

**CO₂-Einsparung mit Vakuum-
Isolations-Paneelen (VIP):
Untersuchung der Dauerhaftigkeit von
VIPs mit verklebten Schutzschichten
und in der klebetechnischen
Anwendung**

T 3296

T 3296

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-8986-4

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

Bitte beachten:

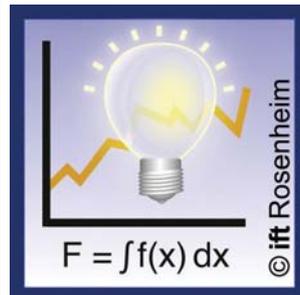
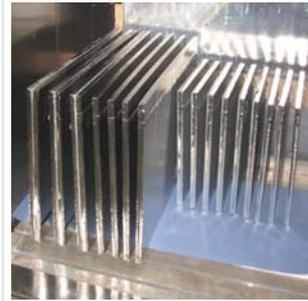
Fehlende Seiten sind **Leerseiten**,
die bei Erstellung
der PDF-Datei für den Download nicht
berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag

Forschung & Entwicklung

Abschlussbericht Dauerhaftigkeit VIP

Dezember 2012



Dauerhaftigkeit VIP Abschlussbericht – Entwurf

Thema	CO ₂ -Einsparung mit Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP): Untersuchung der Dauerhaftigkeit von VIPs mit verklebten Schutzschichten und in der klebetechnischen Anwendung
Kurztitel	Dauerhaftigkeit VIP
Gefördert durch	Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
Forschungsstelle	ift gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH Theodor-Gietl-Straße 7–9 83026 Rosenheim
Projektleitung	Dipl.-Phys. Norbert Sack
Projektbearbeitung	Dr. Ansgar Rose
weitere Forschungsstelle	Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.
Bearbeiter	Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Albrecht Dipl.-Ing. (FH) Stefan Koppold

Inhaltsverzeichnis	Seite
Kurzfassung	1
1 Einleitung	3
1.1 Motivation/Ausgangsbasis	3
1.2 Aktuelle Prüfung der Dauerhaftigkeit von VIPs	5
1.3 Folienumhüllungen von VIPs	6
1.4 Anwendungsbereiche von VIPs	7
1.5 Literaturanalyse	9
1.6 Projektbearbeitung	10
1.6.1 Projektgruppe	10
1.6.2 Arbeitsplan	11
2 Einwirkung verschiedener Klebstoffe	13
2.1 Untersuchungsprogramm	13
2.2 Probekörper	13
2.2.1 Folienumhüllungen und komplette Paneele	13
2.2.2 Klebstoffe	14
2.2.3 Beschichtung der Probekörper	15
2.3 Durchführung der Untersuchungen	17
2.3.1 Alterung/Belastung	17
2.3.2 Analysemethoden	17
2.4 Ergebnisse Folien	21
2.4.1 Optische Untersuchungen	21
2.4.2 Zugfestigkeit der Siegelnähte	22
2.4.3 He-Permeation	27
2.5 Ergebnisse Paneele	29
2.5.1 Gasinnendruck	29
2.5.2 Wärmeleitfähigkeit	32
2.5.3 Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene	34
2.6 Zusammenfassung	35



3	Einwirkung nicht aushärtender (feuchter) alkalischer Kleber	37
3.1	Untersuchungsprogramm	37
3.2	Probekörper	37
3.2.1	Folienumhüllungen und komplette Paneele	37
3.2.2	Klebstoffe	38
3.2.3	Beschichtung der Probekörper	38
3.3	Durchführung der Untersuchungen	38
3.3.1	Alterung/Belastung	38
3.3.2	Analysemethoden	38
3.4	Ergebnisse Folien	39
3.5	Ergebnisse Paneele	40
3.6	Zusammenfassung	43
4	Einwirkung von Feuchtigkeit und ausgewaschenen Salzen aus dem Untergrund	45
4.1	Untersuchungsprogramm	45
4.2	Probekörper	45
4.2.1	Folienumhüllungen und komplette Paneele	45
4.2.2	Klebstoffe	46
4.2.3	Beschichtung der Probekörper	46
4.3	Durchführung der Untersuchungen	47
4.3.1	Alterung/Belastung	47
4.3.2	Analysemethoden	47
4.4	Ergebnisse Folien	48
4.5	Ergebnisse Paneele	49
4.6	Zusammenfassung	51
5	Belastung von Paneelen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes	53
5.1	Untersuchungsprogramm	53
5.2	Probekörper	54
5.3	Durchführung der Untersuchung	55
5.3.1	Alterung/Belastung	55

Dauerhaftigkeit VIP
Inhaltsverzeichnis



5.3.2 Analysemethoden	56
5.4 Ergebnisse Paneele	56
5.5 Zusammenfassung	59
6 Literaturverzeichnis	61
7 Danksagung	63

Kurzfassung

Seit einigen Jahren kommen sog. Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) zum Einsatz, um den Wärmeschutz von Gebäudehüllen zu gewährleisten bzw. zu verbessern. Diese Paneele besitzen gegenüber konventionellen Dämmstoffen eine um den Faktor 6–10 verbesserte Wärmeleitfähigkeit. Um die gute Dämmwirkung über die komplette Nutzungsdauer sicherstellen zu können, bedürfen die VIPs einer dichten Umhüllung, so dass Anstiege des Gasinnendrucks im Paneel gering bleiben.

Die nationalen Zulassungsbestimmungen für VIPs enthalten bereits Prüfscenarien, die die Dauerhaftigkeit der Wärmeleitfähigkeit bewerten. In jüngster Zeit erfolgt der Einbau dieser Produkte in die Gebäudehülle jedoch durch Kleben, und die langzeitige Einwirkung von Klebstoffen auf die Dauerhaftigkeit ist in den Zulassungsbestimmungen noch nicht berücksichtigt. Deshalb war es das Ziel dieses Forschungsvorhabens, den Einfluss von unterschiedlichen Klebern und Klebsystemen sowie weiteren Stoffen wie Betoninhaltsstoffe und Estriche auf die Dauerhaftigkeit der Folienumhüllung von VIPs zu untersuchen. Zusätzlich sollte auch der Einfluss der thermischen Ausdehnung von verklebten Deckschichten auf die Dauerhaftigkeit von VIPs beurteilt werden.

Zu diesem Zweck wurden Folien, Siegelnähte und VIPs Belastungen unterworfen, die in typischen Bauanwendungen auftreten können, wenn die Paneele mit Klebstoffen auf dem Untergrund befestigt werden:

- Kontakt mit ausgehärteten Klebstoffen über einen langen Zeitraum, simuliert durch eine mehrmonatige Lagerung bei erhöhter Temperatur.
- Kontakt mit unausgehärteten (feuchten) Klebstoffen über mehrere Wochen, um die verzögerte Aushärtung von Klebstoffen hinter/unter großflächigen Paneelen zu simulieren.
- Kontakt mit alkalischer Feuchte über mehrere Monate, um die Einwirkung von Auswaschungen aus dem Untergrund zu simulieren.
- Thermisch/mechanische Wechselbelastung von Paneelen, um Belastungen zu simulieren, die in der Bauanwendung durch thermische Ausdehnung des Untergrundes auftreten.

Es wurden für Bauanwendungen typische Klebstoffe aus den Gruppen Kunstharzkleber, mineralische Baukleber, Bitumenkleber (lösemittelhaltig und lösemittelfrei) sowie reaktive Schmelzkleber ausgewählt. Die Wirkungen der Belastungen auf die Probekörper wurden durch Messungen des Gasinnendrucks und der



Wärmeleitfähigkeit der Paneele sowie die Messung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene beurteilt. Visuelle Inspektionen und Bestimmungen der Gaspermeation der Folie sowie der Zugfestigkeit der Siegelnähte ergänzten das Untersuchungsprogramm.

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen lassen sich keine signifikanten Wirkungen von (ausgehärteten) Klebstoffbeschichtungen auf die Folienumhüllung von VIPs ableiten.

Es zeigte sich im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen keine Schädigung der Folienumhüllung durch feuchte alkalische Klebstoffbeschichtungen oder alkalische Feuchte (Auswaschungen aus dem Untergrund). Jedoch kann bei einer länger andauernden Einwirkung von feuchten alkalischen Klebstoffen oder alkalischer Feuchte aus dem Untergrund eine Schädigung der Siegelnaht nicht ausgeschlossen werden. Es erscheint daher ratsam, eine langfristige Einwirkung von alkalischer Feuchte, auf Folienumhüllungen, insbesondere die Siegelnähte, zu vermeiden.

Eine negative Wirkung von temperaturbedingten mechanischen Wechselbelastungen auf die Folienumhüllung war nicht feststellbar.

1 Einleitung

1.1 Motivation/Ausgangsbasis

Nicht zuletzt durch die Meseberger Beschlüsse kommt der Thematik Energie- und CO₂-Einsparung in der Politik und Öffentlichkeit ein hoher Stellenwert zu. Zur Erreichung dieses Ziels im Gebäudebereich trägt die Verbesserung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle einen maßgeblichen Beitrag. Neben konventionellen Dämmstoffen wurden in den letzten Jahren sog. Vakuum-Isolations-Paneele (VIPs) entwickelt. Diese besitzen den Vorteil, dass gegenüber konventionellen Dämmstoffen eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 6-10 zu verzeichnen ist. So können Wärmeleitfähigkeiten von ca. 0,004 W/(mK) im Neuzustand erreicht werden. Um solch niedrige Wärmeleitfähigkeiten jedoch über den kompletten Nutzungszeitraum sicherstellen zu können, bedarf es einer entsprechend dichten „Umhüllung“ dieser VIPs, um geringe Leckraten und damit geringe Druckanstiege im Paneel garantieren zu können. Bei der Bewertung der Dauerhaftigkeit solcher Paneele ist es wichtig, alle relevanten Belastungen, die während der Nutzung auf das VIP einwirken, zu betrachten. Unter dieser Prämisse wurde im Sachverständigenausschuss des DIBt SVA B1 „Wärmeleitfähigkeit und Wärmedämmstoffe“ entsprechende Prüfzenarien erarbeitet, um die Dauerhaftigkeit der Wärmeleitfähigkeit von VIPs zu bewerten. Auf Grundlage dieser Prüfungen wurden in den vergangenen Jahren bereits nationale Zulassungen erteilt.

In jüngster Vergangenheit erfolgt der Einbau solcher Produkte in die Gebäudehülle jedoch auch durch Kleben, durch Verarbeitung von bereits werkmäßig mit Schutzschichten aus Gummigranulat und EPS-Platten versehenen Verbundplatten oder durch die Integration in weitere Paneele mit polymeren Bestandteilen wie z.B. PU-Schäumen. Ebenso sind zukünftige Anwendungen denkbar, die das VIP in direkten Kontakt mit Beton, Estrich usw. bringen. Aus anderen Anwendungsbereichen ist bekannt, dass beim Kontakt von unterschiedlichen Polymeren bzw. beim Kontakt von Polymeren mit alkalischen Stoffen eine Diffusion von niedermolekularen Bestandteilen, wie z.B. Weichmachern und Ionen, stattfinden kann, die die Eigenschaften der Polymere negativ beeinflusst.

Beispiele für die Wanderung von einzelnen Bestandteilen treten beim Kontakt von Verglasungsklotzen mit ausreagierten Dichtstoffen aus dem Randverbund von Mehrscheiben-Isolierglas und auch bei Dichtstoffen in Kontakt mit den Kanten von Verbund- und Verbundsicherheitsgläsern auf. Auch im Rahmen der



ETAG 002 „Leitlinie für die Europäisch-technische Zulassung für Geklebte Glas-konstruktionen, Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme“ wird der Thematik Unverträglichkeit mit anderen Materialien im Abschnitt 5.1.4.2 Rechnung getra-gen [1].

Der Einfluss von organischen und anorganischen (ionischen) Komponenten auf die Dauerhaftigkeit der Umhüllung von VIPs aufgrund von Wechselwirkungen und Unverträglichkeit mit angrenzenden Materialien ist bislang noch nicht unter-sucht. Insbesondere der Kontakt mit polymeren und mineralischen Klebern und mit Putzen, Estrich und Betoninhaltsstoffen aus einer Außenwand ist von Interes-se und bedarf der genaueren Betrachtung.

Materialwechselwirkungen und -unverträglichkeiten könnten eine Reduzierung der Gasdichtheit der Folie zur Folge haben. Diese chemischen Belastungen könnten durch mechanische Spannungen überlagert werden – Spannungen, die aus Zwängungen bei der Bewegung des Untergrundes oder unterschiedlichen thermischen Längenausdehnungen resultieren. Wenn man sich vor Augen führt, dass die Wärmeleitfähigkeit eines Paneels im neuen Zustand ca. $4 \text{ mW}/(\text{m K})$ be-trägt, im belüfteten Zustand aufgrund einer nicht gasdichten Folie um den Faktor 5 höher ist, so wird klar, dass ausgeschlossen werden muss, dass durch Wechsel-wirkung mit angrenzenden Materialien, wie z.B. Klebern, oder mechanische Be-lastungen die Dichtigkeit der Verbundfolie reduziert wird.

Ziel des Vorhabens war es daher den Einfluss von unterschiedlichen Klebern und Klebsystemen sowie weitere Stoffe wie Betoninhaltsstoffe und Estriche auf die Dauerhaftigkeit der Folienumhüllung von VIPs zu untersuchen. Zusätzlich sollte auch der Einfluss der thermischen Ausdehnung von verklebten Deckschichten auf die Dauerhaftigkeit von VIPs beurteilt werden. Die notwendigen Untersu-chungen konnten zum Teil an der Folie direkt durchgeführt werden, um entspre-chende Reaktionen zwischen den „Beteiligten“ direkt visuell oder auch analytisch festzustellen. Ebenso wurden komplette VIPs mit unterschiedlichen Klebern in Kontakt gebracht und die Auswirkung auf den zeitlichen Druckanstieg des Pa-neels und infolgedessen auf die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ermittelt.

1.2 Aktuelle Prüfung der Dauerhaftigkeit von VIPs

Im Rahmen der Zulassungsprüfungen werden zurzeit folgende Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von VIPs durchgeführt.

1. Bauteilversuch

In einem Bauteilversuch wird für ein Vakuum-Wärmedämmpaneel durch eine Aneinanderreihung von klimatischen und mechanischen Belastungen eine simulierte Nutzung durch ein Kurzzeitverfahren erzeugt. Vor und nach den Belastungen wird der Zustand des Vakuum-Wärmedämmpaneels sowie des VIP beurteilt. Das Vakuum-Wärmedämmpaneel ist in eine Pfosten-Riegel-Konstruktion eingebaut und wird folgenden Belastungen ausgesetzt:

Versuch 1: Einseitige Temperaturbelastung mit +80 °C Lufttemperatur über 24 h auf der Außenseite. Auf der Innenseite wirkt das Raumklima.

Versuch 2: Druck-Sog-Belastungen in Anlehnung an DIN EN 12211 [3], Windbemessung = 200 Pa ± 1000 Pa Druckdifferenz mit n = 100 Wechsel. Sicherheitsprüfung bei 3000 Pa.

Versuch 3: Einseitige Temperaturbelastung mit -15 °C Lufttemperatur über 24 h auf der Außenseite. Auf der Innenseite wirkt das Raumklima.

Versuch 4: Druck-Sog-Belastungen in Anlehnung an DIN EN 12211 [3], Windbemessung = 200 Pa ± 1000 Pa Druckdifferenz mit n = 100 Wechsel. Sicherheitsprüfung bei 3000 Pa.

Beurteilung:

Prüfung des Wärmedurchlasswiderstandes des VIP im Vergleich zum unbelasteten VIP.

2. Insitu-Belastung

Für den Insitu-Versuch werden 3 Vakuum-Wärmedämmpaneele in eine Fensterwand aus dunklen Aluminium-Profilen in Südwest-Orientierung eingebaut. Vor dem Zusammenbau der Paneele wird der Wärmedurchlasswiderstand der VIPs gemessen. Im eingebauten Zustand herrscht auf der Außenseite das ortsübliche Klima und auf der Raumseite Raumklima. Nach einer Belastungszeit von einem Jahr, von zwei Jahren und von drei Jahren wird jeweils ein Glaspaneel entnommen und der Wärmedurchlasswiderstand des VIP ermittelt. Ebenfalls ist eine Begutachtung von bereits eingesetzten Paneelen denkbar.



3. Prüfung des VIP

Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung der wärmetechnischen Eigenschaften des VIP vor und nach einer Alterung. Hierzu wird an VIPs der Größe 800 mm x 800 mm der Wärmedurchlasswiderstand nach DIN 52612 [4] vor und nach der Alterung bestimmt.

- Prüfung des Wärmedurchlasswiderstandes an 6 Probekörpern (3 Messungen; 2 x kleinste, 1 x größte Nenndicke nach DIN 52612 im Ausgangszustand
- Klimawechselprüfung (+80/-15) °C mit 8 Zyklen à 24 Stunden nach DIN 52344 [5] an den 6 Proben der Abmessung 800 mm x 800 mm
- 90 Tage Temperaturlagerung bei 80 °C
- Prüfung des Wärmedurchlasswiderstandes an 6 Probekörpern nach DIN 52612 im „gealterten“ Zustand
- Weitere 90 Tage Temperaturlagerung bei 80 °C
- Prüfung des Wärmedurchlasswiderstandes an 6 Probekörpern nach DIN 52612 im „gealterten“ Zustand

1.3 Folienumhüllungen von VIPs

Um das Vakuum in den VIPs über den Nutzungszeitraum sicherzustellen, werden für die Umhüllung Hochbarrierefolien eingesetzt. Diese Folien haben niedrige Permeationsraten für Wasserdampf sowie die Gasmoleküle der Außenluft (O₂, N₂ etc.). Neben den niedrigen Permeationsraten werden weitere Eigenschaften für Hochbarrierefolien angestrebt:

- hohe mechanische Festigkeit,
- geringe Wärmeleitfähigkeit der Folie in Folienebene (Ziel: Minimierung von Wärmebrücken im Randbereich des VIP),
- Schweißbarkeit,
- Wirtschaftlichkeit.

Aufgrund dieser notwendigen Eigenschaften werden heute überwiegend Folien aus metallisierten Mehrlagensystemen eingesetzt (Abbildung 1). Hierbei werden mehrere metallbedampfte Kunststofffolien miteinander verklebt. Als Kleber werden PU-Klebstoffe verwendet. Den Abschluss des Aufbaus bildet eine sog. Siegelschicht. Diese dient zum Verschweißen der Folienumhüllung.

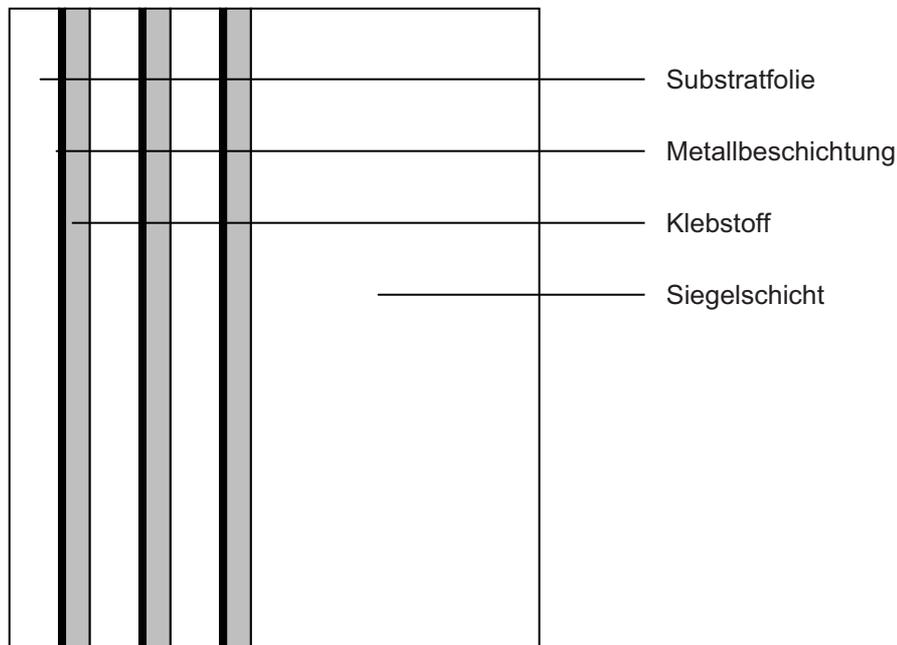


Abbildung 1 Prinzipieller Aufbau einer Hochbarrierefolie

Folgende Materialien werden für die einzelnen Schichten eingesetzt:

- Substrat-Folie: PET, PP, PA
- Metallbeschichtung: i.d.R. Aluminium
- Klebstoff: PU-Klebstoff
- Siegelschicht: PE-LD

1.4 Anwendungsbereiche von VIPs

Vakuum-Isolationspaneele können in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, in denen konventionelle Dämmstoffe verwendet werden. Die in DIN 4108-10 [2] definierten Anwendungsbereiche für Dämmstoffe sind in Tabelle 1 aufgeführt.


Tabelle 1 Anwendungsbereiche von Dämmstoffen entsprechend DIN 4108-10 [2]

Anwendungsgebiet	Kurzzeichen	Anwendungsbeispiele
Decke, Dach	DAD	Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Deckungen
	DAA	Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Abdichtungen
	DUK	Außendämmung des Daches, der Bewitterung ausgesetzt (Umkehrdach)
	DZ	Zwischensparrendämmung, zweischaliges Dach, nicht begehbare, aber zugängliche oberste Geschossdecken
	DI	Innendämmung der Decke (unterseitig) oder des Daches, Dämmung unter den Sparren/Tragkonstruktion, abgehängte Decke usw.
	DEO	Innendämmung der Decke oder Bodenplatte (oberseitig) unter Estrich ohne Schallschutzanforderungen
	DES	Innendämmung der Decke oder Bodenplatte (oberseitig) unter Estrich mit Schallschutzanforderungen
Wand	WAB	Außendämmung der Wand hinter Bekleidung
	WAA	Außendämmung der Wand hinter Abdichtung
	WAP	Außendämmung der Wand unter Putz
	WZ	Dämmung von zweischaligen Wänden, Kerndämmung
	WH	Dämmung von Holzrahmen- und Holztafelbauweise
	WI	Innendämmung der Wand
	WTH	Dämmung zwischen Haustrennwänden mit Schallschutzanforderungen
	WTR	Dämmung von Raumtrennwänden
Perimeter	PW	Außen liegende Wärmedämmung von Wänden gegen Erdreich (außerhalb der Abdichtung)
	PB	Außen liegende Wärmedämmung unter der Bodenplatte gegen Erdreich (außerhalb der Abdichtung)

In diesen Anwendungsbereichen sind VIP genau wie andere Dämmstoffe vielfältigen Belastungen ausgesetzt:

- Niedrige und hohe Temperaturen
- Hohe Luftfeuchte
- Kontakt mit Wasser, z.B. aus Kondensation oder eindringendem Regenwasser
- Kontakt mit wässrigen Lösungen von aus dem Mauerwerk ausgewaschenen Salzen
- Kontakt mit anderen Materialien, z.B. Klebstoffen, Beton, Estriche, Schutzschichten aus Gummi oder EPS
- Mechanische Belastungen der Paneele durch Verformungen, z.B. Zug, Druck, Biegung

Abbildung 2 zeigt einige Beispiele für Anwendungen, in denen VIPs mit Klebstoffen und anderen Baustoffen in Kontakt kommen.



Abbildung 2 Quelle: vaku isotherm (www.vaku-isotherm.de)
1) Flachdach, lösemittelfreie Kleber
2) Wand, Klebeband
3) Terrasse, Kontakt mit „Bautenschutzmatte“
4) Terrasse, Selbstklebebitumenbahn wird verschweißt

1.5 Literaturanalyse

Eine umfangreiche Zusammenstellung von Literatur, die sich mit der Thematik VIP im Bauwesen beschäftigt, findet sich unter www.vip-bau.de. Hierunter findet sich auch Literatur, die sich mit der Dauerhaftigkeit von VIPs beschäftigt (z.B. [6], [7], [8], [9], [10]). Allen bisher durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich der Alterung von VIPs ist gemein, dass im Wesentlichen nur die hygrisch-thermische Alterung der VIPs untersucht wurde. Veröffentlichungen, die sich mit einer möglichen Unverträglichkeit von Hochbarrierefolien und anderen Stoffen auseinandersetzen, sind nicht bekannt.



1.6 Projektbearbeitung

1.6.1 Projektgruppe

Die Projektgruppe bestand aus den Forschungsstellen

- ift Rosenheim und
- FIW München

sowie den Industriepartnern

- va-Q-tec AG, Würzburg
- Variotec GmbH, Neumarkt

Während der Projektbearbeitungszeit wurden folgende Besprechungen durchgeführt:

Tabelle 2 Durchgeführte Projektbesprechungen

Datum	Ort	Teilnehmer	Ziel
18. Oktober 2010	Fa. Variotec, Neumarkt	Variotec, va-Q-tec, FIW München, ift Rosenheim	Festlegung der Untersuchungsmethodik sowie der Probekörper
28. Januar 2011	FIW München	FIW München, ift Rosenheim	Detailbesprechung zum Untersuchungsablauf
18. Mai 2011	ift Rosenheim	FIW München, ift Rosenheim	Besprechung erster Zwischenergebnisse
26. September 2011	FIW München	FIW München, ift Rosenheim	Sachstand u. Festlegung weiterer Untersuchungsschwerpunkte
24. Oktober 2011	1.Webmeeting	Variotec, va-Q-tec, FIW München, ift Rosenheim	Abstimmung des Untersuchungsprogramms für die zweite Phase des Forschungsvorhabens
20. August 2012	ift Rosenheim	FIW München, ift Rosenheim	Sachstand u. Abstimmung über Abschlussbericht
27. November 2012	FIW München	Variotec, va-Q-tec, FIW München, ift Rosenheim	Abschlusstreffen: Verabschiedung des Abschlussberichtes

1.6.2 Arbeitsplan

Die Projektarbeit folgte im Wesentlichen dem Arbeitsplan gemäß Förderungsantrag:

Tabelle 3 Arbeitsplan

Forschungsabschnitt	Leistungsbeschreibung
1	<p>Analyse</p> <p>Analyse und Klassifizierung hinsichtlich</p> <ul style="list-style-type: none">• Bisherige Erkenntnisse zur Thematik (öffentliche Forschung, Erkenntnisse der Projektpartner)• Verwendete Folien und ihr Aufbau für VIP• Kleber und andere Materialien wie Klebemörtel, Putz, Estrich, Betoninhaltsstoffe, die in Kontakt mit den VIP stehen• Weitere Belastungen, die z.B. durch die Verklebung auf das VIP wirken; Beispiel: unterschiedliche Längenausdehnung• Analyse weiterer Randbedingungen in der Nutzungsphase wie Temperaturen, Strahlung, Feuchtigkeit etc.
2	<p>Festlegung der Untersuchungsschwerpunkte und der entsprechend durchzuführenden Prüfungen</p> <p>Aufgrund der Ergebnisse der Analyse werden die relevanten Untersuchungsschwerpunkte sowie die hierzu notwendigen Prüfungen festgelegt:</p> <ul style="list-style-type: none">• Kombination der Folien und Klebstoffe bzw. Stoffe wie Beton, Estrich etc.• Anzahl und Größe der Probekörper• Sonstige Belastungen wie Temperatur, Druck, Zwängung
3	<p>Vorbereitung der Probekörper</p> <p>Zur Durchführung der in 2 festgelegten Untersuchungen werden die notwendigen Probekörper hergestellt. Dies erfolgt zum Teil bei den in das Projekt mit eingebundenen Industriepartnern als auch bei den beiden Forschungsstellen.</p>
4	<p>Durchführung der Untersuchungen/Prüfungen</p> <p>An den entsprechend 3 hergestellten Probekörper werden hinsichtlich der in 2 festgelegten Belastungen Untersuchungen durchgeführt. Um eine Aussage zu erhalten, ob die jeweilige Belastung zu signifikantem Einfluss geführt hat, können folgende Parameter und deren Änderung ermittelt werden:</p>



Forschungsabschnitt	Leistungsbeschreibung
5	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeleitfähigkeit entsprechend EN 12667 • Gasdrucks im Panel (Verfahren im Rahmen der WPK der Hersteller) • Gaspermeationsraten • Visuelle Prüfung auf Veränderungen der Folie • Evtl. mechanische Prüfungen an den Folien <p>Auswertungen der Untersuchungen Die in 4 durchgeführten Untersuchungen werden hinsichtlich der Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit, des Innendrucks sowie weiterer Parameter ausgewertet. Hierdurch soll eine Aussage getroffen werden, ob und welche Kombinationen von Folien und „Klebern“ zu Veränderungen der „Gasleckrate“ führen.</p>
6	<p>Dokumentation Die durchgeführten Analysen, Untersuchungen und Ergebnisse werden in einem Bericht dargestellt, diskutiert und bewertet.</p>

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden alle Arbeitspunkte entsprechend den Leistungsbeschreibungen des Arbeitsplanes durchgeführt. Dabei diente die erste Projektphase der Orientierung. Es wurde die

- Einwirkung mehrerer verbreiteter Baukleber auf Folie, Siegelnaht und Paneele (Kapitel 2)

untersucht. Gleichzeitig wurde die Eignung der ausgewählten Analysemethoden geprüft. Nach Auswertung der Ergebnisse und Erfahrungen aus der ersten Projektphase wurden die Untersuchungsschwerpunkte der zweiten Projektphase von der Projektgruppe ausgewählt:

- Einwirkung nicht aushärtender (feuchter) alkalischer Kleber (Kapitel 3)
- Einwirkung von Feuchtigkeit und ausgewaschenen Salzen aus dem Untergrund (Kapitel 4)
- Belastung von Paneelen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes (Kapitel 5)

Es wurden keine Geräte oder Ausrüstungsgegenstände angeschafft im Rahmen des Forschungsvorhabens. Notwendige Spezialgeräte, wie z.B. zur Messung des Gasinnendrucks von Paneelen, wurden von den Projektpartnern unentgeltlich zur Verfügung gestellt bzw. die Messungen wurden direkt bei den Industriepartnern durchgeführt.

2 Einwirkung verschiedener Klebstoffe

2.1 Untersuchungsprogramm

In der ersten Phase des Projektes sollte die Einwirkung verschiedener Baukleber auf die Eigenschaften von Folien, Siegelnähten und Paneelen untersucht werden. Dazu wurden mehrere Baukleber aus verschiedenen Klebstoffgruppen (Dispersion, mineralisch, Bitumen und reaktive Schmelzkleber) ausgewählt. Nach dem Aufbringen und Aushärten der Klebstoffe auf Folienstreifen, Siegelnähte und Paneele wurden die Probekörper bei erhöhter Temperatur künstlich gealtert, um eine lange Einsatzdauer zu simulieren. In regelmäßigen Abständen wurden Probekörper visuell begutachtet und charakteristische Eigenschaften wie z.B. die Zugfestigkeit der Siegelnaht und der Gasinnendruck der Paneele bestimmt.

Hauptanliegen dieser ersten Projektphase war es die Einwirkung von typischen Klebstoffen, wie z.B. Bauklebern auf VIP zu untersuchen. Gleichzeitig sollte die erste Phase des Projektes aber auch dazu dienen die Analysemethoden zu bewerten und geeignete Methoden für die zweite Projektphase auszuwählen.

Im Rahmen des Projektes sollten die Kleber mit zwei unterschiedlichen Hochbarrierefolien kombiniert werden. Dieser Ansatz musste jedoch aufgegeben werden, da die beiden Industriepartner zu Beginn des Forschungsvorhabens ihre Produktion auf die gleiche Folie umgestellt hatten. Mit der Nutzung der gleichen Folie durch beide Industriepartner bestand die Möglichkeit, Einflüsse der Verarbeitung, z.B. auf die Festigkeit der Siegelnaht oder die He-Permeation, zu erfassen.

2.2 Probekörper

2.2.1 Folienumhüllungen und komplette Paneele

Die Projektpartner Variotec und va-Q-tec stellten jeweils folgende Probekörper zur Verfügung:

- ca. 14 m² Hochbarrierefolie
- ca. 14 m Siegelnaht mit einer Lappenbreite von 150 mm
- 24 VIP der Abmessung von 200 mm x 200 mm x 10 mm
- 24 VIP der Abmessung von 500 mm x 500 mm x 10 mm

Bei der Hochbarrierefolie handelt es sich um ein Laminat aus drei metallbedampften PET-Folien sowie einer LLDPE-Siegelschicht.



Die VIPs der Fa. va-Q-tec besitzen einen integrierten Sensor (va-Q-check), mit dem der Gasinnendruck im Paneel ermittelt werden kann (s. Abbildung 3 und Kap. 2.3.2.4).



Abbildung 3 va-Q-check-Sensor

2.2.2 Klebstoffe

Folgende Klebstoffe wurden ausgewählt und auf die Probekörper appliziert:

Tabelle 4 Untersuchte Klebstoffe

	Beschreibung	Hauptanwendung	Hersteller	Bezeichnung
1	Kunstharzkleber	Vollflächiges Verkleben von Polystyrolhartschaum	Sto	STO Dispersionskleber
2	Mineralischer Baukleber	Verkleben von Dämmstoff- und Leicht-bauplatten auf Beton, Porenbeton, Zementputz und Mauerwerk	PCI	PCI Elfatherm
3	Bitumenkleber, lösemittelhaltig	Verkleben von Bitumen-Dachbahnen auf Beton, Estrich, Holz und alten Bitumendächern	Quick Mix	Bitumen Kaltklebemasse BKK
4	Bitumenkleber, lösemittelfrei	Verkleben von Drän- und Dämmplatten aller Art wie Polystyrolhartschaum, Kork, Heraklith u.Ä.	Quick Mix	Ökotan Bitumenkleber BKP
5	PU-Reaktiver Schmelzkleber	Flächenkaschierung unterschiedlicher Werkstoffe wie z.B. Holz, PMMA, PVC, Stahl, Aluminium	Kleiberit	Reaktiver Schmelzkleber PUR 706.4

2.2.3 Beschichtung der Probekörper

Die in 2.2.1 aufgelisteten Probekörper wurden mit den in 2.2.2 dargestellten Klebstoffen beschichtet. Hierbei wurden

- die Folienabschnitte vollflächig auf der Außenseite beschichtet,
- die Siegelnähte auf einer Außenseite beschichtet und
- die kompletten Paneele auf der Außenseite mit der Siegelnaht vollflächig beschichtet.

Bei den Siegelnahtproben und den Paneelen wurde versucht, Klebstoff auch in den äußeren Spalt der Naht eindringen zu lassen; d.h. die Schnittkante wurde auch mit Klebstoff überzogen.

Der reaktive PUR-Schmelzkleber wurde von der Fa. Variotec sowohl auf die eigenen Folien, Siegelnähte und Paneele, als auch auf die der Fa. va-Q-tec aufgetragen. Dies ist dadurch begründet, dass der entsprechende Auftrag maschinell erfolgen musste.

Alle anderen Kleber wurden durch die Forschungsstellen FIW München und **ift** Rosenheim aufgetragen.

Die folgenden Fotos illustrieren den Beschichtungsvorgang am **ift**. Jeweils zwei 30 cm x 50 cm große Folien und zwei 50 cm lange Siegelnahtlappen wurden mit etwas Klebeband auf einem Tisch befestigt. Der Klebstoff wurde dann mit einem Pinsel etwa 1–2 mm dick aufgetragen.



Abbildung 4 30 cm x 50 cm Folie unbeschichtet und beschichtet



Abbildung 5 50 cm lange Siegelnähte unbeschichtet und beschichtet

Nach dem Beschichten konnten die Proben zwei Wochen im Labor austrocknen/aushärten, bevor sie in die Alterung gingen bzw. die ersten geprüft wurden. Alle Kleber waren nach wenigen Tagen ausgetrocknet, bis auf den lösemittelhaltigen Bitumenkleber BKK. Auf diesem bildete sich eine Haut, die das weitere Austrocknen/Aushärten verzögerte.

Abbildung 6 zeigt die durch das FIW München beschichteten VIP.



Abbildung 6 Beschichtete Paneele im FIW München

2.3 Durchführung der Untersuchungen

2.3.1 Alterung/Belastung

Alle beschichteten Probekörper, d.h. sowohl die beschichteten Einzelfolien, die beschichteten Siegelnähte als auch die beschichteten Paneele durchliefen einen 21-wöchigen Alterungsprozess bei einer Temperatur von 70 °C. In regelmäßigen Abständen wurden Proben entnommen und Untersuchungen an ihnen durchgeführt, um den zeitliche Verlauf der Alterung zu beobachten. Zum Vergleich wurden auch unbeschichtete Probekörper gealtert und geprüft.

2.3.2 Analysemethoden

Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungsmethoden dienen dazu, die Wirkungen der Klebstoffe und der erhöhten Temperatur auf die Hochbarrierefolien und die Siegelnähte festzustellen. Dabei geht es um die Beeinflussung wesentlicher Leistungseigenschaften der Folie und Nähte.

Die Untersuchungen dienen nicht dem Zweck, Absolutwerte der Leistungseigenschaften zu ermitteln oder Paneeltypen zu vergleichen. Vielmehr sollten die durch physikalische und chemische Alterung bedingten relativen Veränderungen von Leistungseigenschaften erfasst werden.

2.3.2.1 Optische Untersuchungen

Ziel der optischen Untersuchung war eine qualitative Aussage, ob durch den Kontakt mit Klebstoffen oder die Ofenalterung die Folie oder die Siegelnaht „angegriffen“ wurden. Neben der einfachen visuellen Inspektion waren im Rahmen des Projektes Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie als Untersuchungsverfahren vorgesehen. Da an den beiden Forschungsstellen kein REM zur Verfügung stand, sollten diese Untersuchungen nur an Proben durchgeführt werden, die sich bei anderen Untersuchungen als „auffällig“ erwiesen hatten. Im Verlaufe des Forschungsvorhabens zeigte sich, dass keine der beobachteten Veränderungen an Probekörpern eine aufwendige und teure elektronenmikroskopische Untersuchung erforderten oder rechtfertigten.

Proben der Folien und der Siegelnähte wurden sowohl im Neuzustand als auch nach den 21 Wochen Alterung lichtmikroskopisch begutachtet.



Exemplarisch wurde auch die Querschnittsfläche einiger Folie/Siegelnaht-Abschnitte begutachtet. Die Präparation erfolgte durch Ausschneiden eines Streifens mit einem Werkzeug aus zwei parallel angeordneten Rasierklingen.

2.3.2.2 Messung der Zugfestigkeit der Siegelnaht

Die beiden Enden eines Folienstreifens mit einer Siegelnaht in der Mitte werden in einer Zugprüfmaschine auseinandergezogen. Auf der Innenseite der Naht stellt sich ein Winkel von 180° ein. Im Prinzip findet ein Aufschälen der Naht statt (sofern Film oder Naht nicht reißen). Abbildung 7 zeigt eine Siegelnahtprobe, eingespannt in eine Zugprüfmaschine. Die Probe ist 25 mm breit, und die Einspannlänge beträgt 200 mm. Geprüft wurde mit einer Geschwindigkeit von 50mm/min. Die Kraft wurde als Funktion des Weges aufgezeichnet. Es wurden jeweils 5 Proben getestet.

Der sog. 180° -Schältest prüft die Festigkeit der Siegelnaht zwischen den Folienstreifen. Hinsichtlich der in 2.3.2 definierten Ziele der eingesetzten Analysemethoden muss beachtet werden, dass der Ort der höchsten mechanischen Belastung in diesem Test, nämlich die Innenseite der Naht, in der Praxis (Innenseite Paneel) gar nicht mit Klebstoffen in Berührung kommt. Auch in diesem Projekt wurde davon abgesehen, die Innenseite mit Klebstoffen zu beschichten; trotzdem erschien der Schältest sinnvoll, aufgrund seiner prinzipiellen Einfachheit und weil er im Rahmen des Forschungsvorhabens die einzige praktikable mechanische Prüfung der Siegelnaht war.

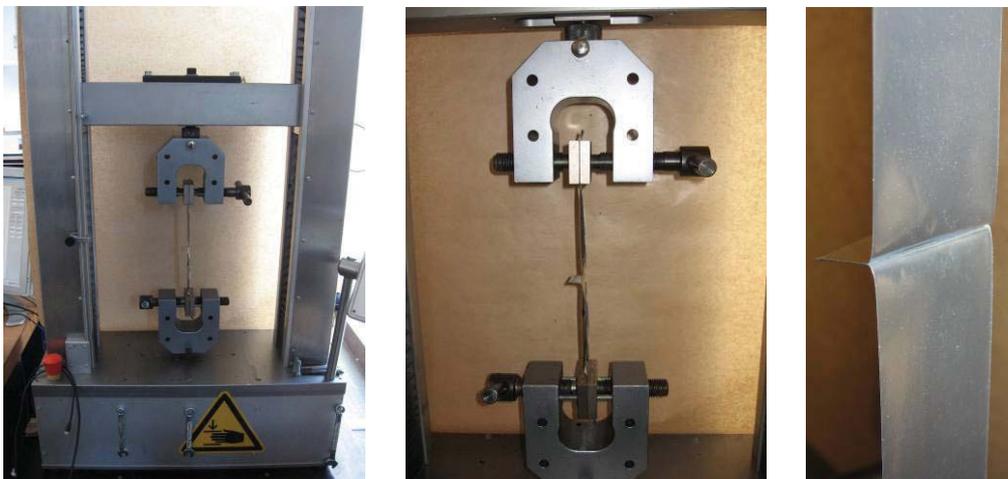


Abbildung 7 Siegelnaht, eingespannt in eine Zugprüfmaschine für den 180° -Schältest

Von einer Zugprüfung der Folien selber wurde abgesehen, weil einige der Klebstoffe nicht wieder von den Folien entfernt werden konnten. Rückstände auf der Oberfläche ändern den mechanischen Spannungszustand in einer Probe und können damit das Ergebnis einer mechanischen Prüfung verfälschen.

2.3.2.3 Messung der Gaspermeation

Mit der Messung der Gaspermeation der Folien kann eine Aussage über die „Gasdichtheit“ getroffen werden. Für die Praxis sind die Permeationsraten von Sauerstoff, Stickstoff und Wasserdampf relevant. Die Bestimmung der Permeationsraten für diese Gase ist jedoch sehr aufwändig und langwierig, und für Sauerstoff liegt die Permeationsrate für die im Bauwesen verwendeten Folien am Rande der Nachweisgrenze [10].

Da es nicht das Ziel des Projektes war, Absolutwerte zu ermitteln, sondern relative Veränderungen festgestellt werden sollten, wurde anstatt der Permeation für Sauerstoff, Stickstoff und Wasserdampf die Permeation für Helium gemessen. Das ist weniger aufwändig, schneller (Messdauer im Bereich von Stunden) und mit größerer Genauigkeit innerhalb der Nachweisgrenze möglich. Das Messprinzip ist dabei recht einfach: Die Folienprobe (ca. 15 cm Durchmesser) wird in eine Messzelle eingespannt, so dass sie die Zelle in zwei Kammern teilt. Die eine Kammer wird mit He-Gas durchspült, in der anderen wird mithilfe eines Massenspektrometers die Anzahl der pro Zeiteinheit durch die Folie durchtretenden He-Atome bestimmt. Die Messungen wurden bei 50 °C durchgeführt, um die He-Permeation zu beschleunigen und somit die Messdauer zu verkürzen.

Die He-Permeationskoeffizienten wurden bestimmt an jeweils zwei:

- unbeschichteten Folien im Neuzustand
- unbeschichteten Folien nach 21 Wochen bei 70 °C
- beschichteten Folien nach 21 Wochen bei 70 °C

Das Süddeutsche Kunststoffzentrum (SKZ) in Würzburg führte die Messungen aus.

2.3.2.4 Messung des Gasinnendrucks

va-Q-check-Verfahren

Die Fa. va-Q-tec hat das sog. va-Q-check-Verfahren zur Messung des Gasinnendrucks entwickelt. Es basiert auf einer Wärmeflussmessung. Dabei wird ein Messkopf auf das Paneel direkt über der in das Paneel integrierten Sensorscheibe (Abbildung 8) aufgesetzt und ein Temperaturgradient zwischen Messkopf und Sensorscheibe erzeugt. Der resultierende Wärmefluss ist abhängig vom Innendruck des Paneels. Dieser Innendruck kann mit dem va-Q-check-Verfahren im relevanten Messbereich auf ± 1 mbar genau bestimmt werden. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens kann in [10] gefunden werden. Das va-Q-check-Verfahren ist aus patentrechtlichen Gründen ausschließlich für Erzeugnisse der Fa. va-Q-tec erhältlich.



Abbildung 8 Gasinnendruckmessung mit dem va-Q-check-Verfahren:
 Oben links: Sensorscheibe in einem Paneel (rechts neben Etikett)
 Oben rechts: Messkopf auf Sensorscheibe aufgesetzt
 Unten: Messaufbau

Im Verlauf der 21-wöchigen Alterung wurde der Gasinnendruck der va-Q-tec-Paneele am FIW regelmäßig mit einem von der Fa. va-Q-tec zur Verfügung gestellten va-Q-check-Gerät gemessen.

Die Paneele der Fa. Variotec wurden in der Vakuumpresse bei 3 mbar evakuiert. Weitere Innendruckmessungen fanden nicht statt. Während und nach der Alterung erfolgte eine visuelle Beurteilung der Paneele; eine erhebliche Belüftung wäre dabei zu erkennen gewesen.

2.3.2.5 Messung der Wärmeleitfähigkeit

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine direkte Aussage über die Degradation der wärmetechnischen Eigenschaften. An den VIPs der Abmessung 500 mm x 500 mm erfolgte die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit entsprechend DIN EN 12667 2001 [11] sowohl im Neuzustand der unbeschichteten Paneele als auch im gealterten Zustand der beschichteten und unbeschichteten Paneele.

Um den Neuzustand zu charakterisieren, wurden je Hersteller drei Probekörperpaare zufällig ausgewählt und im Zweiplattengerät geprüft. Von den gealterten Paneelen wurde jeweils ein Paar geprüft.

2.3.2.6 Ermittlung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene

Die Ermittlung der Zugfestigkeit ermöglicht eine qualitative Aussage über eine evtl. mechanische Degradation der Folie des kompletten Paneels. Die Ermittlung der Zugfestigkeit ist eine Prüfung im Rahmen der bauaufsichtlichen Zulassung und erfolgt nach DIN EN 1607 [12] senkrecht zur Plattenebene an Paneelen der Größe von 200 mm x 200 mm.

2.4 Ergebnisse Folien

2.4.1 Optische Untersuchungen

Die Oberflächen von unbeschichteten Folien- und Siegelnahtproben waren glatt und stark reflektierend. Lichtmikroskopie erbrachte keine weiteren Erkenntnisse über die visuelle Inspektion hinaus. Ein Einfluss der Ofenalterung war bei den unbeschichteten Proben nicht zu erkennen.

Eine vollständige Entfernung der Klebstoffe von den beschichteten Folien war nicht möglich. Es blieben leichte Verunreinigungen auf der Oberfläche, die eine Inspektion der eigentlichen Folienoberfläche schwierig machten.

Abbildung 9 zeigt den Querschnitt durch eine Folie (links) und den Querschnitt durch eine Siegelnaht (rechts). In dem Folienquerschnitt kann man den dreilagigen Aufbau der eigentlichen Barrierefolie (dunkelgrau und schwarz) und die hellgraue Siegelschicht erkennen. Der Querschnitt durch die Siegelnaht zeigt außen die dreilagigen Barrierschichten, die jetzt über eine gemeinsame Siegelschicht in der Mitte verbunden sind.

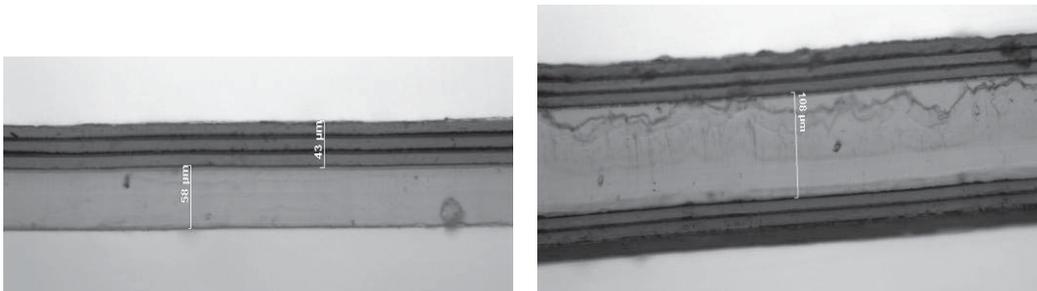


Abbildung 9 Querschnitt einer Folie (links) und einer Siegelnaht (rechts)

Der Informationsgehalt der Folien- und Siegelnahtquerschnitte war nur sehr begrenzt. Durch Alterung hervorgerufene Fehlstellen waren nicht sichtbar. Deshalb wurde beschlossen, in der folgenden Projektphase weitere Querschnitte nur in Ausnahmefällen zu präparieren.

2.4.2 Zugfestigkeit der Siegelnähte

Tabelle 5 und Abbildung 10 zeigen die Ergebnisse der Siegelnahtprüfungen. Die Maximalkräfte beziehen sich auf 25 mm breite Proben; d.h. es sind die absoluten Werte der Kräfte in N, wie sie bei den Prüfungen gemessen wurden. Da im Rahmen des Projektes nur Vergleiche erfolgen sollten und auch keine Werte für die Festigkeit von Siegelnähten aus der Literatur vorlagen, bestand keine Notwendigkeit einer anderen Darstellung der Ergebnisse, wie z.B. einer Normalisierung auf die Probenbreite.

Tabelle 5 Zugfestigkeit der Siegelnähte: Maximalkraft bestimmt an jeweils fünf 25 mm breiten Proben

Hersteller	Kleber	Maximalkraft in N Mittelwert (Standardabweichung)			
		Neu	70 °C 7 Wochen	70 °C 14 Wochen	70 °C 21 Wochen
1	Ohne Kleber	109 (4)	81 (22)	68 (12)	57 (5)
	Kunstharzkleber	98 (10)	63 (15)	51 (9)	62 (7)
	Mineralischer Baukleber	102 (8)	92 (19)	60 (4)	62 (7)
	Bitumenkleber, lösemittelhaltig	109 (3)	92 (21)	68 (17)	24 (3)
	Bitumenkleber, lösemittelfrei	115 (12)	57 (12)	64 (4)	66 (23)
	PU-reaktiver Schmelzkleber	130 (10)	91 (14)	68 (14)	74 (17)
2	Ohne Kleber	56 (8)	71 (9)	119 (2)	84 (8)
	Kunstharzkleber	45 (5)	97 (12)	72 (8)	66 (3)
	Mineralischer Baukleber	46 (3)	107 (15)	97 (8)	63 (5)
	Bitumenkleber, lösemittelhaltig	43 (2)	57 (4)	68 (12)	75 (16)
	Bitumenkleber, lösemittelfrei	49 (1)	126 (9)	121 (13)	110 (27)
	PU-reaktiver Schmelzkleber	108 (8)	84 (24)	113 (8)	64 (3)

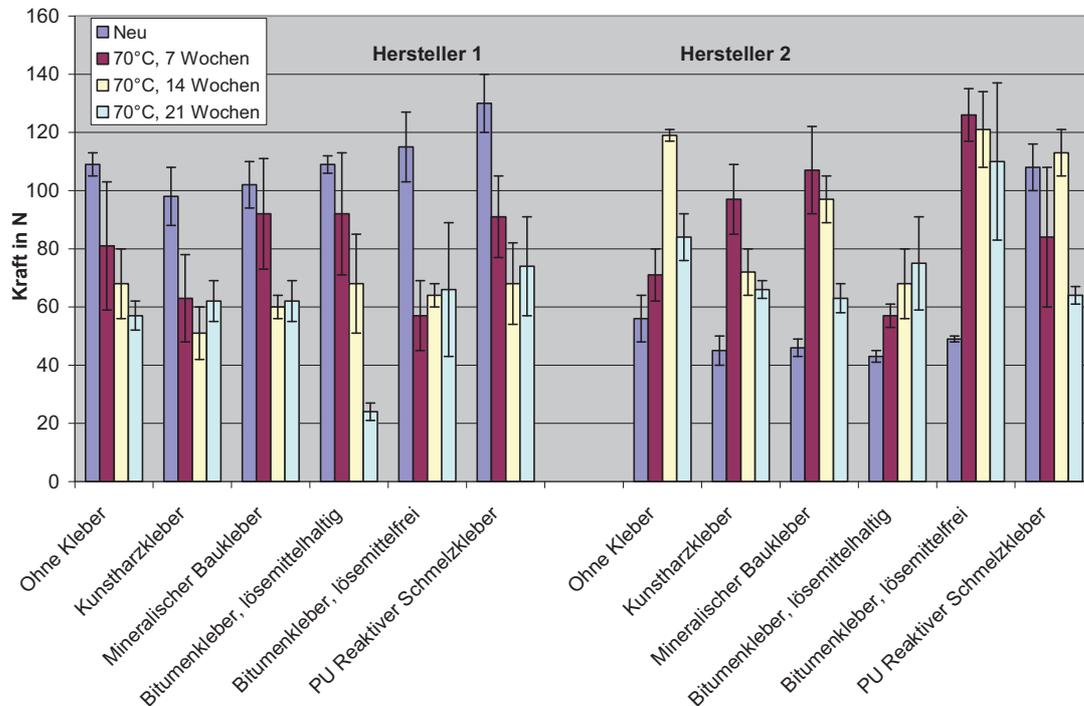


Abbildung 10 Zugfestigkeit der Siegelnähte: Maximalkraft bestimmt an jeweils fünf 25 mm breiten Proben

Siegelnähte von Hersteller 1

Alle Siegelnähte, ohne und mit Beschichtungen, zeigen ein ähnliches Verhalten: Die Festigkeiten im Neuzustand liegen etwa zwischen 100 und 130 N. Mit zunehmender Alterung nehmen die Festigkeiten ab.

Siegelnähte von Hersteller 2

Die Festigkeit im Neuzustand liegt für Siegelnähte mit reaktivem Schmelzkleber bei etwa 110 N, für alle anderen knapp unter 50 N. Für die Siegelnähte mit reaktivem Schmelzkleber nimmt die Festigkeit mit zunehmender Alterung ab. Für alle anderen nimmt die Festigkeit zunächst zu und bei den meisten dann wieder ab.

Die Siegelnähte mit reaktivem Schmelzkleber von Hersteller 2 verhalten sich ähnlich wie die Siegelnähte von Hersteller 1. Alle anderen Siegelnähte von Hersteller 2, unbeschichtete und beschichtete, erreichen im Neuzustand nur etwa die Hälfte der Festigkeit der Siegelnähte von Hersteller 1 und erst im Verlauf der Alterung eine Festigkeit ähnlich dem Neuzustand der Siegelnähte von Hersteller 1.

Da beide Hersteller die gleiche Folie einsetzen, und die Beschichtungen und Alterungen die gleichen waren, ist zu vermuten, dass die Unterschiede im Festigkeitsverhalten auf Unterschiede in der Verarbeitung, d.h. Unterschiede bei den Schweißverfahren, beruhen. Diese Vermutung wird unterstützt durch die visuelle Erscheinung der Siegelnähte (Abbildung 11). Die Siegelnähte von Hersteller 1 sind „faltiger“ als die von Hersteller 2, was auf einen höheren Wärmeeintrag während des Schweißvorgangs hindeutet (Schrumpfung der Folie in der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht).

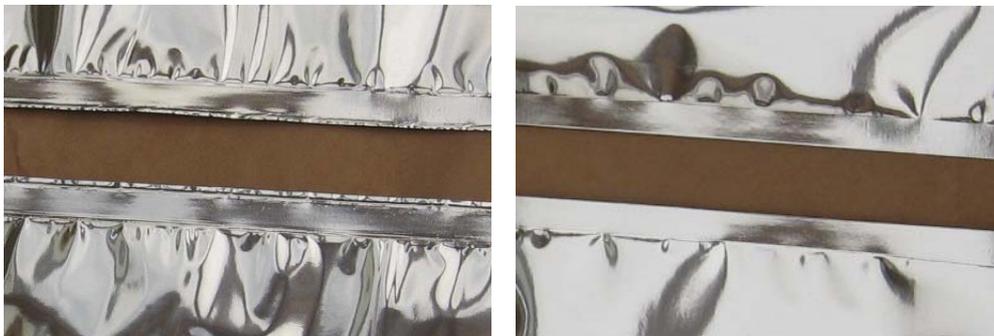


Abbildung 11 Siegelnähte von Hersteller 1 (links) und Hersteller 2 (rechts)

Durch den höheren Wärmeeintrag während des Schweißvorgangs erzielt Hersteller 1 eine höhere Ausgangsfestigkeit. Bei den Siegelnähten von Hersteller 2 wird eine ähnliche Festigkeit erst durch eine thermische „Nachbehandlung“ erreicht, nämlich dem Aufbringen des heißen Schmelzklebers bzw. der Lagerung bei erhöhter Temperatur (während der Alterung). Mit einer Verzögerung von einigen Wochen tritt dann auch bei den Siegelnähten von Hersteller 2 nach der anfänglichen Festigkeitssteigerung ein alterungsbedingtes Abfallen der Siegelnahtfestigkeit auf.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens besonders hervorzuheben ist, dass innerhalb der Herstellergruppen das Alterungsverhalten ähnlich erscheint. Es sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den unbeschichteten und den beschichteten Proben erkennbar; d.h. ein Einfluss der Klebstoffbeschichtungen auf das Alterungsverhalten ist nicht feststellbar, insbesondere keine beschleunigende Wirkung. Die Abnahme der Festigkeit der Siegelnähte wird wahrscheinlich eher von einer physikalischen (temperaturbedingten) Alterung der Kunststoffe (Folie und Siegelnaht) hervorgerufen als durch die chemische Einwirkung der Klebstoffe.



Auffälligkeiten wie z.B. die sehr niedrigen Festigkeit der „Bitumenkleber, lösemittelhaltig, 21 Wochen“ Proben können nicht zweifelsfrei der Wirkung der Beschichtung zugeordnet werden, denn es lag nur eine kleine Anzahl von Proben vor; bedingt durch Reste der Beschichtung war das Schneiden der Proben häufig schwierig. Es kann evtl. zu leichten Beschädigungen an den Schnittkanten gekommen sein, die dann die Festigkeit verringert haben.

Bei den Zugprüfungen der Siegelnähte zeigten sich nicht nur Unterschiede in den Maximalkräften, sondern auch im Versagensmechanismus und der Form der Kraft-Weg-Kurven. In Abbildung 12 sind verschiedene Kurven- und Versagens-typen dargestellt, Abbildung 13 zeigt zugehörige Photos von typischen Probekörpern.

Bei Kurventyp A wird die Probe erheblich gestreckt bevor ein Versagen durch Aufreißen der Siegelschicht und/oder Delamination innerhalb einer oder beider Folien erfolgt. Bei Typ B reißt nach, im Vergleich zu A, geringer Streckung einer der Folienstreifen von der Siegelnaht ab. Und bei Typ C wird die Siegelnaht nach Überschreiten einer meist recht moderaten Maximalkraft bei einer sehr niedrigen Last aufgeschält. U.U. kann jedoch sowohl bei Typ B als auch bei Typ C eine Maximalkraft erreicht werden, die ähnlich hoch ist wie bei Typ A.

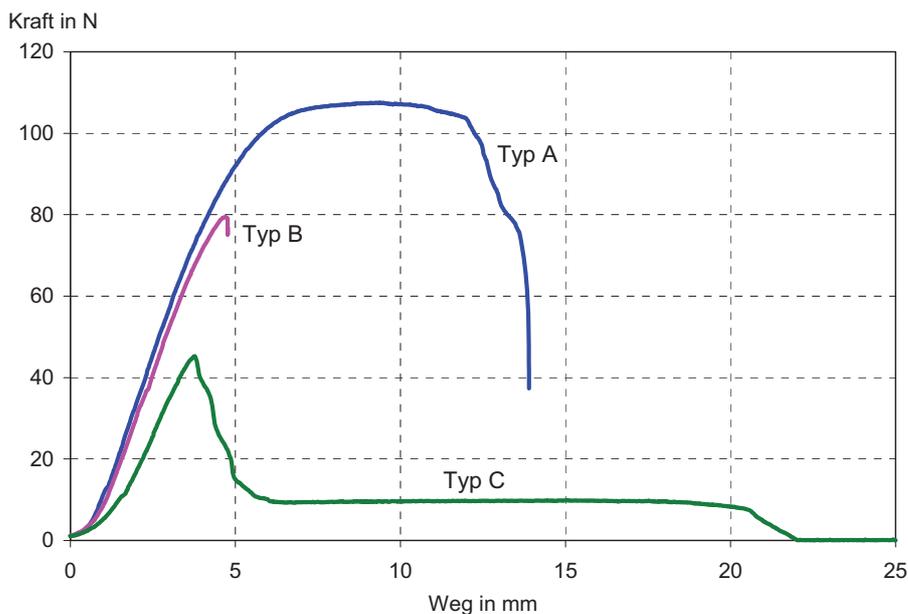
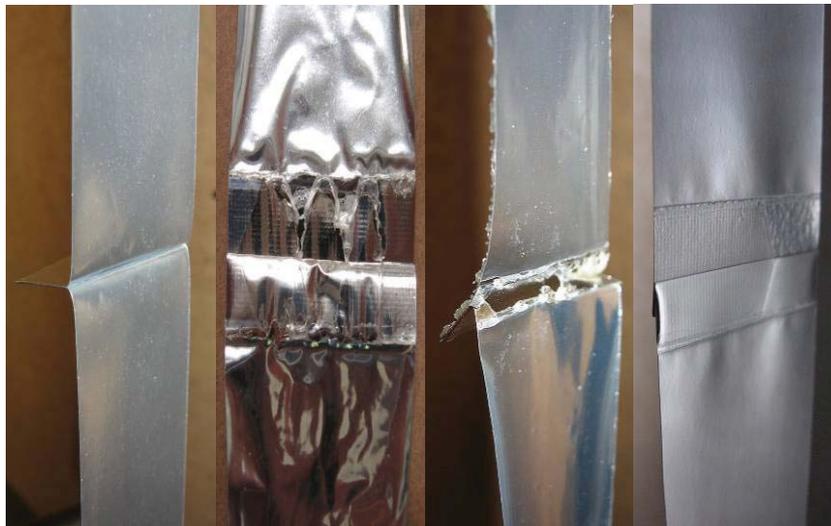


Abbildung 12 Zugprüfung der Siegelnaht: verschiedene Kurven-/Versagenstypen



Unbelastet

Typ A

Typ B

Typ C

Abbildung 13 Siegelnahtproben vor und nach dem Zugversuch

Alle Siegelnähte des Herstellers 1 zeigten im Neuzustand Verhalten gemäß Typ A. Durch die Alterung trat ein Wechsel zu den Typen B und C auf. Die Siegelnähte von Hersteller 2 zeigten bereits im Neuzustand überwiegend Typ B- und C-Verhalten; nur die mit reaktivem Schmelzkleber beschichteten Probekörper zeigten Typ A-Verhalten. Die gealterten Siegelnähte von Hersteller 2 versagten gemäß Typ B und C.

Ob ein Zusammenhang zwischen dem mechanischen Verhalten einer Siegelnaht und ihrer Gasdichtheit besteht, wurde in diesem Forschungsvorhaben nicht untersucht.

2.4.3 He-Permeation

Tabelle 6 und Abbildung 14 zeigen die Ergebnisse der He-Permeationsmessungen tabellarisch bzw. graphisch. Unter Berücksichtigung der geringen Anzahl von Proben und Messungen sind keine wesentlichen Veränderungen der Permeationsraten durch die Alterung oder den Einfluss der Klebstoffe erkennbar. Insbesondere treten keine signifikanten Erhöhungen der Permeationsraten auf.



Tabelle 6 He-Permeation durch Hochbarrierefolien

		Permeationskoeffizient in $\text{cm}^3 / (\text{m}^2 \text{ bar d})$	
		Mittelwert	(Standardabweichung)
Hersteller	Kleber	Neuzustand	Nach Alterung 70°C/21 Wochen
1	Ohne Kleber	2,01 (0,20)	1,92 (0,04)
	Kunstharzkleber	-	1,81 (0,49)
	Mineralischer Baukleber	-	2,08 (0,16)
	Bitumenkleber, lösemittelhaltig	-	1)
	Bitumenkleber, lösemittelfrei	-	1,33 2)
	PU-reaktiver Schmelzkleber	-	2,08 (0,10)
2	Ohne Kleber	1,86 (0,14)	1,83 (0,13)
	Kunstharzkleber	-	1,92 (0,11)
	Mineralischer Baukleber	-	2,10 (0,24)
	Bitumenkleber, lösemittelhaltig	-	2,25 (0,04)
	Bitumenkleber, lösemittelfrei	-	2,20 (0,21)
	PU-reaktiver Schmelzkleber	-	2,11 (0,09)

1) Klebstoffreste auf der Gegenseite der Proben: Permeationsmessung nicht möglich, da Kontaminationsgefahr für die Messapparatur.

2) Wie 1), aber nur eine Probe betroffen.

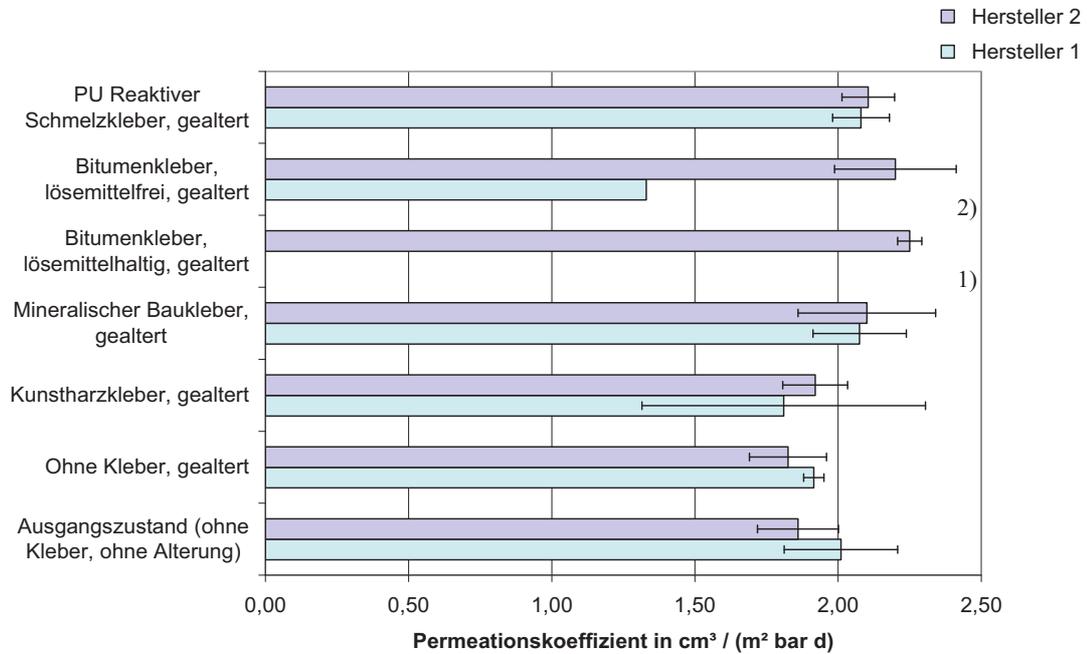


Abbildung 14 He-Permeation durch Hochbarrierefolien (Werte aus Tabelle 6)

- 1) Klebstoffreste auf der Gegenseite der Proben: Permeationsmessung nicht möglich, da Kontaminationsgefahr für die Messapparatur.
- 2) Wie 1), aber nur eine Probe betroffen.

2.5 Ergebnisse Paneele

2.5.1 Gasinnendruck

An den VIP-Paneelen der Fa. va-Q-tec wurde während der Alterung der Gasinnendruck mittels des va-Q-check-Verfahrens ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 für Paneele der Abmessungen 500 mm x 500 mm x 10 mm bzw. 200 mm x 200 mm x 10 mm zusammengefasst. Zusätzlich sind die Ergebnisse in Abbildung 15 und Abbildung 16 grafisch dargestellt.

2 Einwirkung verschiedener Baukleber



Tabelle 7 Gasinnendruck in mbar in Abhängigkeit der Alterungsdauer, ermittelt mit dem va-Q-check-Verfahren. Mittelwerte von je drei Proben der Abmessung von 500 mm x 500 mm x 10 mm

Kleber	Tage nach Beginn der Alterung										Steigung in mbar/a
	0	21	42	56	72	86	98	119	129	147	
Ohne Kleber	0,9	1,4	1,9	2,3	2,7	3,0	3,3	3,6	3,8	4,1	8,0
Kunstharzkleber	0,9	1,7	2,7	3,3	4,2	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	11,9
Mineralischer Baukleber	0,9	1,8	2,8	3,0	4,5	4,9	5,1	5,5	5,8	6,3	13,6
Bitumenkleber, lösemittelhaltig	0,8	1,3	1,5	1,5	2,0	2,1	2,2	2,4	2,6	2,7	4,5
Bitumenkleber, lösemittelfrei	0,9	1,5	2,2	2,7	3,2	3,5	3,7	3,9	3,9	4,1	8,1
PU Reaktiver Schmelzkleber	0,8	1,9	2,7	2,9	4,0	4,6	4,9	4,9	5,0	6,2	12,2

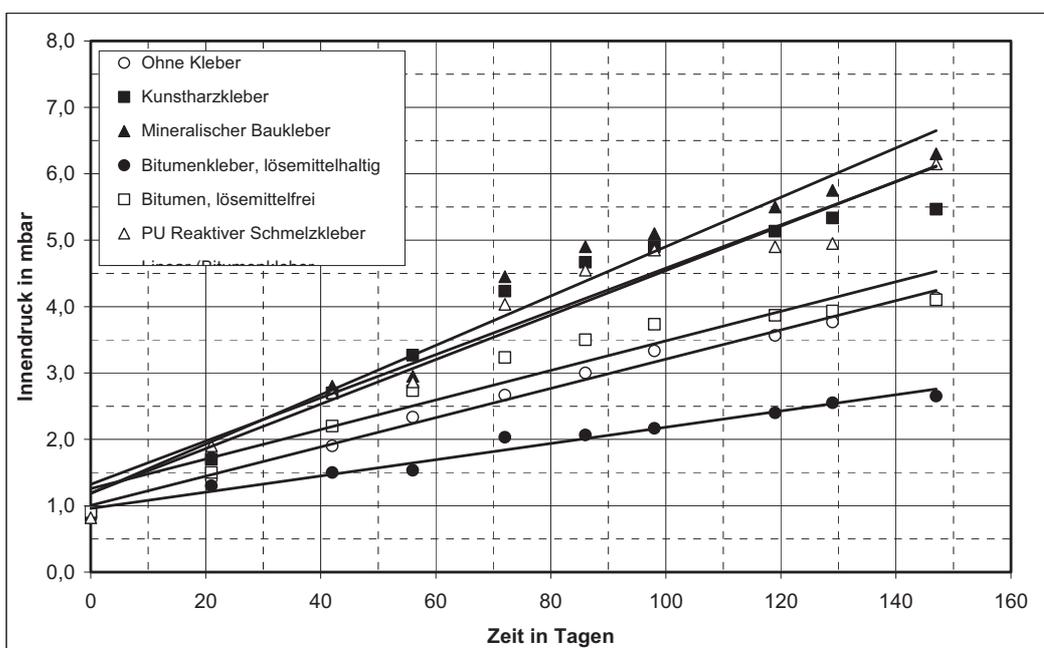


Abbildung 15 Zeitabhängiger Gasinnendruck nach der Beschichtung mit verschiedenen Klebstoffen, Probe 500 mm x 500 mm x 10 mm

Tabelle 8 Gasinnendruck in mbar in Abhängigkeit der Alterungsdauer, ermittelt mit dem va-Q-check-Verfahren. Mittelwerte von je drei Proben der Abmessung von 200 mm x 200 mm x 10 mm

Kleber	Tage nach Beginn der Alterung										Steigung in mbar/a
	0	21	42	56	72	86	98	119	129	147	
Ohne Kleber	1,0	1,8	2,5	3,4	4,1	4,2	4,5	5,4	5,6	5,8	12,4
Kunstharzkleber	0,9	1,7	2,7	2,8	3,6	4,1	4,7	5,8	6,0	6,2	14,0
Mineralischer Baukleber	1,0	1,7	2,6	2,7	3,2	3,5	4,2	5,3	5,8	6,1	13,0
Bitumenkleber, lösemittelhaltig	1,0	1,8	2,7	3,3	4,2	4,4	4,8	5,7	6,7	7,0	15,1
Bitumenkleber, lösemittelfrei	0,9	1,7	2,3	3,2	3,6	4,2	5,0	5,5	6,0	6,2	13,9
PU Reaktiver Schmelzkleber	0,8	1,6	2,5	2,9	4,2	4,5	5,0	5,4	6,0	7,1	15,2

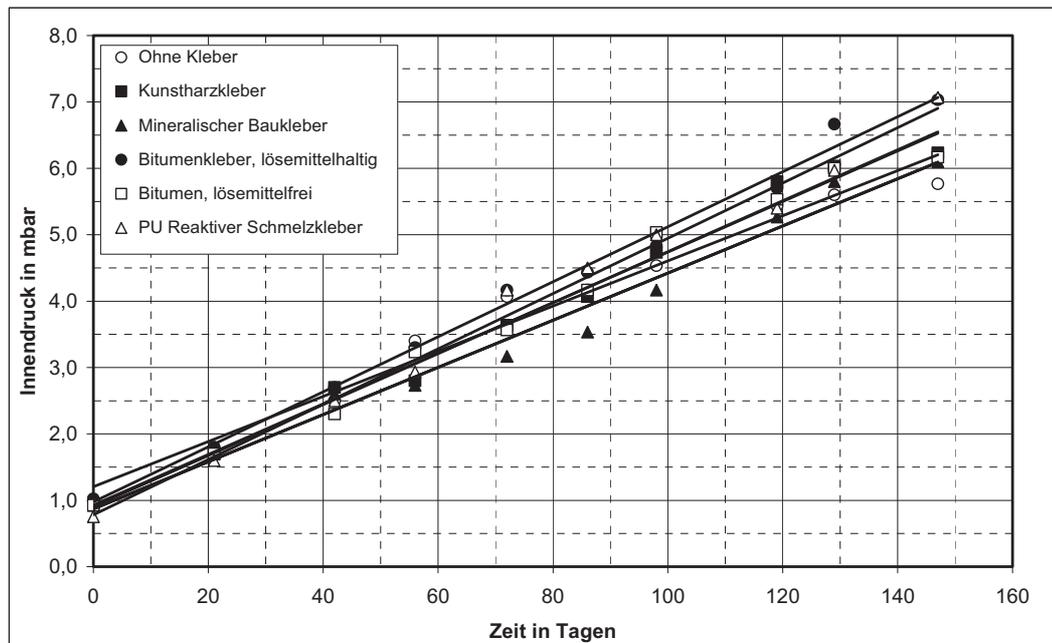


Abbildung 16 Zeitabhängiger Gasinnendruck nach der Beschichtung mit verschiedenen Klebstoffen, Probe 200 mm x 200 mm x 10 mm



Die Alterung führt zu einem Anstieg des Gasinnendrucks. Bei den Paneelen mit der Abmessung 200 mm x 200 mm x 10 mm ist die Zunahme des Gasinnendrucks (s. Steigung in Tabelle 7) nahezu unabhängig von der jeweiligen Klebstoffbeschichtung. Bei den großen Elementen mit der Abmessung 500 mm x 500 mm x 10 mm scheinen die Klebstoffe „Kunstharzkleber“, „Mineralischer Baukleber“ und „reaktiver Schmelzkleber“ zu einem leicht erhöhten Druckanstieg zu führen; der lösemittelhaltige Bitumenkleber scheint eher abdichtend zu wirken (s. Steigung in Tabelle 8). Aufgrund der begrenzten Messgenauigkeit sowie der begrenzten Probenanzahl können diese auffallenden Druckanstiege jedoch nicht als signifikant bezeichnet werden. Die beobachteten Druckanstiege liegen in der gleichen Größenordnung wie der Druckanstieg bei den unbeschichteten Systemen.

Diese Interpretation der Messergebnisse wird durch die im nachfolgenden Kapitel dargestellten Messungen der Wärmeleitfähigkeit bestätigt.

2.5.2 Wärmeleitfähigkeit

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit der VIPs erfolgte mit der Zweiplatten-Apparatur entsprechend EN 12667. Die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Dicke der Paneele betrug ca. 10 mm.

Die Ermittlung der Ausgangswerte im Neuzustand erfolgte aufgrund der großen Probekörperzahl nicht für jeden Probekörper, sondern an drei zufällig ausgewählten Probekörperpaaren pro Hersteller. Die Probekörper waren nicht beschichtet. Die Wärmeleitfähigkeit im gealterten Zustand wurde an je einem Probenpaar bestimmt.

Tabelle 9 Wärmeleitfähigkeiten ermittelt nach DIN EN 12667 2001 [11]

Hersteller	Kleber	Wärmeleitfähigkeit in W/(mK)	
		Neuzustand	Nach Alterung (70 °C/21 Wochen)
1	Ohne Kleber	0,0053 ± 0,0002	0,0055
	Kunstharzkleber		0,0058
	Mineralischer Baukleber		0,0061

Hersteller	Kleber	Wärmeleitfähigkeit in W/(mK)	
		Neuzustand	Nach Alterung (70 °C/21 Wochen)
	Bitumenkleber, lösemittelhaltig		0,0057
	Bitumenkleber, lösemittelfrei		0,0055
	PU-reaktiver Schmelzkleber		0,0061
2	Ohne Kleber	0,0056 ± 0,0002	0,0061
	Kunstharzkleber		0,0061
	Mineralischer Baukleber		0,0064
	Bitumenkleber, lösemittelhaltig		0,0057
	Bitumenkleber, lösemittelfrei		0,0059
	PU-reaktiver Schmelzkleber		0,0064

Die durch die 21-wöchige Lagerung bei 70 °C simulierte Alterung der VIPs führte zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Diese Erhöhung war jedoch für alle geprüften Paneele im Rahmen zu erwartender Werte. Bei keiner der Beschichtungen war im Vergleich zu den unbeschichteten Referenzproben ein signifikant negativer Einfluss feststellbar.

Vereinzelt traten Belüftungen von Paneelen auf. Ein ursächlicher Zusammenhang mit den Beschichtungen war jedoch nicht erkennbar. Wahrscheinlicher ist, dass die belüfteten Paneele bei der häufigen Handhabung zur Messung des Innendrucks trotz größter Sorgfalt beschädigt wurden.

Die Paneele der Fa. Variotec zeigten vor und nach der Wärmelagerung keine Auffälligkeiten. Wie in 2.3.2.4 erläutert, konnte der Innendruck an diesen Probekörpern nicht bestimmt werden.

2.5.3 Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene

Die Messung der Zugfestigkeit der VIPs erfolgte nach DIN EN 1607 senkrecht zur Plattenebene. Die ermittelten Zugfestigkeiten sind in Tabelle 10 dargestellt.

Die Ermittlung des Ausgangswertes im Neuzustand erfolgte an fünf zufällig ausgewählten Probekörpern pro Hersteller. Angegeben sind der Mittelwert der fünf Messungen sowie die Standardabweichung. Die Probekörper waren nicht beschichtet. Nach der Alterung wurden jeweils zwei Paneele geprüft und der Mittelwert gebildet.

Tabelle 10 Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene ermittelt DIN EN 1607 [11]

Hersteller	Kleber	Zugfestigkeit in kPa	
		Neuzustand	Nach Alterung (70°C/21 Wochen)
1	Ohne Kleber	100 ± 4	100
	Kunstharzkleber		93 *
	Mineralischer Baukleber		71 *
	Bitumenkleber, lösemittelhaltig		55 *
	Bitumenkleber, lösemittelfrei		90 *
	PU-reaktiver Schmelzkleber		111
2	Ohne Kleber	98 ± 3	98
	Kunstharzkleber		89 *
	Mineralischer Baukleber		99 *
	Bitumenkleber, lösemittelhaltig		90 *
	Bitumenkleber, lösemittelfrei		87 *
	PU-reaktiver Schmelzkleber		88

* Versagen der Probekörper durch Ablösen der Klebstoffschicht von der Hüllfolie

Die Probekörper mit Beschichtungen aus Kunstharzkleber, mineralischem Baukleber sowie den bituminösen Klebern versagten durch ein Ablösen der Klebstoffschicht von der Hüllfolie, ohne eine erkennbare Wirkung auf das Vakuum der VIPs zu haben. Die niedrigen Werte für den mineralischen Baukleber (71 kPa) und den lösemittelhaltigen Bitumenkleber (55 kPa) bei Hersteller 1 lassen also nicht auf einen schädigenden Einfluss der Klebstoffe auf die Hüllfolie schließen. Wäre dieser vorhanden müsste die Folie selber unter niedriger Last versagen und nicht die Grenzschicht zwischen Klebstoff und Folie.

Bei den unbeschichteten Paneelen und den mit dem Schmelzkleber beschichteten Paneelen trat eine Delaminierung der Hüllfolie auf; bei Lasten, die denen im Neuzustand der unbeschichteten Paneele ähneln. Das bedeutet, weder durch die Beschichtung mit reaktivem Schmelzkleber noch durch die Alterung wird eine im Zugversuch erkennbare Schädigung der VIP-Umhüllung verursacht.

Da es sich bei den Prüfungen der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach DIN EN 1607 um eine zerstörende Prüfung handelt, ist eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse des Neuzustandes und nach der Alterung aufgrund der zerstörenden Prüfmethode nicht möglich. Eine Interpretation kann daher nur tendenziell erfolgen und zeigt im Wesentlichen keinen deutlich negativen Einfluss der jeweiligen Beschichtung.

2.6 Zusammenfassung

Nach Beschichtung mit verschiedenen Klebstoffen und Alterung für 21 Wochen bei 70 °C wurden Eigenschaften von Folien, Siegelnähten und Paneelen geprüft.

Die Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die optischen Untersuchungen zeigten keine Veränderung der Hüllfolie.
- Die Festigkeit der Siegelnähte wurde durch die Alterung erniedrigt und der Versagensmechanismus verändert. Ein signifikanter Einfluss der Klebstoffbeschichtungen konnte jedoch nicht festgestellt werden.
- Die He-Permeationsraten wurden weder durch die Alterung noch durch die Klebstoffbeschichtungen signifikant verändert.



- Die Alterung führte zu einem Anstieg des Gasinnendrucks in einer Größenordnung, die zu erwarten war.
- Die Wärmeleitfähigkeit wurde durch die Alterung leicht erhöht. Ein Effekt der Klebstoffbeschichtungen war nicht feststellbar.
- Die Messungen der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene zeigten weder einen Einfluss der Alterung noch einen der Klebstoffbeschichtungen.

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen kann keine signifikante Wirkung der Klebstoffbeschichtungen auf die Folienumhüllung abgeleitet werden.

3 Einwirkung nicht aushärtender (feuchter) alkalischer Kleber

3.1 Untersuchungsprogramm

Werden Vakuumisulationspaneele mit Klebstoffen auf nicht saugfähige oder diffusionsbehindernde Untergründe aufgebracht, so kann ein verzögertes Aushärten bzw. Abbinden des Klebstoffes auftreten. Im Regelfall wird die Aushärtung zunächst nur am Rand der Paneelfläche stattfinden; im Zentrum der Paneelfläche dauert die Aushärtung, je nach Größe des Paneels und Dicke der aufgetragenen Klebstoffschicht, länger. Im schlimmsten Fall verbleibt feuchte teigige Klebstoffmasse dort sehr lange. Ist der feuchte Klebstoff alkalisch, so könnte auch die Aluminiumbeschichtung korrodieren und die Gasundurchlässigkeit der Folienumhüllung beeinträchtigt werden.

Um diesen Sachverhalt zu untersuchen, wurden zwei geeignete Klebstoffe ausgewählt und auf Folien, Siegelnähte und Paneele aufgetragen. Zur Verhinderung oder zumindest Verlangsamung der Aushärtung wurden die Klebstoffschichten mit Folie abgedeckt und die Probekörper zusätzlich in Folienbeutel eingeschweißt. Im Abstand von mehreren Tagen erfolgten visuelle Inspektionen, Festigkeitsprüfungen der Siegelnähte und Gasinnendruckmessungen. Bestimmungen der He-Permeation und der Wärmeleitfähigkeit wurden nur für den Fall von Auffälligkeiten bei den anderen Untersuchungen vorgesehen.

3.2 Probekörper

3.2.1 Folienumhüllungen und komplette Paneele

Die Projektpartner stellten folgende Probekörper bereit:

Variotec:

22 Hochbarrierefolien 800 mm x 800 mm mit Siegelnaht in der Mitte

22 Hochbarrierefolien 800 mm x 800 mm ohne Siegelnaht (als Abdeckfolie)

28 Hochbarrierefolien 500 mm x 500 mm ohne Siegelnaht (als Abdeckfolie)

va-Q-tec

28 VIPs 500 mm x 500 mm x 10 mm mit va-Q-check-Sensoren



3.2.2 Klebstoffe

Der mineralische Baukleber (PCI Elfatherm) und der Kunstharzkleber (Sto, s. Tabelle 4) wurden ausgewählt, weil sie im unausgehärteten feuchten Zustand einen pH-Wert von 9 bis 10 haben.

3.2.3 Beschichtung der Probekörper

Die Beschichtung mit Klebstoff erfolgte genau wie in Kap. 2.2.3 beschrieben. Diesmal wurde jedoch auf die feuchte Klebstoffschicht eine Abdeckfolie gleicher Größe wie der Probekörper gelegt, um den Luftzutritt und somit die Aushärtung zu minimieren. Zusätzlich wurden die abgedeckten Probekörper in Folienbeutel eingeschweißt.

3.3 Durchführung der Untersuchungen

3.3.1 Alterung/Belastung

Die Probekörper wurden in Kontakt mit dem feuchten alkalischen Klebstoff gelagert.

Nach 2, 14 und 30 Tagen Alterung/Belastung wurden je vier Paneele den Folienbeuteln entnommen und die Abdeckfolie entfernt, so dass die Klebstoffe aushärten/austrocknen konnten. Während der Trocknungsphase von ca. zwei Wochen wurde der Gasinnendruck mitgemessen.

Die Folien/Siegelnähte wurden bis zu 30 Tage in Kontakt mit dem feuchten Klebstoff belassen. Dann wurde der Klebstoff abgewaschen. (Mit festen Klebstoffresten wäre eine mechanische Prüfung der Siegelnähte nicht möglich gewesen.)

3.3.2 Analysemethoden

Zur Charakterisierung der Probekörper wurden folgende Analysemethoden angewandt:

Folien/Siegelnähte:

- Visuelle Inspektion
- Zugfestigkeit der Siegelnaht gemäß 2.3.2.2

Paneele:

- Gasinnendruckmessungen gemäß 2.3.2.4 erfolgten während der Alterung und der Trocknungsphase zweimal wöchentlich. Dazu mussten die Paneele jeweils für etwa 5 Minuten aus dem Folienbeutel entnommen werden. Nach der Messung wurden die Paneele wieder in den Beutel verpackt.
- Messungen der Wärmeleitfähigkeit gemäß 2.3.2.5 wurden nicht durchgeführt, da die Zunahme der Gasinnendrucke kleiner als 3 mbar war.

3.4 Ergebnisse Folien

Der mineralische Baukleber war trotz der Abdeckung und der Verpackung der Proben in Folienbeutel nach etwa zehn Tagen ausgehärtet. Zur Analyse wurden nach zwei und sieben Tagen Belastung Proben entnommen.

Der Kunstharzkleber hatte auch nach einem Monat noch eine feuchte viskose Konsistenz. Proben zur Analyse wurden nach sieben und dreißig Tagen Belastung entnommen.

Visuelle Inspektion

Der mineralische Baukleber hat von den Kanten aus die Aluminiumbeschichtungen in der Folie/Siegelnaht bis zu einer Tiefe von etwa 1–2 mm angegriffen (Abbildung 17). In der Fläche sahen die Proben nach der Einwirkung des Klebstoffes unverändert aus.

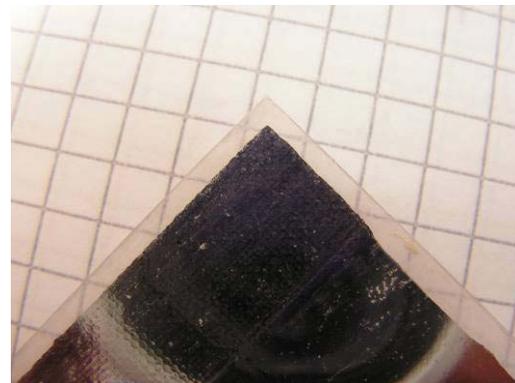
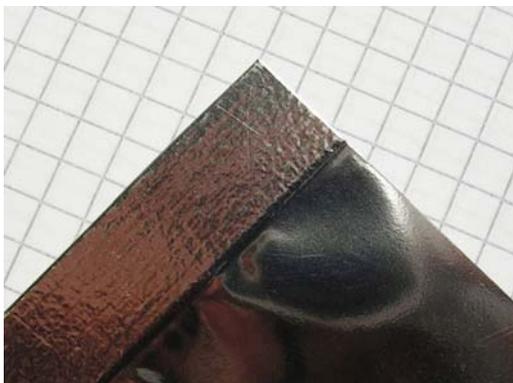


Abbildung 17 Folie mit Siegelnaht
Links: im Ausgangszustand;
Rechts: nach Einwirkung von feuchtem mineralischem Baukleber

3 Einwirkung nicht aushärtender (feuchter) alkalischer Kleber



Die dem Kunstharzkleber ausgesetzten Proben zeigten visuell keine Auffälligkeiten.

Zugfestigkeit der Siegelnaht

Weder der Kunstharzkleber noch der mineralische Baukleber hatten einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit der Siegelnähte (Abbildung 18). Der Kurven-/Versagenstyp war bei den beschichteten Proben genau wie bei den unbeschichteten Referenzproben Typ A gemäß 2.4.2.

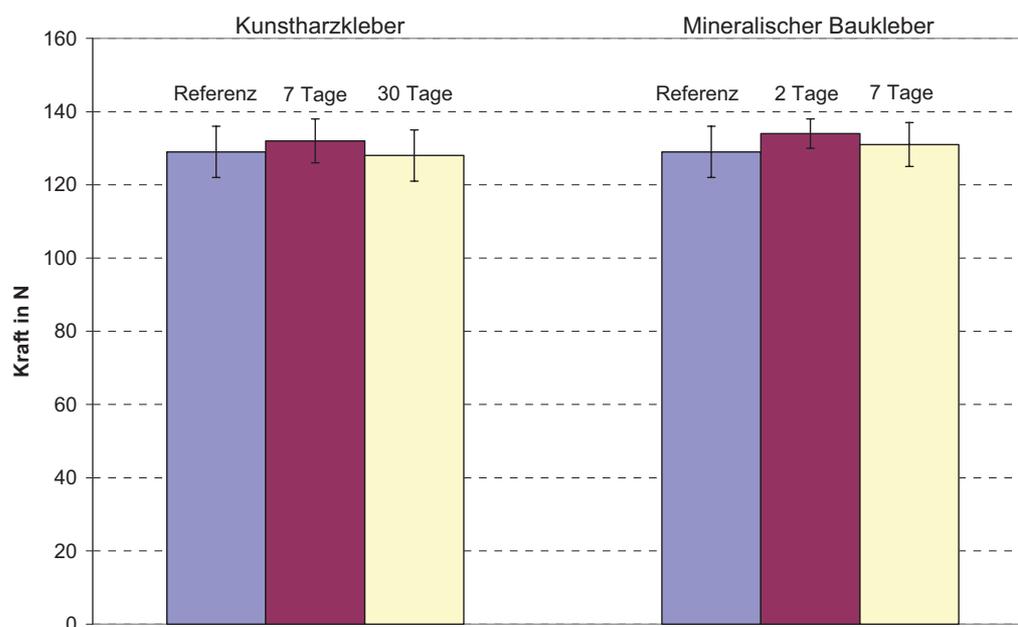


Abbildung 18 Zugfestigkeit der Siegelnähte nach Einwirkung von feuchten Klebern

3.5 Ergebnisse Paneele

Die Ergebnisse der Messungen des Gasinnendrucks sind in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt.

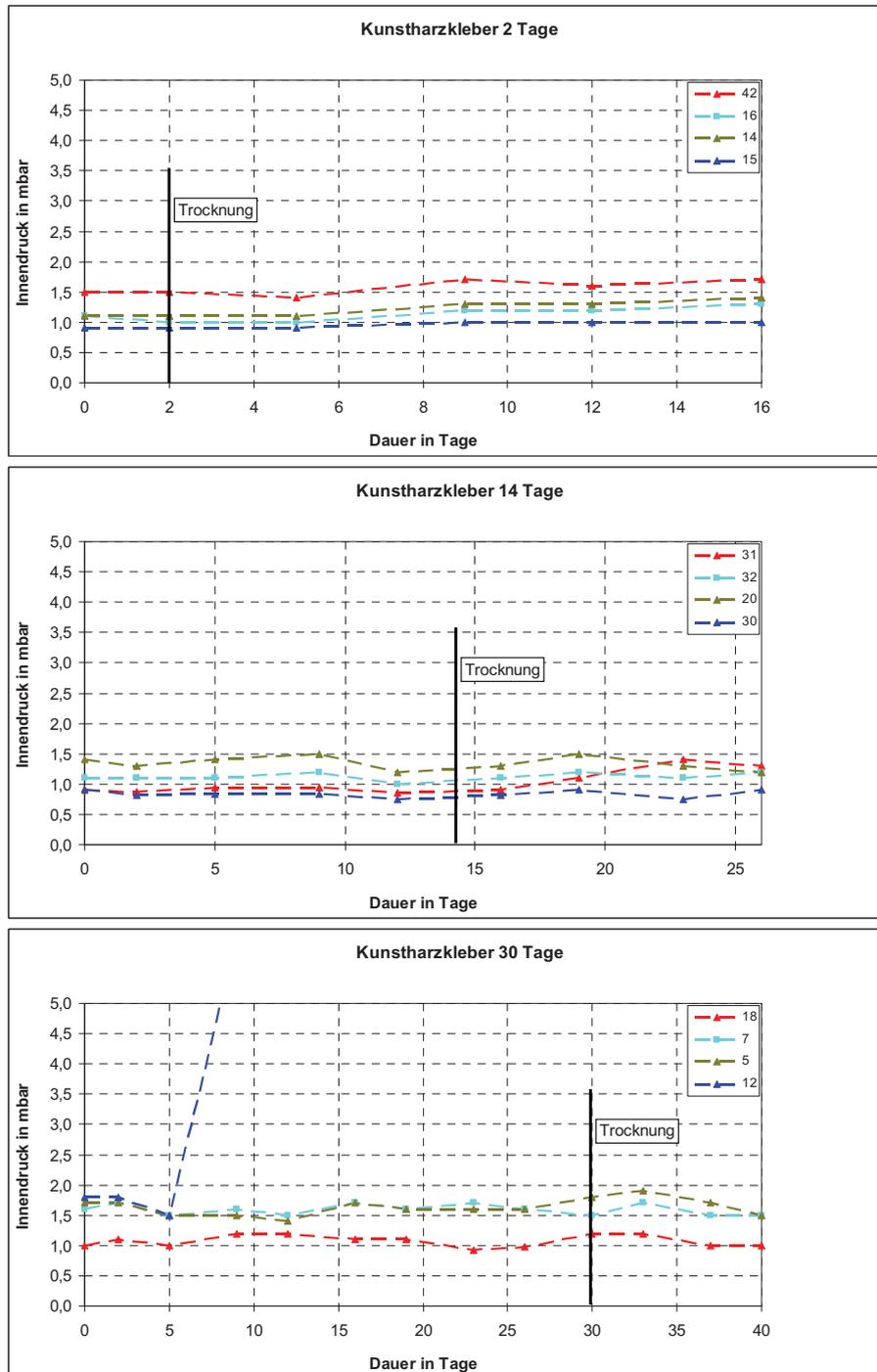


Abbildung 19 Zeitabhängiger Gasinnendruck während und nach Einwirkung von Kunstharzkleber. Die Einwirkungsdauer betrug hierbei 2, 14 sowie 30 Tage. Panelgröße: 500 mm x 500 mm x 10 mm

3 Einwirkung nicht aushärtender (feuchter) alkalischer Kleber

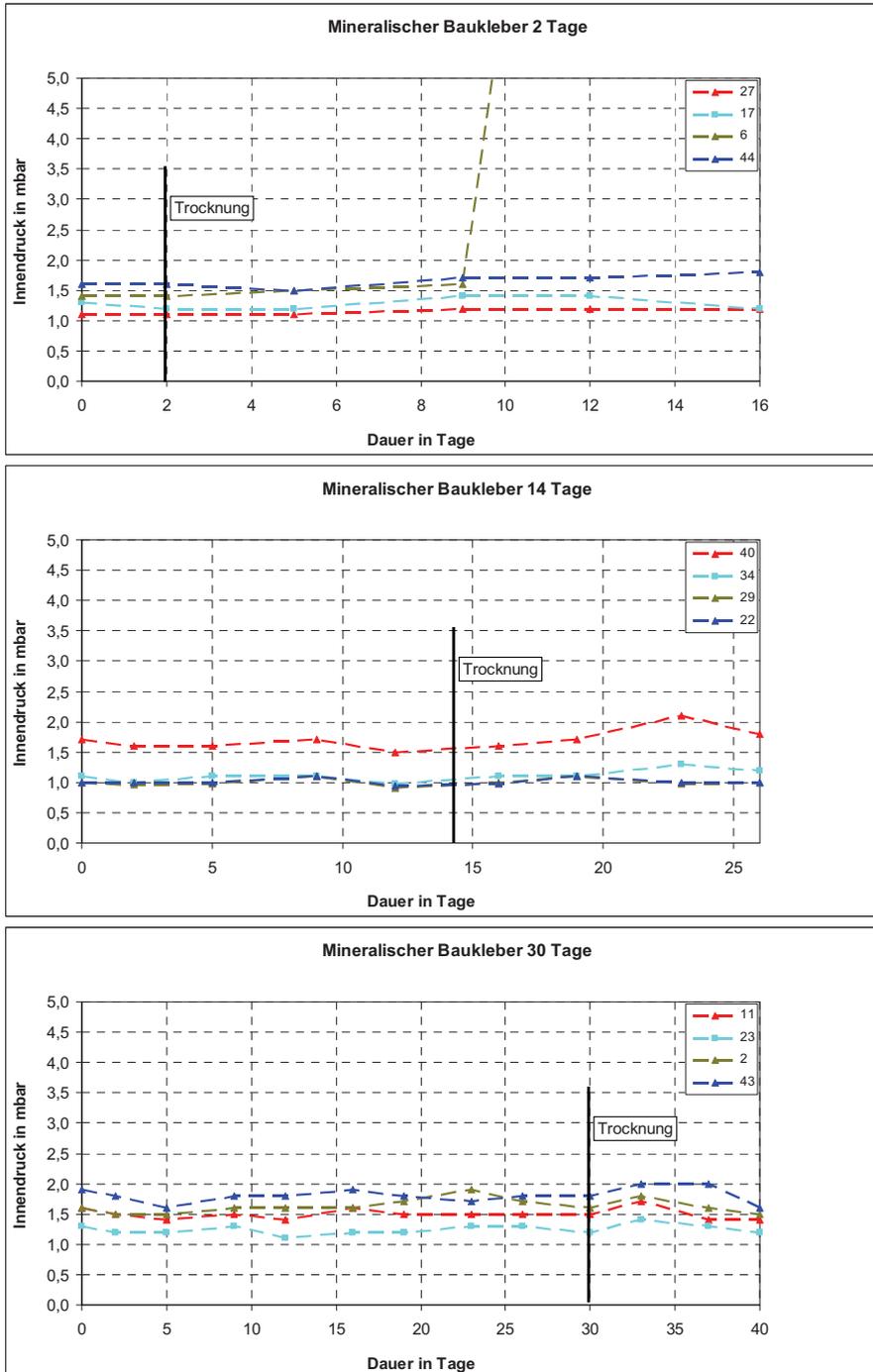


Abbildung 20 Zeitabhängiger Gasinnendruck während und nach Einwirkung von mineralischem Baukleber. Die Einwirkungsdauer betrug hierbei 2, 14 sowie 30 Tage. Panelgröße: 500 mm x 500 mm x 10 mm

Es zeigten sich während der jeweiligen Versuchsdauer keine Auffälligkeiten. Die beiden belüfteten Paneele wiesen keinen systematischen Zusammenhang zu einem verwendeten Kleber auf. Teilweise ist ein leichter Anstieg des Innendrucks erkennbar, jedoch liegt dieser deutlich unterhalb der in den jeweiligen Zulassungen vorgegebenen Höchstwerte (bei Auslieferung) von 3 bzw. 5 mbar.

3.6 Zusammenfassung

Die Folien/Siegelnähte sowie Paneele wurden über einen gewissen Zeitraum feuchten, alkalischen Klebstoffen ausgesetzt.

Die Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die visuelle Inspektion zeigte einen Angriff der Siegelnaht von der Kante aus durch einen der feuchten alkalischen Klebstoffe. In der Fläche war keine Wirkung der Belastung erkennbar.
- Sowohl die Festigkeit als auch das Versagensverhalten der Siegnähte wurde durch die Belastung nicht verändert.
- Die Belastung führte zu keinem Anstieg des Gasinnendrucks der Paneele.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zeigte sich keine Schädigung der Folienumhüllung durch die feuchten alkalischen Klebstoffbeschichtungen. Jedoch kann bei einer länger andauernden Einwirkung von feuchten alkalischen Klebstoffen eine von der Schnittkante ausgehende Schädigung der Siegelnaht nicht ausgeschlossen werden.

4 Einwirkung von Feuchtigkeit und ausgewaschenen Salzen aus dem Untergrund

4.1 Untersuchungsprogramm

Das Problem der Einwirkung von Feuchtigkeit und alkalischen Medien wurde im vorigen Kapitel bereits behandelt. Dort ging es um nicht-aushärtende Klebstoffe. Aber auch der Untergrund, auf den die VIPs aufgeklebt sind, kann über Kapillarwirkungen Feuchtigkeit an die Folienumhüllung heranführen. Beim Kapillartransport des Wassers durch den Untergrund können Salze, z.B. aus dem Mauerwerk oder Beton, ausgewaschen werden, so dass die Folienumhüllung auch in diesem Fall mit einer alkalischen Lösung in Kontakt kommen kann.

Diese Belastungen wurden für Folie/Siegelnähte und Paneele durch unterschiedliche Untersuchungen simuliert:

- Die Folien mit Siegelnähten wurden mehrere Wochen zwischen mit verdünnter Natronlauge durchfeuchteten Tüchern gelagert. Die Natronlauge hatte einen pH-Wert von 9. Um eine vorzeitige Austrocknung zu verhindern, waren die Proben in Folienbeutel eingeschweißt. Eine Beurteilung der Einwirkungen erfolgte durch visuelle Inspektion und Zugversuche an den Siegelnähten.
- Bei den Paneelen wurde versucht, einer Einbausituation möglichst nahezu kommen, indem sie auf Gipskartonplatten aufgeklebt wurden. Nach dem Aushärten der Klebstoffe wurden die Gipskartonplatten von der rückwärtigen Seite her mit verdünnter Natronlauge (ebenfalls pH 9) durchfeuchtet und mehrere Wochen lang feucht gelagert. Die Lagerung erfolgte genau wie bei den Folien/Siegelnähten in Folienbeuteln, um eine vorzeitige Austrocknung zu verhindern. Die Probekörper wurden regelmäßig visuell inspiziert und der Gasinnendruck wurde gemessen.

Bestimmungen der He-Permeation und der Wärmeleitfähigkeit waren nur für den Fall von Auffälligkeiten bei den anderen Untersuchungen vorgesehen.

4.2 Probekörper

4.2.1 Folienumhüllungen und komplette Paneele

Die Projektpartner stellten folgende Probekörper bereit:

4 Einwirkung von Feuchtigkeit und ausgewaschenen Salzen
aus dem Untergrund



Variotec:

- 12 Hochbarrierefolien 800 mm x 800 mm mit Siegelnaht in der Mitte
- 12 Hochbarrierefolien 800 mm x 800 mm ohne Siegelnaht (als Abdeckfolie)
- 16 Hochbarrierefolien 500 mm x 500 mm ohne Siegelnaht (als Abdeckfolie)

va-Q-tec

- 16 VIPs 500 mm x 500 mm x 10 mm mit va-Q-check-Sensoren

4.2.2 Klebstoffe

Zur Aufbringung der VIP auf die Gipskartonplatten wurden die gleichen Klebstoffe benutzt wie bei der Untersuchung der Einwirkung von feuchten alkalischen Klebern, nämlich der mineralische Baukleber PCI Elfatherm und der Kunstharzkleber Sto (s. Tabelle 4).

4.2.3 Beschichtung der Probekörper

Paneele:

Fast die Hälfte der Paneele wurde mit Kunstharzkleber auf Gipskartonplatten aufgeklebt, die gleiche Anzahl mit dem mineralischen Baukleber. Die Siegelnähte der Paneele waren hierbei der Gipskartonplatte zugewandt. Einige Paneele wurden als Referenz und Reserve aufbewahrt. Vor dem Befeuchten der Gipskartonplatten härteten die Klebstoffe vollständig aus.

Folien/Siegelnähte:

Labortücher aus Papier wurden mit verdünnter Natronlauge (pH-Wert 9 bis 10) durchfeuchtet. Die Folienabschnitte mit Siegelnaht und die Labortücher wurden mit diesen feuchten Tüchern abwechselnd übereinandergeschichtet und auf fünf Folienbeutel verteilt. Diese Beutel sollten die Austrocknung verhindern und wurden deshalb mit einer Schweißzange luftdicht versiegelt.

4.3 Durchführung der Untersuchungen

4.3.1 Alterung/Belastung

Paneele

Nach der zweiwöchigen Austrocknungsphase erfolgte eine regelmäßige Befeuchtung/Tränkung der Gipskartonplatten mit verdünnter Natronlauge (pH-Wert 9). Die Lösung wurde mit einem Schwamm auf die rückwärtigen Seiten der Gipskartonplatten aufgetragen. Anschließend wurden die Probekörper wieder mit einer Hüllfolie abgedeckt und in einen Folienbeutel verpackt, um ein rasches Austrocknen zu verhindern.

Während der insgesamt 90 Tage dauernden Alterung erfolgte etwa alle 3-4 Tage ein Nachbefeuchten, so dass die alkalische Lösung während der gesamten Versuchsdauer auf die Hüllfolie der Paneele einwirken konnte.

Der Gasinnendruck der Paneele wurde immer vor dem Nachbefeuchten gemessen.

Folie/Siegelnähte

Die Folien/Siegelnähte wurden für 14, 30, 50, 70 und 90 Tage in den Beuteln belassen, also in Kontakt mit den mit Natronlauge durchfeuchteten Tüchern. Nach der Entnahme wurden die Folien/Siegelnähte mit Wasser abgespült, um Reste von Natronlauge zu entfernen, anschließend wurden sie getrocknet.

4.3.2 Analysemethoden

Zur Charakterisierung der Probekörper wurden folgende Analysemethoden angewandt:

Folien/Siegelnähte:

- Visuelle Inspektion
- Zugfestigkeit der Siegelnaht gemäß 2.3.2.2

Paneele:

- Gasinnendruckmessung gemäß 2.3.2.4
- Messungen der Wärmeleitfähigkeit gemäß 2.3.2.5 wurden nicht durchgeführt, da die Zunahme der Gasinnendrucke kleiner als 3 mbar war.

4.4 Ergebnisse Folien

Visuelle Inspektion

Alle Siegelnahtproben waren visuell unauffällig.

Zugfestigkeit der Siegelnaht

Bis zu 70 Tagen Lagerung in Kontakt mit verdünnter Natronlauge ergab sich keine signifikante Änderung der mechanischen Eigenschaften. Die gemessenen Maximalkräfte waren denen von unbelasteten Referenzproben sehr ähnlich (Abbildung 21) und der Kurven-/Versagenstyp war Typ A gemäß 2.4.2 (Abbildung 22). Nach 90 Tagen zeigt sich jedoch ein signifikanter Abfall der Maximalkraft, und noch viel auffälliger, eine Änderung des Kurven-/Versagenstyps von A nach C gemäß 2.4.2.

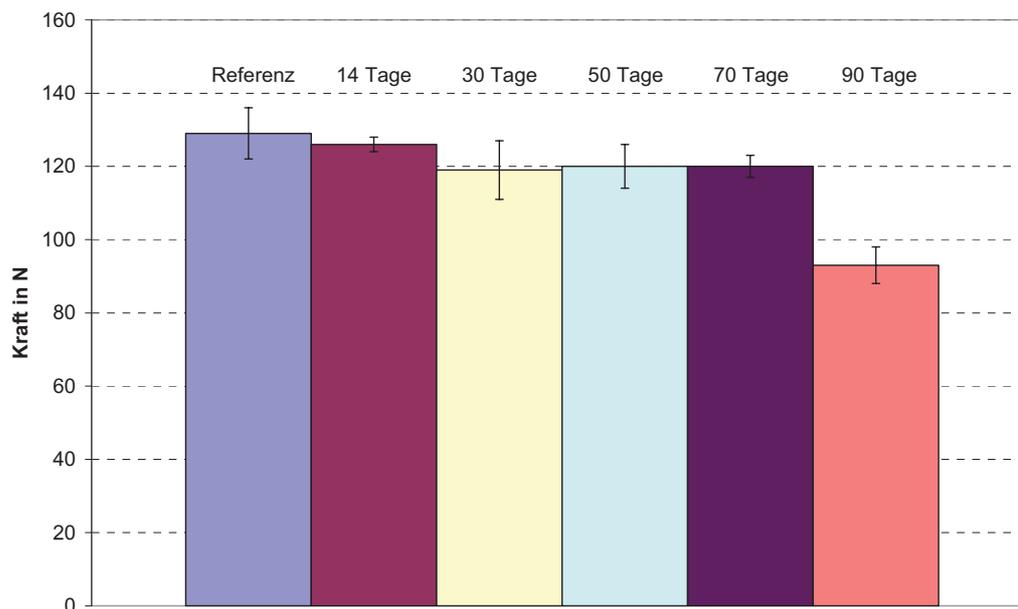


Abbildung 21 Zugfestigkeit der Siegelnähte nach Einwirkung von NaOH

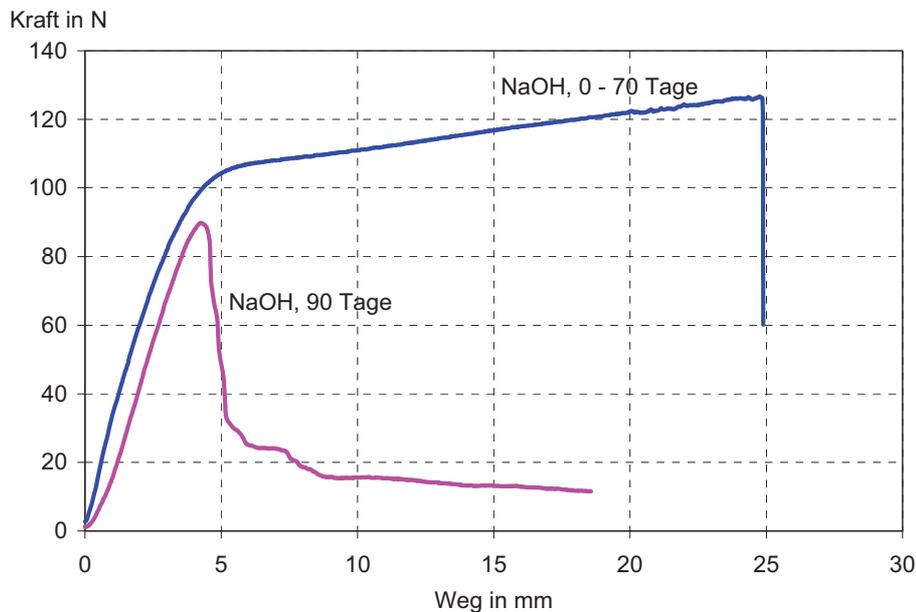


Abbildung 22 Zugprüfung der Siegelnähte nach Einwirkung von NaOH

Die als „NaOH, 0–70 Tage“ markierte Kurve in Abbildung 22 ist repräsentativ, sowohl für die unbelasteten Referenzproben als auch für die Siegelnahtproben, die der Natronlauge bis zu 70 Tagen ausgesetzt waren. Die Kurve „NaOH, 90 Tage“ ist typisch für die Siegelnahtproben, die der NaOH 90 Tage ausgesetzt waren. Offensichtlich passiert zwischen 70 und 90 Tagen etwas, was die mechanischen Eigenschaften der Siegelnahtproben drastisch verändert. Über diesen Vorgang kann im Rahmen des Forschungsvorhabens nur spekuliert werden. Vielleicht diffundieren Hydroxidionen aus der Natronlauge durch die Siegelnaht in die Probe ein, bis die für die Zugprüfung kritische Stelle (die am höchsten belastete Innenseite der Naht) geschädigt wird. Solange der Innenbereich der Naht intakt ist, bleibt das mechanische Verhalten unverändert. Sobald der Innenbereich geschädigt wird, verliert die Naht an Festigkeit. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um diese Hypothese zu prüfen.

4.5 Ergebnisse Paneele

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse der Gasinnendruckmessungen dargestellt.

4 Einwirkung von Feuchtigkeit und ausgewaschenen Salzen aus dem Untergrund

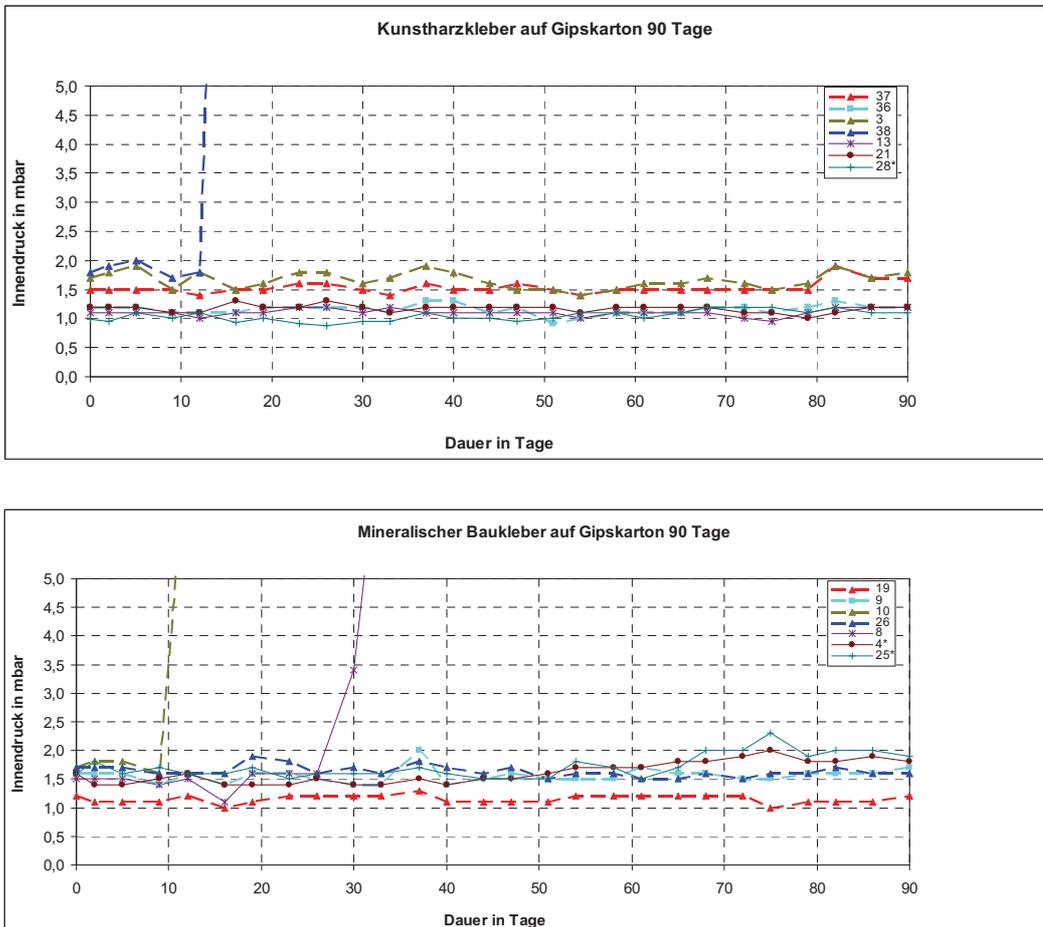


Abbildung 23 Zeitabhängiger Gasinnendruck während der Einwirkung von Natronlauge
 Panelgröße: 500 mm x 500 mm x 10 mm

Die Mehrheit der Probekörper zeigte über die gesamte Prüfdauer von 90 Tagen keine Auffälligkeiten beim Gasinnendruck. Nur bei drei Paneelen trat eine Belüftung auf. Es gibt aber keine Anzeichen, dass diese Belüftungen mit der Einwirkung der feuchten Klebstoffe zusammenhängen. Wahrscheinlicher erscheint es, dass eine Beschädigung der Paneele durch die wiederholte Handhabung für das Befeuchten und die Innendruckmessungen erfolgte.

An einigen Probekörpern mit dem Kunstharzkleber wurde nach 40 Tagen Schimmelbildung im Übergangsbereich Gipskarton/Kleber beobachtet. Der Schimmelbefall hatte keinen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Paneele. Die Probekörper mit dem mineralischen PCI-Kleber zeigten keinen Schimmelbefall.

4.6 Zusammenfassung

Die Folien/Siegelnähte sowie Paneele wurden über einen gewissen Zeitraum einer alkalischen Feuchte ausgesetzt, um die Einwirkung von Auswaschungen aus dem Untergrund zu simulieren.

Die Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die visuellen Untersuchungen zeigten keine Veränderung der Hüllfolie.
- Nach einer längeren Einwirkungszeit (> 70 Tage) trat eine signifikante Reduzierung der Festigkeit der Siegelnaht auf. Mit dieser Reduzierung war eine drastische Veränderung im Versagensmechanismus verbunden.
- Die Belastung führte zu keinem Anstieg des Gasinnendrucks der kompletten Paneele.

Anhand der erzielten Ergebnisse kann eine Schädigung der Siegelnaht durch die durchgeführte Belastung nicht ausgeschlossen werden. Es erscheint ratsam, eine langfristige Einwirkung von alkalischer Feuchte auf Siegelnähte zu vermeiden.

Dauerhaftigkeit VIP

5 Belastung von Paneelen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes



5 Belastung von Paneelen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes

5.1 Untersuchungsprogramm

Neben den chemischen Belastungen, die in den drei vorangehenden Kapiteln behandelt wurden, können VIPs in der Bauanwendung auch mechanischen Belastungen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes, auf den sie aufgeklebt sind, ausgesetzt sein.

Die thermische Ausdehnung von VIPs ist im Wesentlichen durch das Kernmaterial bestimmt. Hat der Untergrund einen größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten und ist die Klebeverbindung steif, so werden bei Temperaturänderungen Zug- und Scherkräfte im Paneel erzeugt.

Um die Belastungen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes zu simulieren, wurden Paneele auf Aluminiumplatten aufgeklebt und einer Temperaturwechselbelastung von mehr als 130 Zyklen ausgesetzt. Aluminium wurde gewählt, weil es einen vergleichsweise hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufweist. In regelmäßigen Abständen erfolgte eine Messung des Gasinnendrucks und eine visuelle Inspektion der Paneele; insbesondere der Ecken. Den Ecken galt besondere Aufmerksamkeit, da dort, bedingt durch die Faltung, die Folienumhüllung stärker belastet ist als auf den Flächen.

Zusätzlich zu den auf Al-Blech aufgeklebten Paneelen wurden auch unbehandelte Paneele als Referenzprobekörper der Temperaturwechselbelastung ausgesetzt, um zwischen Temperatur- und Ausdehnungseffekten unterscheiden zu können.

Bestimmungen der Wärmeleitfähigkeit waren nur für „auffällige“ Paneele vorgesehen.



5.2 Probekörper

Die Projektpartner stellten folgende Probekörper bereit:

va-Q-tec

10 VIPs: 500 mm x 500 mm x 20 mm mit va-Q-check-Sensoren

Diese Abmessung wurde ausgewählt, um eine evtl. Messung der Wärmeleitfähigkeit in der Plattenapparatur zu ermöglichen.

10 VIPs: 950 mm x 600 mm x 20 mm mit va-Q-check-Sensoren

Variotec

Jeweils 6 der 10 von va-Q-tec hergestellten VIPs wurden mit reaktivem PUR-Kleber auf 6 mm dicke Aluminiumbleche aufgeklebt. Dabei wurden die kleinen Paneele einzeln auf ein Blech aufgeklebt (Abbildung 24, links), so dass sie noch für eine Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in der Plattenapparatur geeignet gewesen wären. Von den großen VIPs wurden jeweils zwei auf ein Al-Blech aufgeklebt (Abbildung 24, rechts), um die benötigte Anzahl von Al-Blechen gering zu halten. Die restlichen 4 Paneele wurden als Referenz (kein Einfluss von unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten) ebenfalls der Klimawechselprüfung unterzogen.

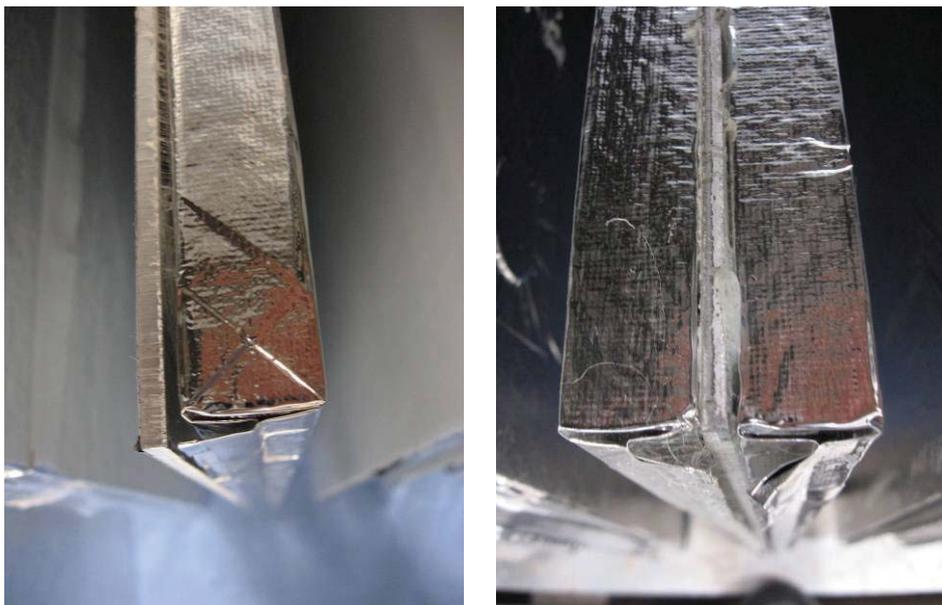


Abbildung 24 Paneele auf Al-Blech aufgeklebt

Dauerhaftigkeit VIP

5 Belastung von Paneelen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes



5.3 Durchführung der Untersuchung

5.3.1 Alterung/Belastung

Die Probekörper wurden aufrecht und mit einigen Zentimetern Abstand zwischen ihnen in eine Klimakammer gestellt (Abbildung 25).

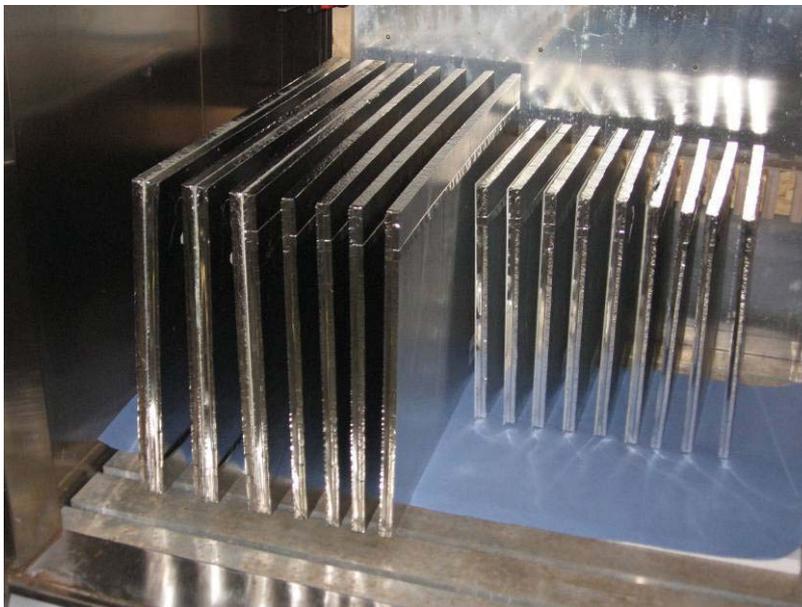


Abbildung 25 Probekörper in der Klimakammer

Die Temperaturwechselbelastung bestand aus 6-stündigen Zyklen von -20 °C bis $+70\text{ °C}$. Bei -20 °C und $+70\text{ °C}$ wurde die Temperatur der Klimakammer für eine Stunde gehalten, um einen Temperaturangleich der Al-Bleche zu ermöglichen. Abbildung 26 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf über einen Zeitraum von 24 Stunden.

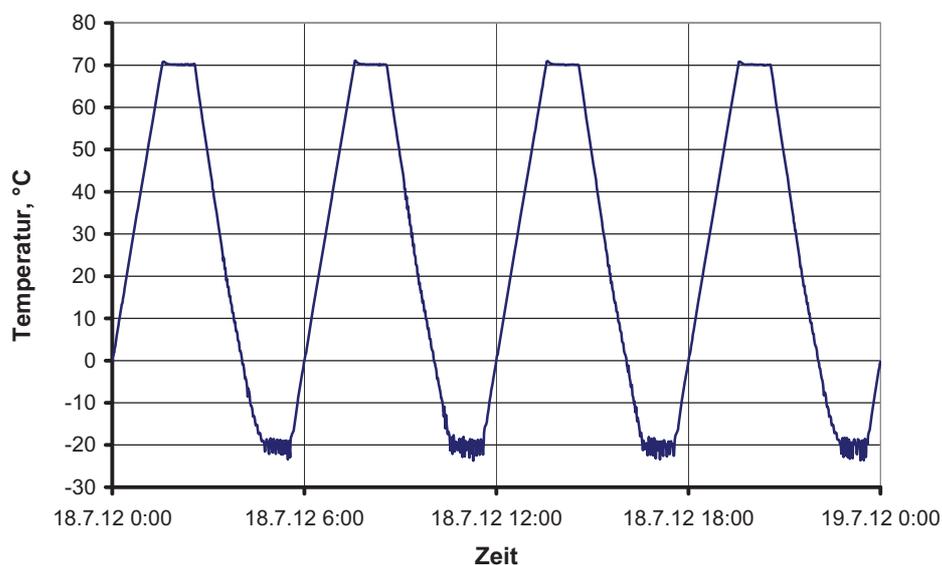


Abbildung 26 Temperaturzyklen über einen Zeitraum von 24 Stunden

Etwa alle sieben Tage wurde die zyklische Belastung unterbrochen. Bei geöffneter Tür der Klimakammer konnten die Probekörper über Nacht die Raumtemperatur annehmen. Am Morgen erfolgten die Gasinnendruckmessungen mit dem va-Q-check-Gerät.

Insgesamt wurden 136 Zyklen durchgeführt (Zeitdauer ca. 5 Wochen).

5.3.2 Analysemethoden

Bei jeder Unterbrechung der Temperaturwechselbelastung erfolgte sowohl eine Gasinnendruckmessung mit dem va-Q-check-Gerät als auch eine visuelle Inspektion. Besondere Aufmerksamkeit galt dabei den Ecken, da dort die Folienumhüllung, bedingt durch die Faltung, am stärksten belastet ist.

Messungen der Wärmeleitfähigkeit gemäß 2.3.2.5 wurden nicht durchgeführt, da die Zunahme des Gasinnendrucks kleiner als 3 mbar war.

5.4 Ergebnisse Paneele

Abbildung 27 zeigt die Ergebnisse der va-Q-check-Messungen. Der Innendruck der VIPs ist in Abhängigkeit der Anzahl der thermischen Zyklen dargestellt.

Dauerhaftigkeit VIP

5 Belastung von Paneelen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes



Die blauen, durchgezogenen Linien zeigen die Entwicklung des Innendrucks in den auf Aluminiumblech aufgeklebten Paneelen. Diese Paneele waren der zyklischen thermischen Ausdehnung durch das Al-Blech ausgesetzt. Die roten gestrichelten Linien zeigen die Entwicklung des Innendrucks in den Referenzpaneelen. Diese Paneele waren nur der zyklischen thermischen Belastung ausgesetzt. Sowohl für die kleinen Paneele als auch für die großen Paneele überlagern sich blaue und rote Kurven. Es kann also nicht zwischen dem Verhalten der auf Al-Blech aufgeklebten Paneele und dem Verhalten der Referenzpaneele unterschieden werden.

Tendenziell ist ein leichter Anstieg des Innendrucks mit zunehmender Anzahl der Zyklen zu erkennen. Es ergeben sich folgende jährliche Steigungen unter der Annahme von vier Temperaturzyklen pro Tag:

- Kleine Paneele, auf Aluminiumblech aufgeklebt 4,4 mbar/a
- Kleine Paneele, Referenz 3,6 mbar/a
- Große Paneele, auf Al-Blech aufgeklebt 1,5 mbar/a
- Große Paneele, Referenz 4,5 mbar/a

Diese Druckanstiege liegen in der gleichen Größenordnung wie die in Kapitel 2.5.1 berichteten. Hierbei ist zu beachten, dass die im Kapitel 2.5.1 untersuchten Paneele nur halb so dick waren und daher der Druckanstieg ungefähr doppelt so hoch sein müsste. Die hier beobachteten geringen Unterschiede in den Steigungen der Probekörpergruppen sollten nicht überbewertet werden. Aufgrund der begrenzten Messgenauigkeit sowie der begrenzten Probenanzahl und Belastungsdauer können sie nicht als signifikant bezeichnet werden.

Ein Anstieg des Innendrucks war grundsätzlich zu erwarten, da die Paneele einem Alterungsprozess ausgesetzt wurden. Wichtiger als der geringe Druckanstieg ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens jedoch, dass unter Berücksichtigung der Messunsicherheit kein Unterschied im Verhalten der auf Al-Blech aufgeklebten Paneele und der Referenzpaneele erkennbar ist. Das bedeutet, eine durch eine zyklische thermische Ausdehnung bedingte Alterung der Paneele konnte im Rahmen dieses Projektes nicht festgestellt werden. Auch die visuelle Inspektion der Paneele, insbesondere der Ecken, zeigte keine Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand.

5 Belastung von Paneelen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes

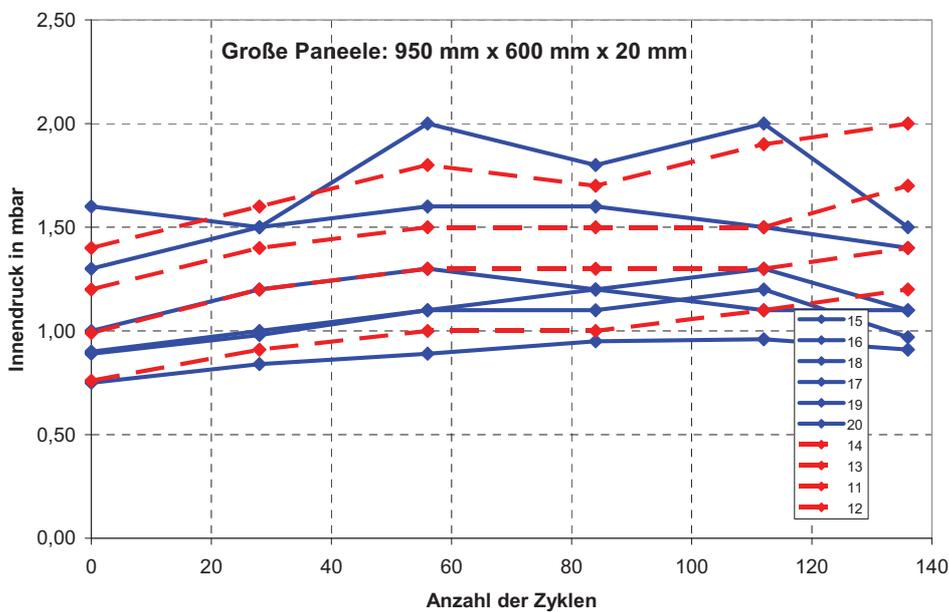
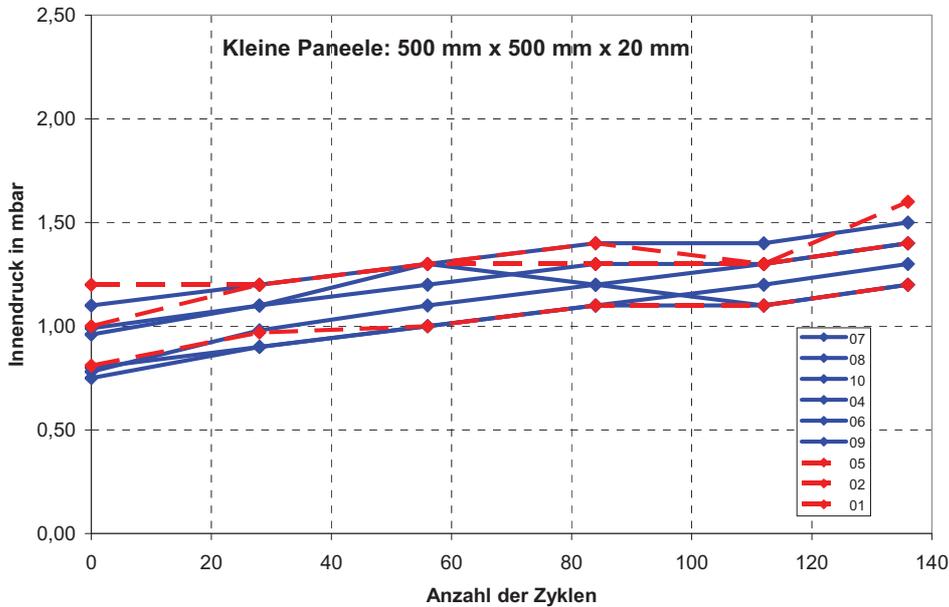


Abbildung 27 Gasinnendruckmessungen nach dem va-Q-check-Verfahren
 Blaue, durchgezogene Linien: Paneele auf Al-Blech,
 Rote gestrichelte Linien: Referenz-Paneele

Dauerhaftigkeit VIP

- 5 Belastung von Paneelen durch thermische Ausdehnung des Untergrundes



5.5 Zusammenfassung

VIPs wurden auf ein Substrat mit hohem thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Al-Blech) aufgeklebt und einer thermischen Wechselbelastung ausgesetzt, um die mechanischen Belastungen zu simulieren, die in der Bauanwendung durch wiederholte temperaturbedingte Ausdehnungen des Untergrundes hervorgerufen werden können.

Die Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die visuellen Untersuchungen, insbesondere der Paneel-Ecken, zeigten keine Auffälligkeiten.
- Die Belastung führte zu keinem Anstieg des Gasinnendrucks der Paneele.

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen kann keine signifikante Wirkung temperaturbedingter mechanischer Wechselbelastungen auf die Folienumhüllung von VIPs abgeleitet werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] ETAG 002-1Bek; ETAG 002-1:1998-12-15
Bekanntmachung der Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing Systems – SSGS); Teil 1 Gestützte und ungestützte Systeme (ETAG 002)
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [2] DIN 4108-10:2008-06
Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe – Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [3] DIN EN 12211:2000-12
Fenster und Türen: Windwiderstandsfähigkeit – Prüfverfahren
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [4] DIN 52612:1979-09
Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [5] DIN 52344:1984-05
Klimawechselprüfung an Mehrscheibenisoliervlas
- [6] Vacuum Insulation Panels – Study on VIP components and panels for service life prediction of VIP in building application (Subtask A)
H. Simmler et. Al; IEA/ECBCS Annex 39
- [7] Vacuum insulation panels for building application Basic properties, aging mechanisms and service life, H. Simmler, S. Brunner, Energy and Buildings 37, 1122–1131 (2005)
- [8] Permeation of Different Gases Through Foils used as Envelopes for Vacuum Insulation Panels, Hubert Schwab, Ulrich Heinemann, Andreas Beck, Hans-Peter Ebert, and Jochen Fricke, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 28, No. 4, 293-317 (2005)
- [9] Prediction of Service Life for Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernel and Foil Cover, Hubert Schwab, Ulrich Heinemann, Andreas Beck, Hans-Peter Ebert, and Jochen Fricke, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 28, No. 4, 357–374 (2005)
- [10] Vakuumisolationspaneele (VIP) in der Baupraxis; Tanja Brockmann, Roland Herr, Stephan Rössig; Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung; ISBN 978-3-87994-694-5.
- [11] DIN EN 12667:2001-05
Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät – Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand
Berlin, Beuth Verlag GmbH
- [12] DIN EN 1607:1997
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene
Berlin, Beuth Verlag GmbH

7 Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Besonderer Dank gebührt auch folgenden Industriepartnern, die das gesamte Projekt sowohl ideell als auch finanziell unterstützten und somit zum Gelingen beitrugen:



va-Q-tec AG
Würzburg



Variotec GmbH & Co KG
Neumarkt



ift Rosenheim
Theodor-Gietl-Str. 7-9
83026 Rosenheim
Telefon +49 (0) 8031 261-0
Telefax +49 (0) 8031 261-290
E-Mail: info@ift-rosenheim.de
<http://www.ift-rosenheim.de>