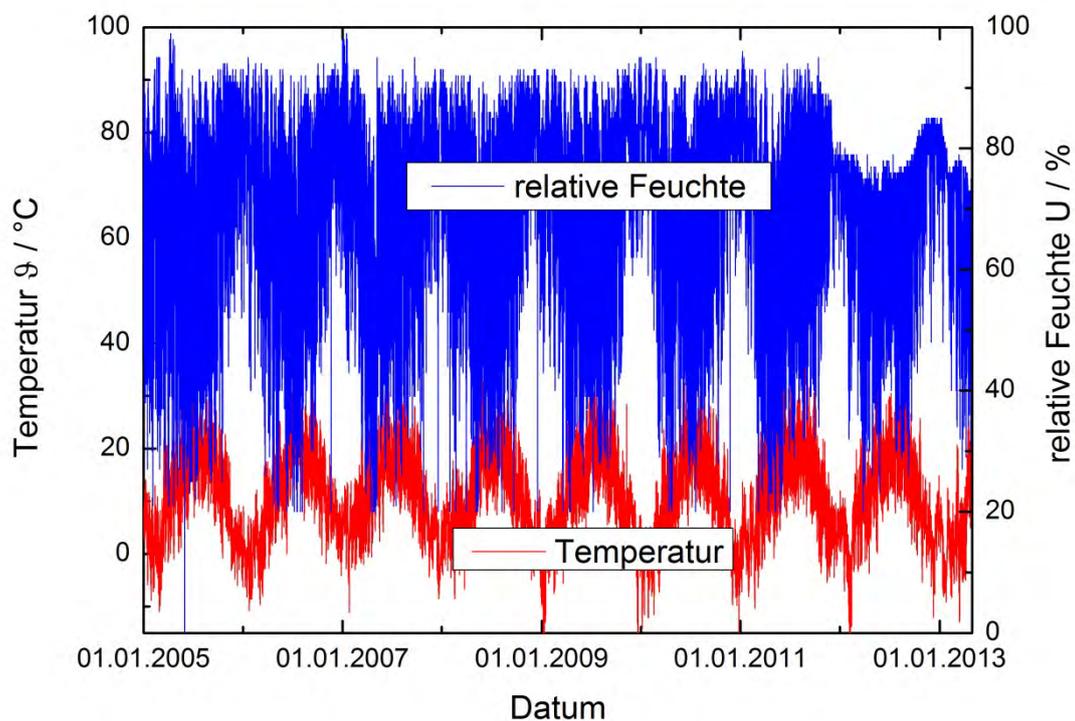


Abbildung 49: Temperatur- und relative Feuchtwerte gemessen über die letzten 8 Jahre an der Wetterstation Friedberg (Hessen)

Aufgenommen wurden diese Wetterdaten mit der Wetterstation ELV WS3000 und dem Außensensor S 2000 A. Der Sensor befindet sich im Abstand von ca. 10 cm an einer verklankerten Fassade. Weitere Aufstellungsdaten sind nicht bekannt.

Berechnet werden soll zunächst der Druckanstieg für ein VIP der Größe 500 x 500 x 20 mm³. Dieses besitzt eine Oberfläche von 0,54 m² und ein Volumen von 5 Litern. Vereinfacht wird das gesamte Volumen ohne die Verdrängung durch das Stützkernmaterial (Porosität → ∞) zur Berechnung angenommen. Grundlage für die Berechnung bildet weiterhin die in Abbildung 22 bestimmte Temperaturabhängigkeit der Permeance der Hanita V08621Barrierefolie.

Aus der Temperaturabhängigkeit der Permeance wird der temperaturabhängige Wasserdampfmassenstrom $\dot{m}(t)$ berechnet:

$$\dot{m}(t) = P \cdot A \cdot \frac{p_{H_2O}}{133,322} \quad (8.1)$$

Durch Integration des Wasserdampfmassenstroms erhält man die Masse des in das VIP eingedrungene an Wasserdampfes. Diese lässt sich mit den gegebenen Dimensionen in einen Druckanstieg umrechnen (rote Messkurve in Abbildung 50).

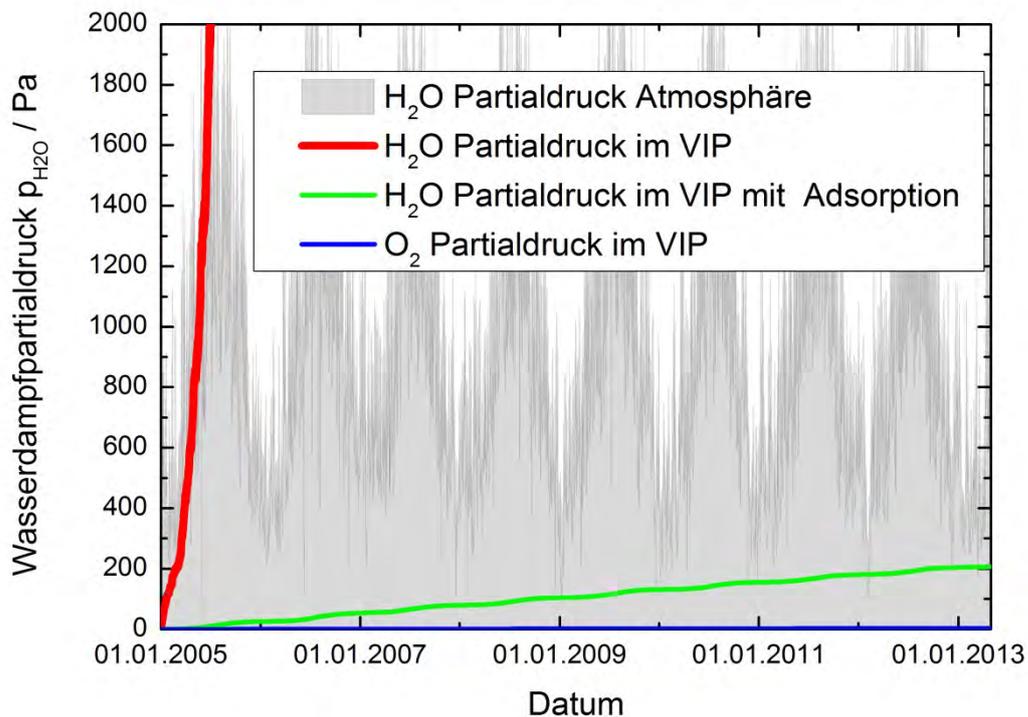


Abbildung 50: Simulation des Druckanstieges in einem VIP

Nach dieser Berechnung würde der Wasserdampfpartialdruck im VIP bereits nach einem halben Jahr den außen anliegenden Wasserdampfpartialdruck erreichen. Vereinfachender Weise wurde bei dieser Berechnung der abnehmende Partialdruckgradient durch den Anstieg des Partialdruckes im Inneren des VIP vernachlässigt, sodass real eine längere Zeit bis zum Erreichen des äußeren Partialdruckes angenommen werden muss. Der Wasserdampfpartialdruck im Inneren des VIP kann durch Permeation den bis dahin erreichten maximalen äußeren Wasserdampfpartialdruck nicht überschreiten. Weiterhin kann der Wasserdampfpartialdruck den durch die aktuelle Temperatur bestimmten Wasserdampfsättigungsdruck nicht überschreiten. Unterschreitet die Temperatur im VIP den Taupunkt kommt es zur Kondensation von Wasserdampf.

Vereinfacht wird weiterhin angenommen, dass die Wasserdampfdurchlässigkeit eine hohe Dynamik, d.h. kurze Durchbruchzeit besitzt um dem Temperaturverlauf direkt zu folgen. Da durch eine real geringere Dynamik die Messkurve geglättet wird, ergibt sich für eine Integration der eingetragenen Wassermasse keine wesentliche Änderung. Zu erwähnen ist bei dieser vereinfachten Rechnung weiterhin, dass der angenommene Temperaturverlauf nicht repräsentativ für die Fassadenanwendung ist. Erstens können durch Sonneneinstrahlung deutlich höhere Temperaturen unterhalb der Fassade auftreten und zweitens sind die Oberflächen des VIPs unterschiedlichen Temperaturen und Feuchten ausgesetzt. Die Rechnung soll dennoch mit den hier gewählten Parametern fortgesetzt werden, um ein Verständnis des Einflusses der Wasserdampfpermeation auf den Druckanstieg im VIP zu erhalten.

Der hier berechnete Druckanstieg im VIP liegen jedoch deutlich oberhalb gemessener Druckanstiege [3]. Ursache für diese Diskrepanz ist das Vernachlässigen der Wasserdampfadsorption am Stützkernmaterial. Für die Berücksichtigung der Adsorption muss zunächst die Adsorptionsisotherme der pyrogenen Kieselsäure bestimmt werden. Gemessen wurde die Adsorptionsisotherme mit dem HydroSorb Instrument von Quantachrome. Die Probe hatte ein Gewicht von 0,1397 g und wurde bei 150 °C für 48 Stunden ausgeheizt. Anschließend wurde folgende Adsorptionsisotherme bei 25 °C aufgenommen.

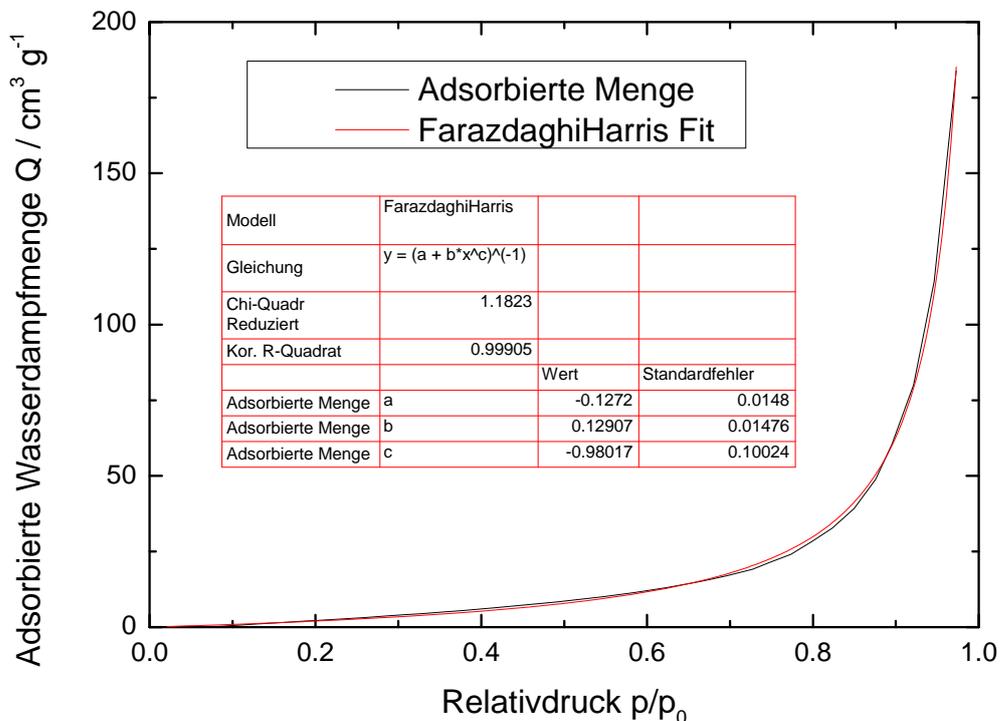


Abbildung 51: Adsorptionsisotherme von pyrogenen Kieselsäure bei 25 °C

Die Messpunkte der Adsorptionsisotherme können mit der empirisch ermittelten Farazdaghi-Harris Funktion beschrieben werden. Mit Hilfe dieses funktionalen Zusammenhangs lässt sich die permeierte Wassermenge in den durch Wasserdampf verursachten Druckanstieg im VIP umrechnen. Dafür wird vereinfachend angenommen, dass die gesamte Wasserdampfmenge am Kernmaterial adsorbiert wird und sich der Wasserdampfpartialdruck davon ableitet. Der damit berechnete Druckanstieg ist in der grünen Kurve in Abbildung 50 gezeigt. Nach 8 Jahre wird hier ein Wasserdampfpartialdruck von 2 mbar errechnet, der auch im Winter noch unterhalb des außen anliegenden Wasserdampfpartialdruckes liegt. Eine Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalts wurde in [26] mit einem Anstieg $\delta\lambda/\delta X_{H_2O}$ von $0,5 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} (\text{M}\text{-}\%)^{-1}$ gezeigt. Nutzt man diesen Zusammenhang ergibt sich über die Simulationsdauer der in Abbildung 52 gezeigte Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von $0,023 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

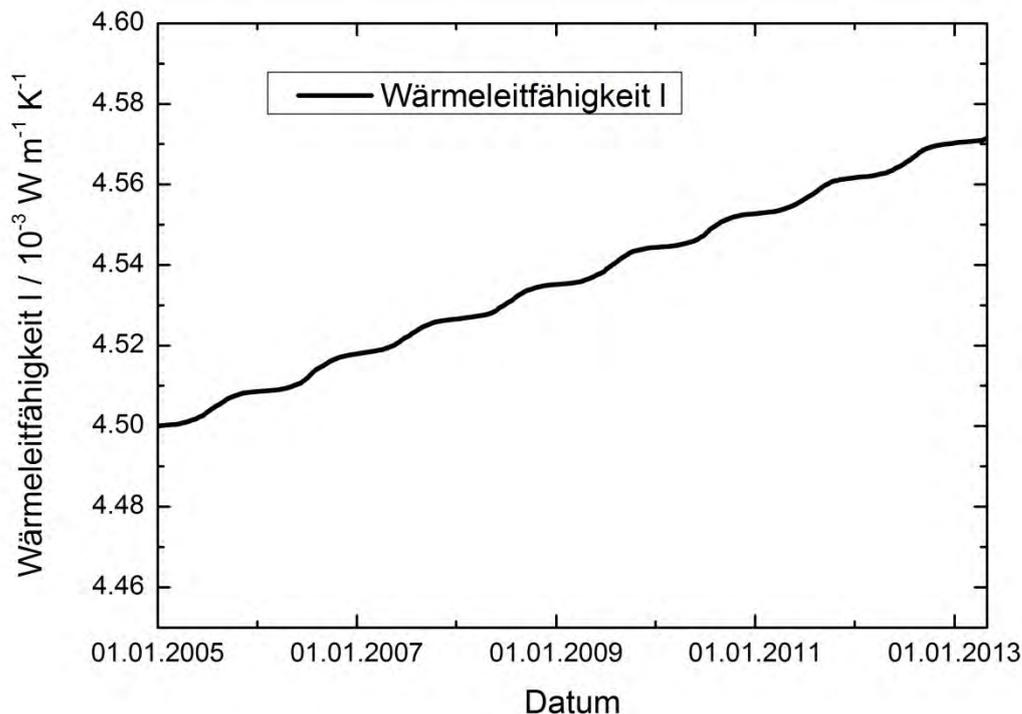


Abbildung 52: Berechneter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit aufgrund von Wasserdampfpermeation unter Verwendung des Zusammenhangs zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt aus [26]

Folglich ist bei Verwendung von pyrogener Kieselsäure als Stützkernmaterial der Anstiege der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der H_2O -Flächenpermeation durch die verwendete Barrierefolie nahezu zu vernachlässigen. Relevant wird dieser erst für Anwendungen bei höherer Temperatur und Luftfeuchtigkeit oder anderen Stützkernmaterialien mit geringerer Wasseradsorption.

Anstiege der Wärmeleitfähigkeit nach der Alterung bei 23°C und 80% r.F. wurden von Sprengard ([3] Abbildung 27) mit $0,1 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gemessen. Nimmt man diese Umgebungsbedingungen als Grundlage für die Simulation, so erhält man für die Barrierefolie Hanita V08621 $0,03 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Dieser Unterschied mit dem Faktor 3 kann plausibel durch unterschiedlichen Folien und Folienqualitäten erklärt werden.

Nimmt man hingegen einen für VIP kritischer Druck von 10 mbar an, bevor die Wärmeleitfähigkeit stark ansteigt, so wird dieser Druck extrapoliert aus dem Wasserdampfdruckanstieg in Abbildung 50 erst nach $10 / 2 * 8$ Jahren = 40 Jahren erreicht. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass zwischen- und im Winter auch eine Permeation von Wasserdampf aus dem VIP auftreten kann und dass die Isotherme nicht linear, sondern nach oben gewölbt (Abbildung 51) ist, d.h. eine höhere Aufnahme bei größerer Gasfeuchte zeigt. Weiterhin in Abbildung 50 eingezeichnet ist der durch die Sauerstoffpermeation durch die Barrierefolie (Hanita V08621) verursachte Druckanstieg. Die Temperaturabhängigkeit ist hier nicht bekannt, sodass die im Datenblatt angegebene temperaturunabhängige Sauerstoffdurchlässigkeit bei 23°C verwendet wurde. Da Sauerstoff kein kondensierbares Gas ist wurde zunächst von keiner Adsorption im Stützkernmaterial ausgegangen. Aufgrund der Porengrößen im Stützkernmaterial ist jedoch auch hier eine geringe Adsorption wahrscheinlich. Der berechnete Druckanstieg durch Sauerstoff beträgt nach der Simulationszeit 0,035 mbar und liegt damit deutlich unterhalb des durch Wasserdampf verursachten Druckanstieges.

9 Zusammenfassung

Für die zur Herstellung von Vakuuminisulationspaneelen werden robuste und langzeitstabile Barrierefolien mit geringer Wärmeleitfähigkeit und Durchlässigkeit gefordert. Besonders kritisch ist dabei die Wasserdampfdurchlässigkeit. Folglich werden hier abhängig vom Stützkernmaterial, der gewünschten Lebensdauer und den Einsatzbedingungen Wasserdampfdurchlässigkeiten kleiner $0,1$ bis kleiner $10^{-4} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ gefordert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Messtechnik zur Prüfung der Wasserdampfdurchlässigkeit weiterentwickelt, die den Nachweis von Wasserdampfdurchlässigkeiten bis $10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ermöglicht. Mit dieser Messtechnik wurden ausgewählte zwei und dreifach metallisierte Barrierefolien untersucht. Unter tropischen Bedingungen (38°C , 90% r.F.) wurden für diese Barrierefolien Wasserdampfdurchlässigkeiten im unteren $10^{-2} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ Bereich ermittelt. Anschließend wurden diese Barrierefolien nach der DIBt-Methode thermisch gealtert und eine repräsentative Anzahl an Barrierefolien nach verschiedenen Alterungsstufen ($10 - 90$ Tagen $\approx 1 - 10$ Jahren) erneut vermessen. Mit dem 48 h Schnelltest konnte innerhalb der Messunsicherheit für keine Barrierefolie eine signifikante Beeinflussung der Wasserdampfdurchlässigkeit aufgrund von Alterungsprozessen festgestellt werden. Neben der thermischen Alterung wurde der Einfluss von mechanischer Beanspruchung untersucht. Dazu wurden 48 h Schnelltests mit 90° und 180° Falzungen mit und ohne Knickpunkten sowie Versuche mit mechanischer Wechselbelastung mit bis zu 164000 Zyklen durchgeführt. Auch nach diesen mechanischen Beanspruchungen konnte keine signifikante Verschlechterung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Barrierefolien nachgewiesen werden. Lediglich bei den Versuchen mit 180° Falzungen wurden ca. $20 - 40\%$ höhere Wasserdampfdurchlässigkeiten nachgewiesen. Bezieht man diese höhere Durchlässigkeit auf die Knicklänge, ergibt sich für ein VIP der Größe $500 \times 500 \times 20 \text{ mm}^3$ noch eine um $2,6\%$ höhere Wasserdampfdurchlässigkeit. Diese Ergebnisse zeigen, dass die ausgewählten Barrierefolien robust gegenüber den an VIP auftretenden zulässigen Beanspruchungen sind.

Zur Beurteilung der für VIP kritischen Dichtheit von Siegelnähten wurde ein Siegelnahtmessadapter entwickelt. Mit dem Siegelnahtmessadapter sind Pro-

bekörper mit verschiedenen ausgeführten Siegelnähten und Verhältnissen von Siegelnahtlänge zur Folienoberfläche messbar. Hier zeigen erste Ergebnisse einerseits eine um 30 % höhere Wasserdampfdurchlässigkeit für die Probekörper andererseits jedoch keine signifikante Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit durch die stark erhöhte Länge der Siegelnaht. Auf ein VIP der Größe $500 \times 500 \times 20 \text{ mm}^3$ bezogen ergibt sich unter Verwendung der Barrierefolie Hanita V08621 nur eine um 4,4 % höhere Wasserdampfdurchlässigkeit. Weitere Untersuchungen mit anderen Barrierefolien und Siegelparametern sind hier anzustreben.

Anhand der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Barrierefolien ist es - wie gezeigt wurde - möglich, diese Barrierefolien hinsichtlich ihrer Anwendungstauglichkeit für Vakuumisulationspaneele zu evaluieren. Bereits nach wenigen Tagen Messzeit lassen sich Lebensdauern für daraus hergestellte VIP abschätzen. Dabei kann auf den Aufwand einer VIP-Herstellung verzichtet werden. Eine Verwendung der Permeationsmessung zur Eingangskontrolle jeder Foliencharge ist empfehlenswert, da Barrierewerte produktionsbedingten Schwankungen unterliegen. Im durchgeführten Projekt wurde die Temperaturabhängigkeit der Wasserdampfdurchlässigkeit ausgewählter Barrierefolien bestimmt. Es konnte gezeigt werden, wie sich reale Temperaturprofile auf den Druckanstieg im VIP auswirken. Eine entscheidende Rolle bei der Berechnung spielt die Adsorption, die durch Adsorptionsisothermen in der Berechnung berücksichtigt wurden. Anhand der dabei gezeigten Methodik lassen sich für verschieden VIP-Größen und VIP- Stützkernmaterialien die entsprechende VIP-Lebensdauer berechnen. Die durchgeführte Rechnung für ein VIP ($500 \times 500 \times 20 \text{ mm}^3$) mit 3-fach metallisierte Barrierefolie und einem Stützkern aus pyrogener Kieselsäure zeigen einen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Wasserdampfdurchlässigkeit von nur $0,009 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Druckanstieg im VIP maßgeblich, durch die Permeation bestimmt wird. Mit höheren Temperaturen und höheren atmosphärischen Feuchtekonzentrationen steigt die Wasserdampfdurchlässigkeit exponentiell und damit auch der Innendruck im VIP.

10 Ausblick

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht für die Bestimmung der Adsorptionisothermen alternativer Stützkernmaterialien und daraus abgeleiteter Stützkernkerne in Sandwichbauweise. Bezogen auf das Volumen besitzen z.B. Absorber wie Molsieb oder Silikagel eine 30- bis 80-fach höhere Wasseraufnahme, sodass sie als dünne Lagen zusammen mit alternativen Stützkernmaterialien ähnliche geringe Druckanstiege wie pyrogene Kieselsäure erreichen könnten.

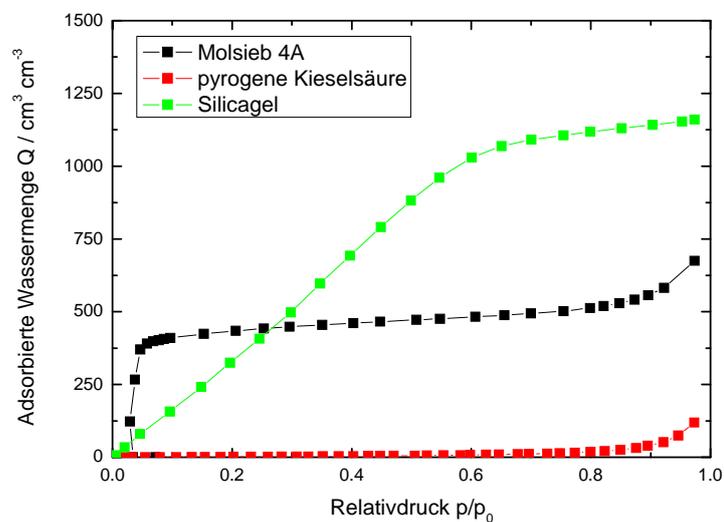


Abbildung 53: Adsorptionisothermen verschiedener Absorber, aufgenommen bei 298 K

11 Formelverzeichnis

| Symbol | Wert | Erläuterung |
|----------------|-----------------------------|---|
| A | m^2 | Probenfläche |
| A_{diff} | m^2 | Querschnittsfläche der Diffusionsstrecke |
| A_{PR} | m^2 | Messzellenoberfläche |
| C | $mol \cdot m^{-3}$ | Stoffmengenkonzentration im Festkörper |
| c | $mol \cdot m^{-3}$ | Stoffmengenkonzentration in der Gasphase |
| D | $m^2 s^{-1}$ | Diffusionskoeffizient |
| D_0 | $m^2 s^{-1}$ | Diffusionskoeffizient bei $T \rightarrow \infty$ |
| E_D | $J mol^{-1}$ | Aktivierungsenergie des Diffusionsprozesses |
| E_P | $J mol^{-1}$ | Aktivierungsenergie des Permeationskoeffizienten |
| H | J | Enthalpie |
| λ^{2D} | $W m^{-1} K^{-1}$ | thermischer Leitwert |
| l | m | Probenstärke |
| M | $g mol^{-1}$ | molare Masse |
| M_{H_2O} | $g mol^{-1}$ | molare Masse von Wasser |
| m | g | Masse |
| \dot{m} | $g d^{-1}$ | Wasserdampfmassenstrom |
| n | mol | Stoffmenge |
| \dot{n} | $mol s^{-1}$ | Stoffmengenstrom |
| P | $g m^{-2} d^{-1} Pa^{-1} m$ | Wasserdampfpermeationskoeffizient |
| \mathcal{P} | $g m^{-2} d^{-1} Pa^{-1}$ | Permeance |
| P_0 | $g m^{-2} d^{-1} Pa^{-1} m$ | Permeationskoeffizient bei $T \rightarrow \infty$ |
| p | Pa | Druck (allgemein) |
| p_0 | Pa | initial vorhandener Wasserdampfpartialdruck |

| | | |
|--------------|--|---|
| p_{H_2O} | Pa | Wasserdampfpartialdruck |
| Q | $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ | adsorbierte Wasserdampfmenge |
| Q | W | Wärmestrom |
| q | W m^{-2} | Wärmestromdichte |
| R | $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$ | Wärmedurchlasswiderstand |
| R_s | $\text{m}^2 \text{K W}^{-2}$ | Wärmeübergangswiderstand |
| S | $\text{g m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$ | Löslichkeit |
| S_0 | $\text{g m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$ | Löslichkeit bei $T \rightarrow \infty$ |
| T | K | absolute Temperatur |
| t | s | Zeit |
| $t_{0.5}$ | s | isostatische Durchbruchzeit |
| t_{50} | h | 50% Antwortzeit |
| t_{90} | h | 90% Antwortzeit |
| U | $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ | Wärmedurchgangskoeffizient |
| V | m^3 | (Gas-) Volumen |
| \dot{V} | $\text{cm}^3 \text{min}^{-1} \equiv \text{sccm}$ | Spülgasfluss / Trägergasfluss |
| WDD | $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | Wasserdampfdurchlässigkeit |
| WDD_{ges} | $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | WDD des Schichtverbundes |
| WDD_j | $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | WDD der Einzelschicht |
| WDD_t | $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ | Wasserdampfdurchlässigkeit |
| x | m | Diffusionsweg |
| z | - | Anzahl der Schichtstapel bzw. der Spezies |
| ΔH_s | J mol^{-1} | Lösungswärme |
| λ | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | Wärmeleitfähigkeit |
| Θ | s | quasi-isostatische Durchbruchzeit |
| ϑ | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatur |
| φ | $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ | Wasserdampfvolumenanteil |
| ψ | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient |

12 Literaturverzeichnis

- [1] BINZ, A. ; ERB, M. ; EICHER, Hans Peter: *Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) im Baubereich*. URL www.vip-bau.ch
- [2] SCHWAB, Hubert: *Vakuumisoliationspaneele : Gas- und Feuchteintrag sowie Feuchte- und Wärmetransport*. Würzburg, Universitätsbibliothek der Universität Würzburg. 2005. URL <http://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/volltexte/2005/1522>
- [3] SPRENGARD, Christoph ; SPITZNER, Martin H.: *Energetische und wirtschaftliche Optimierung von VIP-Paneele : Optimierung der energetischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von VIP-Paneele durch die optimale Kombination von Kieselsäure-, Mineralfaser- und EPS-Dämmstoff*. München, 31.01.2011 (FO-06/08)
- [4] BARRER, R. M.: *Diffusion in and through solids*. Cambridge, England : The University Press; New York : Macmillan, 1941
- [5] CRANK, John: *The mathematics of diffusion*. 2. Aufl. Oxford : Oxford Univ. Press; Clarendon Press, 1975
- [6] MÜLLER, Harald: *Permeation, Diffusion und Gaslöslichkeit*. In: *GIT Labor-Fachzeitschrift* 10/98 (1998), S. 1033–1036
- [7] ROSATO, Dominick V.: *Plastics engineering, manufacturing & data handbook*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2001
- [8] KUMAR, Pankaj: *Effect of Package Configuration on Barrier Properties and Sensory Perception of flavor*. Lansing : Michigan State University, 2007
- [9] PAULY, Stefan: *Physikalische Analytik für das Phänomen: Permeation*. Wiesbaden
- [10] Mocon: *OxyTraQ® Permeation System*. URL <http://www.mocon.com/oxytraq.php>
- [11] Systech Instruments: *Model 8700 brochure*. URL www.systechinstruments.com
- [12] DIN EN ISO 15106-3. Mai 2005. *Kunststoffe-Folien und Flächengebilde Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit-Teil3: Elektrolytnachweis-Sensorverfahren*
- [13] IEA/ECBCS ANNEX 39: *Vacuum Insulation in the Building Sector*

- [14] Hanita: *Product Specifications : Hanita-Folie_Nr.V08621*. URL www.hanitacoatings.com
- [15] BEESE, H.: *HiBarSens: Tunable diode laser spectroscopy for ultra barrier measurement* (Web Coating & Handling Conference 2012). Myrtle Beach, 23.10.2012
- [16] BEESE, Harald: *Reliable determination of the water vapor transmission rate of ultra-high barrier samples in the 10⁻⁴ to 10⁻⁶ g m⁻² d⁻¹ range enabled by tunable diode laser spectroscopy* (SVC TechCon 2013). Providence, 22.04.2013
- [17] DIN EN ISO 483. Februar 2006. *Kunststoffe – Kleine Kammern für die Konditionierung und Prüfung bei konstanter relativer Luftfeuchte über wässrigen Lösungen*
- [18] HEINONEN, Martti: *The CMA humidity standard*. In: *Measurement* 17 (1996), Nr. 3, S. 183–188
- [19] GRAFF, G. L. ; WILLIFORD, R. E. ; BURROWS, P. E.: *Mechanisms of vapor permeation through multilayer barrier films: Lag time versus equilibrium permeation*. In: *Journal of Applied Physics* 96 (2004), Nr. 4, S. 1840
- [20] BBSR: *Anwendung von VIP in der Baupraxis*. Berlin, 31.05.2010
- [21] LANGOWSKI, Horst-Christian: *Flexible Materialien mit ultrahohen Barriereeigenschaften Flexible ultra high barrier materials*. In: *Vakuum in Forschung und Praxis* 14 (2002), Nr. 5, S. 297–302
- [22] DIN EN ISO 10077-2. 2012-06. *Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten; Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen*
- [23] DIN 4108-4. 2013-02. *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und Feuchteschutztechnische Bemessungswerte*
- [24] DIN EN ISO 6946. 2008-04. *Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*
- [25] Wetterstation Friedberg: *Wetterstation Friedberg/Hessen*. URL <http://wetter61169.de/download/>
- [26] RAICU, Alexandra (Hrsg.); NOLLER, Klaus (Hrsg.); GOLDHAN, Gertraud (Hrsg.); PLATZER, Werner (Hrsg.); LANGOWSKI, H.-C (Hrsg.); WITTEW, Volker (Hrsg.): *Entwicklung innovativer Wärmedämmsysteme mit Vakuumisulationspaneelen für Anwendungen am Bau – Planung und Fortschritt im Rahmen eines deutschen Verbundprojektes, 2003*

13 Anhang

Product Specifications (typical values):



| PRODUCT | | V06221 | V07421 | V08621 | V09821 |
|--|--|--|--|--|--|
| Property | Test Methods | | | | |
| Thickness | | 66 [micron] 2.6 [mil] | 80 [micron] 3.15 [mil] | 97 [micron] 3.8 [mil] | 110 [micron] 4.3 [mil] |
| | | 14.9 [m ² /kg] 10490 [in ² /lb] | 9.86 [m ² /kg] 6940 [in ² /lb] | 9.25 [m ² /kg] 6512 [in ² /lb] | 7.9 [m ² /kg] 5562 [in ² /lb] |
| Tensile Strength | ASTM D-882 | MD TD 42 34 [Mpa] 6.1 4.9 [Kpsi] | MD TD 66 64 [Mpa] 9.6 9.3 [Kpsi] | MD TD 84 82 [Mpa] 12.2 11.9 [Kpsi] | MD TD 85 84 [Mpa] 12.3 12.2 [Kpsi] |
| | | | | | |
| Heat Seal Strength | 165°C, 4kg/cm ² , 4sec | 5.0 [N/mm] 12700 [g/in] | 5.0 [N/mm] 12700 [g/in] | 5.0 [N/mm] 12700 [g/in] | >6.0 [N/mm] 15240 [g/in] |
| | | | | | |
| Elongation | ASTM D-882 | MD TD 55 45 [%] | MD TD 60 43 [%] | MD TD 70 53 [%] | MD TD 49 49 [%] |
| | | | | | |
| Lamination (PE to PET) Strength | ASTM D-882 | 1.4 [N/mm] 3590 [g/in] | 1.4 [N/mm] 3590 [g/in] | 1.4 [N/mm] 3590 [g/in] | >1.4 [N/mm] 3590 [g/in] |
| | | | | | |
| Puncture Resistance | FTMS 101C 2065 | 55 [N] 12.4 [lb] | 90 [N] 20 [lb] | 129 [N] 29 [lb] | 164 [N] 37 [lb] |
| O₂TR | ASTM D-3985 23°C 50% RH | <0.055 [cc/m ² day] 0.0035 [cc/100in ² day] | <0.0005 [cc/m ² day] <0.000032 [cc/100in ² day] | <0.0005 [cc/m ² day] <0.000032 [cc/100in ² day] | <0.0005 [cc/m ² day] <0/000032 [cc/100in ² day] |
| | | | | | |
| MVTR | ASTM F1249-90 38°C 100% RH 100°F 100% RH | <0.08 [g/m ² day] <0.0052 [g/100in ² day] | 0.02 [g/m ² day] 0.0013 [g/100in ² day] | <0.01 [gr/m ² day] <0.00065 [g/100in ² day] | <0.01 [g/m ² day] <0.00065 [g/100in ² day] |
| | | | | | |

All products are sold upon condition that purchasers shall make their own tests to determine the suitability of such products for their particular purposes and uses, and that purchasers assume all risks and liability for their results of use the products, including use in accordance with seller's recommendation. Nothing in this bulletin constitutes permission or a recommendation to practice or use any invention by any patent owned by the seller or by others. Any warranty, whether expressed or implied, of merchantability or of fitness for any purpose whatsoever is hereby excluded. Products will meet seller's standard specifications therefore, seller's liability in respect thereof or in connection therewith shall only be as will be set forth in seller's current general terms and conditions for the manufacture and sale of goods.

Kibbutz Hanita 22885 Israel | Tel: +972-4-9859919 | Fax: +972-4-9859920 | hanita@hanitacoatings.com
www.hanitacoatings.com



High Barrier Laminates for Vacuum Insulation Panels

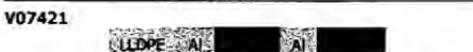


Description:

Hanita Coatings offers a premium range of ultra high barrier multilayer laminates for the vacuum insulation panel (VIP) market. These polyester and polyethelene laminates are interlayered with high barrier metallization, providing the highest level of protection from permeation of atmospheric gasses and moisture.

Hanita's recent innovative metallization processes have achieved new levels of barrier to gas permeation, reaching MVTR <math><0.01 \text{ gr/m}^2\text{day}</math>, 38°C 100% RH, and an OTR below detection level.

Structure of Laminates:



Key:
 PET - 12 micron polyester
 Al - Vacuum coated Aluminium layer
 LLDPE - Linear Low Density Polyethylene sealing layer

Applications:

- Vacuum Insulation Panels for short-mid term for cold/warm shipping containers.
- Vacuum Insulation Panels for mid-long term refrigeration/heater markets.
- Vacuum Insulation Panels for very long term building and construction industry applications.

Benefits:

- Ultra high barrier, with market leading properties
- Stress resistance—mechanically robust lamination structure
- Improved PE heat seal—very low Oxygen permeation from flanges and improved heat seal strength
- Enhanced metal adhesion—prevents de-metallization breakdown of the laminate
- Negligable thermal bridge
- Superior lamination strength
- Very high resistance to corrosion



FILS ET FILMS METALLOPLASTIQUES

La Feydeière - F-38850 Paladru
 Tel: 33 (0)4 76 32 61 00
 Fax: 33 (0)4 76 32 36 40
 www.rexor.com

TECHNICAL DATA SHEET - INSULATION
 N° T4-FT-064

REXOTHERM CIV 8 C 90

I. DESCRIPTION

CIV is a laminate of three special metallised polyester films with a very high optical density and a polyethylene film, as following indicated:

| |
|-----------------------------|
| Special PET 12µm |
| Aluminium vacuum layer 80nm |
| Aluminium vacuum layer 80nm |
| Special PET 12µm |
| Aluminium vacuum layer 80nm |
| Special PET 12µm |
| PE 50µm |

II. TYPICAL VALUES

| Property | Units | Typical Values | Test Method |
|---|------------------------|----------------|-----------------------------|
| Thickness | µm | 90 +/- 5% | |
| Unit Weight | g/m ² | 103 +/- 5% | |
| Yield | m ² /kg | 9.72 +/- 5% | |
| Breaking strength - MD | daN/mm ² | > 60 | ASTM D 882 |
| Breaking strength - TD | daN/mm ² | > 60 | ASTM D 882 |
| Elongation at break - MD | % | > 60 | ASTM D 882 |
| Elongation at break - TD | % | > 60 | ASTM D 882 |
| Lamination (PE to PET) | cN / 20mm | > 350 | ASTM D 882 |
| Sealing strength PE/PE | cN / 20mm | > 4500 | T=165°C / t = 4s / P = 200N |
| Oxygen permeability (23°C 0-50%HR) | cc/m ² /24h | ≤ 0.05* | ASTM D 3985 |
| Water Vapour Transmission Rate (38°C 90%HR) | g/m ² /24h | ≤ 0.03* | ASTM F 1249 |

(*) below detection level

III. APPLICATIONS

High level of protection from permeation of atmospheric gasses and moisture.
 Vacuum insulation panels for refrigeration and heater markets.
 Vacuum insulation panels for building and construction industry applications.

IV. STANDARD PRESENTATION OF THE ROLLS

- Width : 400 to 1450mm maximum.
- Length: 100ml and multiple.
- PE layer is rewound inside.
- Cardboard core internal diameter: 76mm or 152mm
- **Other possibilities on request.**

V. RECOMMENDATIONS

- Storage: 12 months maximum in standard conditions (20° C, 40 % relative humidity).

This data sheet only contains **indicative** information and illustrative formulas. They are based on our present knowledge of this product and trials and experiments carried out in our laboratory. They will be modified according to the future knowledge we will acquire. The choice of our product is submitted to your own preliminary trials, checking that it corresponds to your end uses and to the **options you will deem necessary to choose.**

Index 02

1/1

December 2010



Lieferadresse

Variotec
Sandwich-Elemente GmbH & Co.KG
Weißmarterstraße 3

D-92318 Neumarkt

Lieferschein

Unsere Lieferantennr. :
Kunden-Aufr.-Nr. : Bemusterung
Kunden-Sachbearb. : Marco Lerzer

Auftrags-Nr. : 5212224/0000

Datum : 01.02.2011
Kundennr. : 32213/0000
Sachbearbeiter : K.-R. Geschwill
Versandart : Spedition
Lieferbed. : Frei Haus
Liefertermin : 03.02.2011
Lieferschein-Nr. : 5411341

Bitte bei Rückfragen immer angeben !!

*Kostenlose Erstbemusterung Vakuumfolie
Gemäß Absprache mit Herrn Geschwill*

Unser Betrieb ist am 03.06.2011 geschlossen! Our company is closed on 03.06.2011!

| Pos. | Artikelnr. | Bezeichnung | Menge | Einh. |
|---|-------------|---|-----------------------|-------------------|
| 1 | 10100000000 | Erstbemusterung Vakuumfolie 36µ PET met./12µ PET met./50µ PE innen gewickelt Breite 1300 mm unbesäumt 1 Rolle mit 760 m Zolltarif-Nr. 76072010 Gewicht Brutto: 148 kg Chargen-Nr. 161677865 Rollen Nr. 8-3808 | 1,00 | ST |
| | | | Netto | 1 kg |
| Täglich von 9-12 Uhr und von 14 - 16.30 Uhr | | | | |
| Dims: 145 x 85 cm | | | | |
| | | | Gesamtgewicht Brutto: | 148 kg Netto 1 kg |

***** ACHTUNG ***** WINTERZEIT *****

Durch extreme Temperaturschwankungen bei der Anlieferung von Blechen und Coils besteht die Gefahr von Schwitzwasser und daher sind besondere Vorkehrungen bei der Einlagerung in Ihrem Hause zu treffen. Wir übernehmen hierfür keinerlei Gewähr.

Braun GmbH Folien-Prägetechnik
Sitz: Graben-Neudorf
Geschäftsführer: C. Braun,
M. Braun, K. Geschwill
Amtsgericht Mannheim, HRB 232025
Ust Id Nr.: DE 812534462
Es gelten unsere bekannten
Liefer- und Geschäftsbedingungen

Ottostraße 16
76676 Graben-Neudorf
Telefon: 0 72 55 / 767 87-11
Telefax: 0 72 55 / 767 87-27
www.braunmetall.de
info@braunmetall.de

Bankverbindung:
Volksbank Bruhörn Kraich Hardt eG
BLZ: 663 916 00 - Konto- Nr.: 20 141 000
IBAN Code: DE 58 663 916 00 00 201 41000
Swift/BIC Code: GENODE 61 ORH
Sparkasse Karlsruhe
BLZ: 660 501 01 - Konto-Nr.: 1 090 004 89
IBAN Code: DE 72 6605 0101 0109 0004 89
Swift/BIC Code: KARSDE66

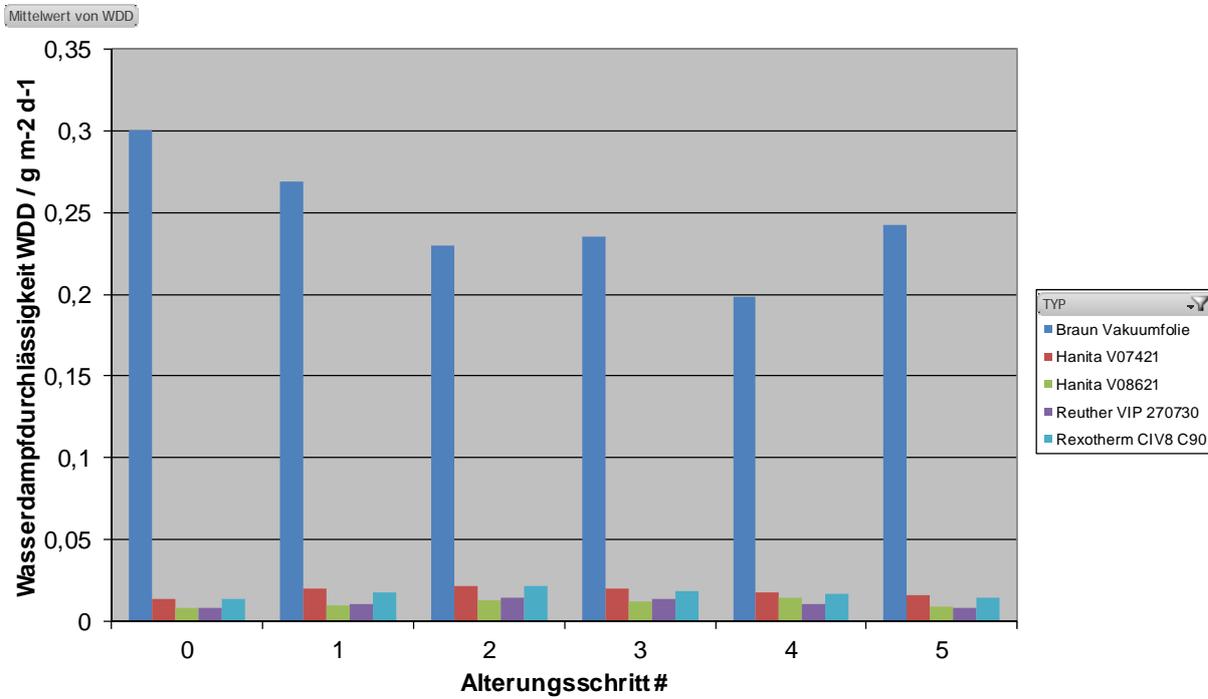
| | | | |
|--|---|--|-------------|
|  REUTHER VERPACKUNG | Specification for flexible packaging materials (reel-material) | | Page 1 of 1 |
| | Date of first issue: 17.09.2010 | | |

| | |
|----------------------------------|---|
| Article/Design: | VIP, 270730 <i>Draft</i> |
| Product: | Laminated reel-material |
| Supplier: | REUTHER VERPACKUNG GMBH & CO. KG, Neuwied |
| Material (s): | Plastic film / Plastic film-Laminate |
| Material composition: | Four ply laminate |
| Dimensions: | reel width: [mm] ± 1 mm inner core diameter: [mm] 76 ± 1 mm |
| Performance of the reels: | Reels to be wound evenly tight to avoid telescoping. Splices to be marked with red tape. |
| Packaging of the reels: | To be specified |
| Marking: | Standard |

| Technical data: | Test method | Unit of measurement | Value |
|-----------------------------------|------------------|--|-----------|
| Thickness | PA 10028 | µm | 98 +10% |
| Weight | PA 10027 | g/m ² | 105 +10% |
| Sealing range | Otto Brugger | °C | 130 – 170 |
| Sealing strength | Reuther Standard | N/15mm | ≥ 30 |
| Bond strength | DIN 53357-A | N/15mm | ≥ 1,5 |
| W.V.T.R (38°C; 90% RH) | ASTM F1249 | g (m ² x d) | ≤ 0,1 |
| O.T.R. (23°C; 85% RH) | ASTM D 3985 | cm ³ / (m ² x d x bar) | ≤ 0,01 |
| Residual solvents: | Reuther Standard | mg/m ² | ≤ 30 |

This document is applicable for the above mentioned company only and replaces all previous specifications. This document is computer-generated. For it to be valid, it does not require our handwritten signature. After an interruption of deliveries for 12 months or more, this document loses its validity for any new deliveries of the products concerned.
 Reuther Verpackung GmbH & CO. KG · Elisabethstraße 6 · D-56564 Neuwied · Telephone: +49 (0) 26 31 / 875-0 · Fax: +49 (0) 26 31 / 875-333 · E-Mail: info@reuther.de

| | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|---|--|
| Issue No.: 00 Date: 17.09.2010 | Replaces issue No: — Date: — | R&D: G. Puckelwaldt Date: 17.09.2010 | |
|-----------------------------------|---------------------------------|---|--|



T-Zyklus

Abbildung 54: gemessene Wasserdampfdurchlässigkeit nach Alterungsstufen 0-5 mit Braunfolie; 38 °C, 90 % r.F.

Tabelle 9: gemessene Wasserdampfdurchlässigkeit nach Alterungsstufen 0-5; 38 °C, 90 % r.F.

| | | | | |
|--|-----------|-------|---|--------------------|
| GM_12_01_06_10184_Variotec_Hanita_VIP_V07421_frische_Folie | 1,19E-02 | 10184 | 0 | Hanita V07421 |
| GM_12_04_23_SN10184_Variotec_Hanita_V07421 | 1,47E-02 | 10184 | 0 | Hanita V07421 |
| GM_12_04_25_SN10184_Variotec_Hanita_V07421 | 1,58E-02 | 10184 | 0 | Hanita V07421 |
| GM_12_01_03_10184_Variotec_Hanita_VIP_V08621_frische_Folie | 8,62E-03 | 10184 | 0 | Hanita V08621 |
| GM_12_04_20_SN10024_Variotec_Hanita_V08621 | 8,67E-03 | 10024 | 0 | Hanita V08621 |
| GM_12_04_23_SN10024_Variotec_Hanita_V08621 | 8,55E-03 | 10024 | 0 | Hanita V08621 |
| GM_12_01_09_10184_Variotec_Rexotherm_CIV8_C_90_frische_Folie | 1,24E-02 | 10184 | 0 | Rexotherm CIV8 C90 |
| GM_12_04_05_SN10024_Variotec_Rexotherm_CIV8_C90 | 1,50E-02 | 10024 | 0 | Rexotherm CIV8 C90 |
| GM_11_11_07_10070_Braun_Vakuumfolie_Frisch | 3,07E-01 | 10070 | 0 | Braun Vakuumfolie |
| GM_12_01_16_10184_Variotec_Braun_Vakuumfolie_frische_Folie | 2,85E-01 | 10184 | 0 | Braun Vakuumfolie |
| GM_12_04_20_SN10184_Variotec_Braun_Vakuumfolie | 3,08E-01 | 10184 | 0 | Braun Vakuumfolie |
| GM_11_12_13_10184_Variotec_Reuther_VIP_270730_frische_Folie | 8,23E-03 | 10184 | 0 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_04_02_SN10024_Variotec_Reuther_VIP_270730 | 7,90E-03 | 10024 | 0 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_04_16_SN10024_Variotec_Reuther_VIP_270730 | 8,73E-03 | 10024 | 0 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_07_09_SN10024_Hanita_V07421_1_gealtert | 2,05E-02 | 10024 | 1 | Hanita V07421 |
| GM_12_07_20_SN10024_Hanita_V07421_2_gealtert | 2,04E-02 | 10024 | 1 | Hanita V07421 |
| GM_12_08_07_SN10024_Hanita_V07421_3_gealtert | 1,94E-02 | 10024 | 1 | Hanita V07421 |
| GM_12_06_29_SN10024_Variotec_Hanita_V08621_therm_gealtert | 6,84E-03 | 10024 | 1 | Hanita V08621 |
| GM_12_07_13_SN10024_Hanita_V08621_2_gealtert | 1,17E-02 | 10024 | 1 | Hanita V08621 |
| GM_12_07_25_SN10024_Hanita_V08621_3_gealtert | 1,15E-02 | 10024 | 1 | Hanita V08621 |
| GM_12_07_06_SN10024_Rexor_Rexotherm_CIV8C90_1_gealtert | 1,67E-02 | 10024 | 1 | Rexotherm CIV8 C90 |
| GM_12_07_18_SN10024_Rexor_Rexotherm_CIV8C90_2_gealtert | 1,93E-02 | 10024 | 1 | Rexotherm CIV8 C90 |
| GM_12_07_11_SN10024_Braun_Vakuumfolie_1_gealtert | 2,72E-01 | 10024 | 1 | Braun Vakuumfolie |
| GM_12_07_23_SN10024_Braun_Vakuumfolie_2_gealtert | 2,73E-01 | 10024 | 1 | Braun Vakuumfolie |
| GM_12_08_10_SN10024_Braun_Vakuumfolie_3_gealtert | 2,64E-01 | 10024 | 1 | Braun Vakuumfolie |
| GM_12_07_02_SN10024_Reuther_VIP270730_1_gealtert | 7,27E-03 | 10024 | 1 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_07_16_SN10024_Reuther_VIP270730_2_gealtert | 1,21E-02 | 10024 | 1 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_07_27_SN10024_Reuther_VIP270730_3_gealtert | 1,17E-02 | 10024 | 1 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_09_10_SN10024_Hanita_07421_7_#2 | 2,18E-02 | 10024 | 2 | Hanita V07421 |
| GM_12_08_13_SN10024_Hanita_V08621_6_#2 | 1,28E-02 | 10024 | 2 | Hanita V08621 |
| GM_12_09_14_SN10024_Hanita_V08621_7_#2 | 1,32E-02 | 10024 | 2 | Hanita V08621 |
| GM_12_09_19_SN10024_Hanita_V08621_8_#2 | 1,19E-02 | 10024 | 2 | Hanita V08621 |
| GM_12_08_17_SN10024_Rexor_Rexotherm_CIV8C90_6_#2 | 2,17E-02 | 10024 | 2 | Rexotherm CIV8 C90 |
| GM_12_09_12_SN10024_Braun_Vakuumfolie_6_#2 | 2,30E-01 | 10024 | 2 | Braun Vakuumfolie |
| GM_12_09_07_SN10024_Reuther_VIP_270730_6_#2 | 1,37E-02 | 10024 | 2 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_09_17_SN10024_Reuther_VIP_270730_7_#2 | 1,64E-02 | 10024 | 2 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_09_21_SN10024_Reuther_VIP_270730_8_#2 | 1,45E-02 | 10024 | 2 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_10_15_SN10024_Hanita_07421_11_#3 | 1,96E-02 | 10024 | 3 | Hanita V07421 |
| GM_12_09_24_SN10024_Hanita_V08621_11_#3 | 1,24E-02 | 10024 | 3 | Hanita V08621 |
| GM_12_10_09_SN10024_Hanita_V08621_12_#3 | 1,14E-02 | 10024 | 3 | Hanita V08621 |
| GM_12_10_12_SN10024_Rexor_Rexotherm_CIV8C90_11_#3 | 1,85E-02 | 10024 | 3 | Rexotherm CIV8 C90 |
| GM_12_10_29_SN10024_Braun_Vakuumfolie_11_#3 | 2,35E-01 | 10024 | 3 | Braun Vakuumfolie |
| GM_12_10_04_SN10024_Reuther_VIP_270730_11_#3 | 1,48E-02 | 10024 | 3 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_10_05_SN10024_Reuther_VIP_270730_12_#3 | 1,26E-02 | 10024 | 3 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_11_05_SN10024_Hanita_V07421_16_#4 | 1,74E-02 | 10024 | 4 | Hanita V07421 |
| GM_12_11_02_SN10024_Hanita_V08621_16_#4 | 1,43E-02 | 10024 | 4 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_07_SN10024_Rexor_Rexotherm_CIV8C90_16_#4 | 1,66E-02 | 10024 | 4 | Rexotherm CIV8 C90 |
| GM_12_11_01_SN10024_Braun_Vakuumfolie_16_#4 | 1,98E-01 | 10024 | 4 | Braun Vakuumfolie |
| GM_12_10_30_SN10024_Reuther_VIP_270730_16_#4 | 1,05E-02 | 10024 | 4 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_11_14_SN10024_Hanita_V07421_21_#5 | 1,60E-02 | 10024 | 5 | Hanita V07421 |
| GM_12_11_09_SN10024_Hanita_V08621_20_#5 | 9,29E-03 | 10024 | 5 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_12_SN10024_Reuther_VIP_270730_21_#5 | 8,62E-03 | 10024 | 5 | Reuther VIP 270730 |
| GM_12_11_16_SN10024_Rexor_Rexotherm_CIV8C90_21_#5 | 1,48E-02 | 10024 | 5 | Rexotherm CIV8 C90 |
| GM_12_11_19_SN10024_Braun_Vakuumfolie_21_#5 | 2,43E-01 | 10024 | 5 | Braun Vakuumfolie |
| GM_13_02_04_SN10024_Hanita_V08621_7_#2_wdh | 7,643E-03 | 10024 | 2 | Hanita V08621 |
| GM_13_02_06_SN10024_Hanita_V08621_15_#3 | 7,902E-03 | 10024 | 3 | Hanita V08621 |
| GM_13_02_08_SN10024_Reuther_VIP270730_15_#3 | 7,794E-03 | 10024 | 3 | Reuther VIP 270730 |

Tabelle 10: gemessene Wasserdampfdurchlässigkeit nach Falztests; 38 °C, 90 % r.F.

| Bezeichnung | WDD | SN | Falzwinkel | Falzmuster | TYP |
|---------------------------------------|----------|-------|------------|------------|--------------------|
| GM_12_11_05_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,22E-02 | 10184 | A | 1 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_07_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,27E-02 | 10184 | A | 2 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_09_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,56E-02 | 10184 | B | 1 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_12_SN10184_Hanita_V08621_C | 9,34E-03 | 10184 | O | 0 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_14_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,04E-02 | 10184 | A | 1 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_16_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,05E-02 | 10184 | A | 2 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_19_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,20E-02 | 10184 | B | 1 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_22_SN10184_Hanita_V08621_F | 9,75E-03 | 10184 | A | 3 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_24_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,37E-02 | 10184 | B | 2 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_26_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,47E-02 | 10184 | B | 3 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_28_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,08E-02 | 10184 | A | 3 | Hanita V08621 |
| GM_12_11_30_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,33E-02 | 10184 | B | 2 | Hanita V08621 |
| GM_12_12_03_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,44E-02 | 10184 | B | 3 | Hanita V08621 |
| GM_12_12_12_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,60E-02 | 10184 | B | 3 | Hanita V08621 |
| GM_13_01_18_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,44E-02 | 10184 | B | 2 | Hanita V08621 |
| GM_13_01_21_SN10184_Hanita_V08621_F | 1,20E-02 | 10184 | B | 1 | Hanita V08621 |
| GM_13_01_23_SN10184_Hanita_V08621_F | 8,05E-03 | 10184 | A | 3 | Hanita V08621 |
| GM_13_01_25_SN10184_Hanita_V08621_F | 9,54E-03 | 10184 | A | 2 | Hanita V08621 |
| GM_13_01_28_SN10184_Hanita_V08621_F | 8,24E-03 | 10184 | A | 1 | Hanita V08621 |
| GM_13_03_11_SN10024_Reuther_VIP27073 | 7,98E-03 | 10024 | A | 1 | Reuther VIP 270730 |
| GM_13_03_13_SN10024_Reuther_VIP27073 | 8,41E-03 | 10024 | A | 2 | Reuther VIP 270731 |
| GM_13_03_15_SN10024_Reuther_VIP27073 | 7,70E-03 | 10024 | A | 3 | Reuther VIP 270732 |
| GM_13_03_20_SN10024_Reuther_VIP27073 | 3,97E-02 | 10024 | B | 1 | Reuther VIP 270733 |
| GM_13_03_22_SN10024_Reuther_VIP27073 | 9,21E-03 | 10024 | B | 2 | Reuther VIP 270734 |
| GM_13_03_25_SN10024_Reuther_VIP27073 | 1,19E-02 | 10024 | B | 3 | Reuther VIP 270735 |
| GM_13_05_13_SN10024_Reuther_VIP_27073 | 1,07E-02 | 10024 | B | 1 | Reuther VIP 270736 |

Tabelle 11: gemessene Wasserdampfdurchlässigkeit nach dem Belastungswechseltest; 38 °C, 90 % r.F.

| Bezeichnung | WDD | Zyklusanzahl | TYP |
|------------------------------------|----------|--------------|---------------|
| GM_12_11_12_SN10184_Hanita_V08621_ | 9,34E-03 | 0 | Hanita V08621 |
| GM_13_01_30_SN10184_Hanita_V08621_ | 7,80E-03 | 25500 | Hanita V08622 |
| GM_13_02_01_SN10184_Hanita_V08621_ | 7,47E-03 | 164000 | Hanita V08623 |