

Schlussbericht

KMU-innovativ – Verbundvorhaben Klimaschutz

zu dem

vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben 01LY1210A / 01LY1210B

VIP fit für Mobilität

(Bewilligungszeitraum: 01.01.2012 – 31.12.2014)

Kölleda, 23.06.2015

Ort, Datum



Dr. Thomas Wollheim, va-Q-tec AG

Würzburg, 23.06.2015

Ort, Datum



M. Sc. Eduard Kraus, SKZ – KFE gGmbH

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Zielsetzung des Projektes	6
3	Experimentelles / Durchgeführte Arbeiten	6
4	Ergebnisse	9
4.1	Materialauswahl	9
4.2	Verwendete Materialien.....	13
4.3	Charakterisierung der Ausgangsmaterialien.....	16
4.3.1	Mikroskopische Untersuchung an den Folien	16
4.3.2	Dynamische Differenzkalorimetrie	18
4.3.3	Thermogravimetrische Analyse	20
4.3.4	Dynamisch-mechanische Analyse.....	21
4.3.5	Messen der Oberflächenenergie der Folien.....	24
4.3.6	Alterung der Paneele.....	25
4.3.7	Wärmeleitfähigkeitsmessungen.....	29
4.4	Ermittlung der mechanischen Kennwerte der Paneele	31
4.4.1	Kurzzeitzugversuch der Folien, der Kerne und der Paneele	32
4.4.2	Kurzzeitzugversuch der gesiegelten Folien	35
4.4.3	Kurzzeitzugversuch der unterschiedlich liegenden Siegelnähte	37
4.4.4	Technologischer Biegeversuch der Paneele	38
4.4.5	Bestimmung des Stoßverhaltens der Paneele.....	39
4.4.6	Wärmevorbehandlung zur Haftung der Folie an den Kern.....	41
4.5	Klebeignung der Folien sowie einer möglichen Vorbehandlung.....	47
4.5.1	Klebeignung der Folien	47
4.5.2	Bestimmung der Zugscherfestigkeit der Überlappungsklebungen	48
4.5.3	Erhöhung der Oberflächenenergie durch Vorbehandlung.....	50
4.6	Schutz der Paneele	53
4.6.1	Einschäumen der Paneele mittels Polyurethanschaum	54
4.6.2	Kurzzeitzugversuch der eingeschäumten Paneele	57

4.6.3	Technologischer Biegeversuch der eingeschäumten Paneele.....	58
4.6.4	Bestimmung des Stoßverhaltens der eingeschäumten Paneele	60
4.6.5	Untersuchungen zur Anbindung der Paneele zum umschließenden Schaum..	61
4.6.6	Alterung der eingeschäumten Paneele.....	62
4.6.7	Kleben mit Metall und GFK.....	65
4.6.8	Eingießen der Paneele mittels PU-Gießharzsystem und Hot-Melt-Klebstoff....	66
4.6.9	Schutzwirkung der Beschichtung.....	67
4.7	Dynamische Untersuchungen an Paneelen und Verbunden.....	69
4.8	Große und anwendungsnahe Strukturen aus eingeschäumten Paneelen	72
5	Brandprüfung des Schaumes	73
6	Ökonomische und Ökologische Potentiale	75
6.1	Bewertung ökonomischer Aspekte in der Nutzungsphase.....	75
6.2	Bewertung ökologischer Aspekte in der Nutzungsphase	79
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	82
8	Literatur.....	84

1 Einleitung

Die Nachfrage nach Energieressourcen steigt weltweit. In diesem steigenden Spannungsfeld ist die Energieeffizienz ein Schlüssel für eine erfolgreiche Energiepolitik. Denn Energie, die nicht gebraucht wird, muss auch nicht erzeugt bzw. transportiert werden.

Nach aktuellen Studien der Arbeitsgemeinschaft-Energiebilanzen gehen knapp 60 % des Bruttoendenergieverbrauches in den Bereich Wärme und Kälte. Bei diesen Berechnungen werden oft die hohen Beiträge des Kältebereiches unterschätzt.

Eine sinnvolle Lösung zur Steigerung der Energieeffizienz bieten die sog. Vakuumisulationspaneele (VIP) durch ihre sehr hohe Isolationswirkung. Bei den VIP handelt es sich um thermisch isolierende Platten, die bei minimalem Platzbedarf eine extrem hohe Dämmleistung aufweisen. Ein 2 cm Hightech-VIP kann dabei eine ähnliche Dämmung wie eine ca. 20 cm starke StyrodurTM-Platte aufweisen. Diese VIP finden ihren Einsatz in verschiedenen Bereichen der thermischen Isolierung (Container, Hochleistungsthermoverpackungen usw.), in der Haushaltsgeräteindustrie (Kühlschränke usw.), in der Gebäudedämmung und zunehmend auch in technischen Anwendungen.

In einigen bereits abgeschlossenen BMBF-Forschungsvorhaben wie z.B. „Energieeffizienter Speicherkühlschrank“, „Vakuumisulationspaneele in der Baupraxis“ oder „Entwicklung von innovativen transparenten VIP und deren Einsatz“ konnte gezeigt werden, dass für die gleiche Isolierleistung ein deutlich geringerer Raumbedarf notwendig ist. So können durch den Einsatz von neuartigen VIPs zum Teil doppelt so gute Dämmwerte oder aufgrund der Flexibilität und einer hohen Dämmwirkung diverse variable Designmöglichkeiten erreicht werden. Die Beispiele in statischen Anwendungen von VIP konnten eindrucksvoll zeigen, wie in diesen Bereichen große Energiemengen eingespart werden können.

Aufgrund der mechanisch relativ empfindlichen Außenhülle sind allerdings die Einsatzmöglichkeiten von VIP insbesondere in dynamischen Anwendungen momentan noch sehr beschränkt. Deswegen konnte das sehr interessante Feld der mobilen Einsatzmöglichkeiten (s. Abb. 1) konnte aufgrund der auftretenden dynamischen Beanspruchungen (z.B. im Personen- und Gütertransport) noch nicht breit erschlossen werden.



Abbildung 1: Thermoisolierter Auflieger, eine mögliche zukünftige mobile Anwendung für VIP

Die derzeitigen Integrationstechnologien für VIP können den auftretenden hohen dynamischen Belastungen nicht standhalten, was zu einem vorzeitigen Versagen der Paneele mit Eigenschaftsverlust nach einer kurzen, unzureichenden Einsatzdauer führt. Gerade die Mobilität mit einem geringen zur Verfügung stehenden Bauraum ist jedoch prädestiniert für den Einsatz von Hochleistungsdämmung mit VIP und benötigt diese Effizienzkomponenten zur Lösung der anstehenden Rahmenbedingungen.

Mit der Norm DIN EN 16258:2011 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)“ existiert der erste offizielle Standard zur CO₂-Ermittlung für den Transportsektor, der neben den reinen Fahrzeugemissionen auch die Treibhausgasfreisetzung berücksichtigt. Beachtet man ferner, dass das EU-Weißbuch Verkehr 2050 eine Reduktion des Treibhausgasausstoßes bis 2050 um 60 % anstrebt, während gleichzeitig der Straßenverkehr um mindestens 50 % zunimmt, werden die mobilen Effizienzherausforderungen deutlich.

Auch im Bereich des Personentransportes liegen enorme Potentiale für VIP. Zur Umsetzung der Klimaziele hat die Bundesregierung als anspruchsvolles Ziel die Einführung von 1 Mio. elektrisch betriebenen Fahrzeugen bis zum Jahr 2020 angekündigt. Diese werden in der Regel durch Batterien gespeist, deren optimaler Arbeitsbereich zwischen 0 °C und 40 °C liegt. Für die effektive Nutzung der Batterien und auch für das weitere Klimamanagement, bei dem die klassischen Klimaanlage aufgrund des hohen Energieverbrauches nicht mehr zum Einsatz kommen können, wird eine platzsparende, hocheffiziente Isolierung benötigt. Hier können multifunktionale VIP ein Schlüssel zur Durchsetzung der Elektromobilität sein.

2 Zielsetzung des Projektes

Das Ziel des durchgeführten Forschungsvorhabens bestand darin, Technologien zum Schutz der VIP für den Einsatz unter dynamischen Belastungen soweit zu entwickeln, dass die langfristige Dämmqualität dieser Paneele (insbesondere keine Verletzungen der Außenhülle) über den gesamten Nutzungszeitraum gewährleistet wird. Unter dynamischen Anwendungen wurden dabei Anwendungen aus dem Thermoverpackungs-, Transport- und Logistikbereich (z.B. Züge, Transportcontainer, Kühlfahrzeuge, usw.) verfolgt.

In den durchgeführten Untersuchungen wurden mehrere wissenschaftliche Ansätze verfolgt. Zum einen wurden verschiedene Möglichkeiten zu einer gefügten multifunktionalen Verbindung mit dem Einsatz der Klebe- sowie Umschäumtechnologie untersucht, zum anderen wurde auch ein komplettes Entkoppeln der Kräfte zwischen dem „Schutz“- Gehäuse und den Paneelen betrachtet. Das optimale Verhalten (u.a. Stabilität und Dämpfungseigenschaften der Fügeverbindung) wurde dabei unter Variation der Klebstoffe und deren mechanischen Eigenschaften, die zwischen dem Gehäuse und VIP eingesetzt werden, untersucht.

3 Experimentelles / Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde eine detaillierte Konzeption mit einem Projektablaufplan erstellt. Dabei wurde die Probengeometrie und Größe der Paneele für die Prüfungen festgelegt. Die für die Fertigung der Paneele notwendigen Materialien (Schäume, Folien, Rohstoffe usw.) wurden beschafft.

In zahlreichen Untersuchungen wurden die relevanten vorausgewählten Materialien bzgl. ihrer Oberflächeneigenschaften auf die Adhäsion charakterisiert. Die Oberflächenenergie (OFE) der nicht modifizierten sowie vorbehandelten Folien (Atmosphärendruck-Plasma (ADP) sowie Corona-Vorbehandlung) wurde im Benetzungsverfahren mittels drei Testflüssigkeiten (Wasser, Ethylenglycol sowie Diiodmethan) auf einem Kontaktwinkelmessgerät Krüss DSA30 ermittelt. Die Auswertung der erlangten Kontaktwinkel-Messwerte erfolgte nach Owens Wendt Rabel und Kaelble (OWRK)-Methode mit Bestimmung der dispersen sowie polaren Anteile der OFE.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde eine Vorauswahl an möglichen Oberflächenvorbehandlungsverfahren, und Klebstoffen getroffen. Anschließend wurden zahlreiche einfach überlappte Prüfkörper mit diversen Substraten (in Anlehnung an DIN 1465) hergestellt und nach einem vollständigen Aushärten des Klebstoffen im Normklima (23°C / 50 % rel. F.) (nach Angaben im technischen Datenblättern) geprüft. Die Prüfung wurde auf einer Universalzugprüfmaschine Z010 der Fa. Zwick mit einer Prüfgeschwindigkeit

von 100 mm/min (nach DIN 55529) durchgeführt. Anschließend wurde das Bruchbild nach DIN EN ISO 10365 bewertet und falls notwendig eine Versuchsreihe zum Optimieren der Adhäsionseigenschaften gefahren.

Für die Ermittlung der thermischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien (sofern nicht bereits ermittelt oder vorhanden) wurde ein Dynamisches Differenzkalorimeter (DSC Phoenix 204 der Fa. Netzsch sowie DSC 1 der Fa. Mettler-Toledo) und ein Thermo-Gravimetrisches (TG) Analysegerät (Luxx STA 409 PC) der Fa. Netzsch eingesetzt. Für die Ermittlung von mechanischen Eigenschaften der Ausgangskomponenten (Hülle und Kern) im dynamischen Bereich wurde die dynamisch-mechanische Analyse (DMA SDTA 861 e) der Fa. Mettler Toledo verwendet.

Nach den eingehenden Voruntersuchungen wurde der Bedarf an möglichst praxisnahen Versuchspaneele festgelegt. In zahlreichen Versuchen wurde die Fertigung von neuen Paneelen mit der geplanten VIP-Geometrie erprobt und die Optimierung des neuen Fertigungsverfahrens sowie die Herstellung von Mustern zur Prüfung im Hause va-Q-tec durchgeführt. BASF Polyurethanes unterstützte mit ihrem Know-How zu Polyurethan-Schäumen und stellt Materialien sowie die Schaumform zur Verfügung.

Die Anforderungen an ein VIP im mobilen Bereich wurden erarbeitet. Auf Basis von den ausgearbeiteten Anforderungen sowie Erfahrungswerten der Fa. va-Q-tec (wie z.B. Temperaturbeständigkeit sowie mechanische Anforderungen) wurden automatisierbare Verbindungstechniken zum Umschäumen der Paneele entwickelt und erprobt. Die entwickelten Fertigungsverfahren wurden außerdem dahingehend optimiert, dass eine erhöhte Sicherheit gegen das Verletzen der relativ sensiblen Außenhülle der VIP gewährleistet werden konnte. Zur Überprüfung der Gewährleistung von Funktionalität wurden außerdem in die VIP spezielle neuartige Funksensoren (RFID) eingebracht, mit welchen es möglich war, den Zustand der Außenhülle berührungslos auf Dichtigkeit zu überprüfen und somit die einwandfreie Funktion der im Schaum eingeschäumten Paneele zu gewährleisten. Alternativ zur verwendeten Schutzbeschichtung aus PU-Schaum wurde außerdem zum Vergleich das Eingießen in kaltes Harz oder das Ankleben von kohlefaserverstärkten Kunststoffplatten untersucht.

Zahlreiche Muster-VIP wurden anschließend hergestellt und durch diverse Techniken geschützt. Die Kurzzeit-Eigenschaften des Verbunds wurden ermittelt. Hierzu wurden verschiedene zerstörende quasistatische und hochdynamische mechanische Prüfungen an den geschützten Paneelen durchgeführt, um die Festigkeiten der Verbindung unter verschiedenen Belastungen zu charakterisieren. Es wurden neben dem Zug- und dem Zugscher-Versuch der technologische bzw. 3-Punkt-Biegeversuch und der

Durchstoßversuch verwendet. Als Versagenskriterium wurde der Gasdruck mittels va-Q-check Sensor ermittelt und die Kombinationen mit den besten mechanischen Eigenschaften auf dynamischen Langzeit-Eigenschaften geprüft.

Die Bestimmung der dynamischen Langzeit-Eigenschaften von geschützten Paneelen erfolgte in servo-pneumatischen Schwingprüfmaschinen. Aus den durchgeführten Prüfungen wurde die Ermüdungsfestigkeit des Gesamtsystems ermittelt.

Die geeignetsten Kombinationen aus Paneelen sowie Schutztechnologien wurden den Alterungstests (Klimatest in Anlehnung an PV VW 1200 sowie thermische Auslagerung bei 50 °C und 70 / 80 °C) unterzogen. Aus den Erkenntnissen der Prüfungen wurden Lösungen zum optimalen mechanischen Schutz der Paneele ausgearbeitet und in praktischen Versuchen validiert. In den anschließenden Arbeitspaketen wurden exemplarisch Brandprüfungen durchgeführt.

Eine erhöhte Produktionsflexibilität wurde unter Berücksichtigung der ökonomischen und ökologischen Aspekte in Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitet. Dabei wurden insbesondere Vor- und Nachteile einer möglichen Anbindung erörtert. Zum einen wurde die Kraftschlüssigkeit des Paneels mit mechanischen Versuchen bewertet. Zum anderen wurde eine komplette Kräfteentkopplung untersucht.

Die Fa. va-Q-tec AG übernahm bei dem interdisziplinären Forschungsvorhaben die Projektkoordination und das Projektmanagement.

4 Ergebnisse

4.1 Materialauswahl

Neuartige Dämm Lösungen auf Basis von VIP können in zahlreichen Anwendungen helfen, wertvolle Wärmeenergie einzusparen ohne viel Platz zu verbrauchen (vgl. Abbildung 2). Im Prinzip ist ein VIP ähnlich aufgebaut wie eine Packung vakuumverpacktes Kaffeepulver. Der Kern der evakuierten Dämmplatte besteht aus einem offenporigen, druckbelastbaren Material mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit. Der evakuierte Kern ist hierbei mit einer gas- und wasserdampfdichten Kunststoffolie umhüllt.

Der Luftdruck im Inneren muss je nach Größe der offenen Poren des Kerns auf Werte zwischen 10 mbar und 0,02 mbar verringert werden, um die Wärmeleitfähigkeit der Luft zu unterdrücken (bei evakuiertem Kaffeepulver liegt der Druck typischerweise bei 100 mbar). Je nach Stützkernmaterial können so bei VIP Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 1,5 bis 8 mW/(m·K) erreicht werden, die damit bis zu zwanzig Mal niedriger als bei dem meist gebrauchten Dämmstoff Polystyrolschaum liegen.

Wenn für VIP eine lange Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten gefordert wird, kommt als Kernmaterialien vorwiegend nanostrukturiertes Kieselsäurepulver (auch pyrogene Kieselsäure genannt) zum Einsatz. Diese pyrogene Kieselsäure wird oft in einem Verbrennungsprozess aus Silanen (z.B. SiHCl_3) hergestellt. Zu Platten mit Dichten um 200 kg/m^3 verpresst, weist dieses Pulver offene Poren mit einem typischen Durchmesser von $0,5 \mu\text{m}$ auf. Da die sehr kleinen Poren die mittlere freie Weglänge der Luftmoleküle schon bei normalem Atmosphärendruck beeinflussen, erreicht solch eine Pulverplatte eine



Abbildung 2: Beispiel einer Silica-Platte VIP

Wärmeleitfähigkeit an Luft von $20 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$. Das ist bereits weniger als die Wärmeleitfähigkeit von ruhender Luft, die sich im Bereich von ca. $26 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$ bewegt. Beim Evakuieren auf Drücke von 1 bis 10 mbar verringert sich die Wärmeleitfähigkeit weiter auf Werte zwischen $3,5$ und $4,5 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$. Diese Restwärmeleitfähigkeit der Kieselsäureplatte setzt sich aus Anteilen der Wärmeleitfähigkeit über den porösen Festkörper und der Wärmeleitfähigkeit des Wärmestrahlungstransports im Pulverkern zusammen. Um die Strahlungswärmeleitfähigkeit auf einen minimalen Wert von unter 2

$\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ weiter verringern zu können, sind den Kieselsäurepulvern üblicherweise noch sogenannte Infrarottrübungsmittel zugemischt. Das sind meist feine Pulver auf der Basis von SiC oder Ruß, die Wärmestrahlung effizient streuen oder absorbieren.

Eine weitere bekannte Technik zur Verringerung des Wärmetransports ist der Einsatz von Glasfaservliesen. Insbesondere in Asien sind diese Vliese als Kernmaterial für Vakuumdämmplatten weit verbreitet. Wenn sehr dünne Glasfaservliese aufeinander gelegt werden, sind alle Fasern optimal senkrecht zum Wärmestrom ausgerichtet. Wärme kann über den Faserfestkörper dann im Wesentlichen nur noch über Punktkontakte zwischen den aufeinanderliegenden Fasern transportiert werden. Diese Punktkontakte weisen allerdings relativ hohe Wärmewiderstände auf - trotz der atmosphärischen Belastung von 1 bar und der damit verbundenen relativ hohen Dichte der Faser-VIP von 250 bis 300 kg/m^3 . So misst man niedrigste Wärmeleitfähigkeiten, die inklusive der Wärmestrahlungsleitfähigkeit im besten Fall bei ca. 1,5 $\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ liegen können. Diese geringen Werte für Faser-VIP werden allerdings nur dann erreicht, wenn die Gasdrücke unter 0,02 mbar liegen und damit die Wärmeleitfähigkeit der Luft fast vollkommen ausgeschaltet ist. Dieser hier notwendige sehr geringe Gasdruck ist auf die im Vergleich zum Kieselsäurepulver sehr viel größeren Hohlräumen der Fasern zurückzuführen, die je nach Feinheit der Fasern typischerweise Durchmesser von 30 bis 100 μm haben.

Den geringen Gasdruck im 0,01 mbar-Bereich kann man zwar bei der Herstellung von Faser-VIP in einer Vakuumkammer ohne Weiteres bereitstellen. Die Kunst ist es allerdings den geringen Luftdruck und damit die geringe Wärmeleitfähigkeit auch über die gesamte Nutzungsdauer zu halten.

So spielt die Auswahl der Hüllfolien zum langfristigen Erhalt des geringen Luftdrucks eine wichtige Rolle. Sehr oft werden als Außenhülle daher Aluminium-Verbundfolien eingesetzt. Diese sind sehr dicht gegenüber dem Durchgang von Luft und Wasserdampf in das Innere des VIPs. Im Zusammenspiel mit sog. Gettermaterialien, die Anteile von Restluft und Wasserdampf aufnehmen können, erreicht man für Faser-VIP Anstiege der Wärmeleitfähigkeiten von weniger als 1 $\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ pro Jahr (entsprechend einem Luftdruckanstieg von weniger als 0,1 mbar pro Jahr). Jedoch wirkt die 6 bis 10 μm starke Aluminiumfolie am Rand als Wärmebrücke, die allein durch ihre Anwesenheit die Wärmeleitfähigkeit je nach Größe des VIPs effektiv um 5 bis 10 $\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ erhöhen. Alternativ werden daher hauchdünn metallisierte Polyesterfolien eingesetzt, die keine Wärmebrücke bilden, allerdings im Vergleich zur Aluminiumverbundfolien weit höhere Durchlässigkeiten für Luft und Wasserdampf aufweisen. Wegen dieser Probleme werden die VIP auf Faserbasis bisher nur im Bereich von Kühl- und Gefriergeräte eingesetzt, wo die Lebensdauer auf 10 bis 15 Jahre beschränkt ist. Als Hülle wird überwiegend ein Verbund

aus Aluminiumverbundfolie und metallisierter Folie genutzt, wobei die eine Seite mit der metallisierten Folie zum kalten Kühlschranksinneren zeigt, die Aluminiumfolie dagegen zur wärmeren Umgebung. Dadurch wird die Wärmebrücke wesentlich vermindert und es werden für die Hersteller der Kühl- und Gefriergeräte akzeptable Anstiege der Wärmeleitfähigkeiten während der Nutzungsdauer erreicht.

Im Vergleich zu anderen Dämmstoffen sind VIP bei gleichem Dämmwert wesentlich teurer. Berücksichtigt man aber die Kosten des von der Dämmung beanspruchten Nutzraumes, sieht die Kostenrechnung ganz anders aus. Dies soll im folgenden Beispiel anhand von realistischen Annahmen gezeigt werden. Wenn die Kosten der Vakuumdämmung pro Volumeneinheit etwa gleich hoch sind wie die des Nutzvolumens (z.B. 2.000 €/m³ bei einem Gefrierschrank), die Vakuumdämmung aber nur z.B. 20 % des Volumens einer Polyurethanschaumdämmung beansprucht, so verursacht sie nur ca. 20 % + 20 % = 40 % der Kosten im Vergleich zur Dämmung mit Polyurethanschaum (das sind im Wesentlichen die Nutzvolumenkosten bei vernachlässigbaren Schaumkosten im Bereich von 100 €/m³).

Ähnliche Beispiele sind auch auf die Dämmung von Kühllastwägen anwendbar. Diese sind fast täglich in Gebrauch und haben dadurch einen relativ hohen Kälteenergiebedarf. Der Kälteenergiebedarf des Fahrzeugs kann so durch den Einbau von schlanken und effizienten VIP wesentlich gesenkt werden, ohne das Ladungsvolumen zu einschränken.



Abbildung 3: Behälter zum Transport von temperatursensitiven Pharmaprodukten

Im Gebäudebereich, insbesondere bei der energetischen Sanierung, setzen Architekten und Planer jetzt schon langlebige VIP auf Kieselsäurebasis ein. Sie erreichen bei ihren Bauvorhaben eine bessere Wärmeisolation und gewinnen gleichzeitig wertvolle Nutzfläche. Die VIP haben sich dabei für zahlreiche Anwendungsfelder wie Dach, Boden, Brüstungselemente, Balkon und Wintergarten sowie weitere Innen- und Außenbereiche im Baubereich bereits bewiesen und etabliert.

In der Pharmaindustrie steht die Sicherheit der Patienten an erster Stelle. Durch neue Richtlinien wie z.B. Good Distribution Practice (GDP) muss während der gesamten Kühlkette eine konstante individuelle Temperatur von empfindlichen Medikamenten oder klinischer Studien über einen bestimmten Zeitraum gewährleistet sein. Hochleistungsverpackungen mit VIP sichern den temperaturstabilen Transport dieser lebenswichtigen Güter (vgl. Abbildung 3). Durch den kombinierten Einsatz von VIP und Wärmespeicherkomponenten auf Basis von Phasenwechselmaterialien (PCM) kann die benötigte Temperatur über mehrere Tage

konstant gehalten werden. Mit VIP ausgestattete Container ermöglichen dabei beispielsweise einen fünftägigen Transport von hitze- oder kälteempfindlichen Gütern bei einer konstanten Temperatur. Dies geschieht ohne externe Energiezufuhr, sodass keine Batterien, Heizelemente oder Ventilatoren für die Temperaturkontrolle notwendig sind. Dadurch sparen VIP auch hier als hocheffiziente thermische Isolierung Energie ein und schützen gleichzeitig wertvolle pharmazeutische Produkte.

Als weitere Kernmaterialien für VIP werden auch andere Materialien wie z.B. offenporige Polyurethan(PU)-Schäume oder Perlitpulver untersucht oder teilweise auch schon genutzt haben aber Letztere bisher noch keine größere Bedeutung erlangt. Der Vorteil von PU-Schäumen ist deren relativ geringe Dichte, die z.B. bei offenporigen PU-Schäumen bei 60 kg/m³ liegt. Ein Nachteil des bisherigen Schaumes ist allerdings der relative große Porendurchmesser von ca. 100 µm und dadurch bedingt ein entsprechend hoher Energietransport.

Extrem geringe Porendurchmesser unter 1 µm werden mit Aerogelen auf Basis von Kieselsäuren oder Resorcin-Formaldehyden erreicht. Diese Aerogele werden in einem Sol-Gel-Prozess hergestellt, dem eine Trocknung des hochporösen Festkörpergerüsts nachfolgt. Bisherige Aerogeltypen sind allerdings extrem teuer. In den letzten Jahren ist es der Fa. BASF gelungen auf Basis der PU-Chemie aerogelartige Schäume mit sehr geringen Porendurchmessern, sogenannte Nano-Foams herzustellen, die ebenfalls evakuiert als Kernmaterial interessante Eigenschaften aufweisen.

Die Anwendung von VIP mit ihren zahlreichen Vorteilen und Potentialen steht allerdings in vielen Bereichen noch am Anfang. Zusammenfassend lässt sich aber behaupten, dass die VIP überall dort eine große Zukunft haben, wo der zur Verfügung stehende Platz begrenzt oder wertvoll ist und gleichzeitig eine sehr gute Dämmleistung erforderlich ist.

4.2 Verwendete Materialien

Folien

Bei den untersuchten Folien (Folie 1, Folie 2 und Folie 3) handelt es sich um hochdichte Barrierefolien, die aus mehreren Schichten Kunststoff und einer oder mehreren Aluminiumschichten bestehen. In der Tabelle 1 sind die Foliencharakteristika zusammengefasst. Die Folien werden im Folgenden entsprechend ihrer Reihenfolge nach mit F1, F2 und F3 bezeichnet.






Tabelle 1: Verwendete Folien

Folie	Aufbau	Material 1	Zusätzliche Barrierschicht	Material 2	Siegelschicht	Gesamtdicke [μm]
F1	Multilaminat	Metallisierte Polyester			LLDPE	ca. 97
F2	Multilaminat	Metallisierte Polyester	Aluminium-Folie	Polyamid	HDPE	ca. 90
F3	Multilaminat	Metallisierte Polyester	EVOH-Schicht		HDPE	ca. 94

VIP

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden für die VIPs vier verschiedene Kernmaterialien (PUR-Standard, Silica-Platte, Silica-Pulver sowie Nano-Foam) sowie drei verschiedene Folien (Folie 1, Folie 2, Folie 3) eingesetzt. Zum Einschäumen der daraus gefertigten Paneele wurde ein PU-Hartschaum Fa. BASF verwendet. Tabelle 2 gibt Übersicht über die für die Versuche eingesetzten Paneele.

Tabelle 2: Übersicht über die eingesetzten Paneele

VIP					
Abmessung l x b x d [mm]	149 x 210 x 20	149 x 210 x 20	149 x 210 x 20	149 x 210 x 10	149 x 210 x 10
Kernmaterial	PUR-Standard	Silica-Platte	Nano-Foam	Silica-Platte	Silica-Pulver

Bei dem Kernmaterial PUR-Standard handelte es sich um einen offenzelligen Polyurethanschaum, der eine verhältnismäßig grobe Porenstruktur besitzt. Die Silica-Platte Paneele

besitzen Kerne, die aus Platten gepresster mikroporöser Kieselsäure bestehen. Diese Bestandteile wurden miteinander zu Plattenstärken von 20 mm und 10 mm verpresst. Bei den Nano-Foam Paneelen wurde ein organisches Xerogel (in Form einer stabilen Platte) als Kern eingesetzt. Die Silica-Pulver Paneele haben einen Kern, der in Pulver-Technik hergestellt wird. Hauptbestandteil hier ist mikroporöse Kieselsäure, die lose in die vorgefertigten Folienhüllen eingefüllt und anschließend versiegelt wird.

Nach Voruntersuchungen wurden die Abmessungen der zu fertigenden Paneele in Absprache mit Projektpartnern auf DIN A5 Größe (149 mm x 210 mm) festgelegt. Ausschlaggebend für die Probekörpergröße war hier die bedingte Größe der eingesetzten Prüfmittel bzw. Prüfvorrichtungen. Die Dicken der Paneele wurden zwischen 20 mm (PUR-Standard, Silica-Platte und Nano-Foam) sowie 10 mm (Silica-Platte und Silica-Pulver) variiert. Aus verfahrenstechnischen Gründen können Silica-Pulverpaneele bei einer Größe von DIN A5 nur in Dicke von 10 mm hergestellt werden, weshalb zum Vergleich auch Silica-Platte Paneele in dieser Stärke hergestellt wurden.

Klebstoffe

Zum Schutz der VIP wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Klebungen mit diversen Klebstoffen durchgeführt. Um Maßtoleranzen, die bei der VIP-Fertigung entstehen können, auszugleichen, wurden bevorzugt Klebstoffe vorausgewählt, die ein hohes Spaltfüllvermögen von bis zu 3 mm aufweisen. Die Vorauswahl an Klebstoffen erfolgte außerdem nach Kriterien wie z.B. lange Verarbeitungs- und Topfzeit für einen großflächigen Auftrag und somit auch Eignung für relativ große Automobil-Bauteile. Da im Einsatzfall auch hohe Temperaturunterschiede zwischen Außen- und Innenwand vorliegen können, müssen die Klebstoffe auch hohe Temperaturunterschiede aushalten und ausgleichen können, ohne die mechanischen sowie Haftungs-Eigenschaften zu verlieren. Zur einfachen und großflächigen Verarbeitung sollte außerdem der eingesetzte Klebstoff am besten bei Raumtemperatur, ohne äußere Einflüsse wie z.B. Temperatur aushärten können. Tabelle 3 stellt zusammenfassend die vorausgewählte Klebstoffe dar.

Tabelle 3: Verwendete Klebstoffe

Bezeichnung	UHU Ultra Montageklebstoff	SE Polymer 690.00	Teroson 8597 HMLC	Otto Coll S610
Hersteller	UHU	Jowat	Henkel	Otto Chemie
Komponenten	1K	2K	1K	2K
Basis	Silanmodifiziertes Polymer	Silanmodifizierter Epoxid	Polyurethan (PUR)	Alkoxy-Silicon Spezialklebstoff

Bei den vorausgewählten Klebstoffen handelte es sich mit UHU Ultra Montageklebstoff (Fa. UHU) und 2K-SE Polymer 690.00 (Fa. Jowat) um einkomponentige sowie zweikomponentige raumtemperaturhärtende Typen von silanmodifizierten Klebstoffen, die sehr flexibel und elastisch in der Gebrauchstemperatur sind. Unter silanmodifizierten Polymerklebstoffen werden dabei Polykondensationsklebstoffe verstanden, die auch als MS-Polymer Klebstoffe bezeichnet werden. Bei Teroson 8697 HMLC (Henkel) handelt es sich einkomponentigen raumtemperaturhärtenden Polyurethanklebstoff. Bei Otto Coll S610 (Otto Chemie) handelt es sich um einen zweikomponentigen raumtemperaturhärtenden Silikonklebstoff. Beide einkomponentigen Klebstoffe härten durch eine Reaktion mit Feuchte der Umgebungsluft aus. Bei den zweikomponentigen Typen (2K) handelt es sich um „Misch-Klebstoffe“, die ohne äußere Feuchteinflüsse aushärten.

Messtechnik

Zur Messung des aktuellen Gasinnendruckes hat die Fa. va-Q-tec das sogenannte va-Q-check-Verfahren entwickelt, das auf einer Wärmemessung basiert. Dabei wird ein Messkopf auf das Paneel direkt über der in das Paneel integrierten Sensorscheibe aufgesetzt und ein Temperaturgradient zwischen Messkopf und Sensorscheibe erzeugt. Der resultierende Wärmefluss ist vom Innendruck des Paneels abhängig. Dieser Innendruck kann mit den va-Q-check Verfahren im Bereich auf ± 1 mbar genau bestimmt werden. Das va-Q-check-Verfahren ermöglicht somit neben einer schnellen und genauen Bestimmung des aktuellen Innendruckes auch eine 100 %-Kontrolle. Abbildung 4 zeigt das Auslesegerät sowie den auf einem PU-Kern platzierten Sensor.



Abbildung 4: Va-Q-check Auslesegerät links und va-Q-check Sensor auf einem PUR-Standard Paneel rechts im Bild

Alle im Rahmen des Projektes hergestellten VIP zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit va-Q-chip-Sensoren versehen wurden, die eine Kontrolle des Gasinnendruckes und damit auch der Leistungscharakteristika der Paneele über die gesamte Projektlaufzeit erlauben. Somit war es möglich die Funktion, die Dichtigkeit sowie die Beschädigung der Hüllfolie während einer mechanischen oder auch Alterungs-Prüfung zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu detektieren. Es wurde zudem RFID - Sensoren von der Fa. Nanotron angeschafft, die es ermöglichen den Gasinnendruck berührungslos abzufragen. Diese werden im Kapitel 4.6 näher beschrieben.

4.3 Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

Für die Charakterisierung der Ausgangsmaterialien wurden mikroskopische, thermische, mechanische und physikalische Analysemethoden angewandt. Dabei wurden die Oberflächenenergien, das Dämpfungsverhalten, die Verarbeitungs- und Schmelztemperaturen der Folien bestimmt.

4.3.1 Mikroskopische Untersuchung an den Folien

Die verwendeten Hochbarrierefolien stellen einen Mehrschichtverbund dar. Die einzelnen Schichten sind u.a. Polyester-, Polyolefin-, Aluminium- und entsprechenden Primerschichten. Um einen Überblick über den Aufbau der einzelnen Folienschichten zu erlangen, wurden diese mikroskopisch untersucht. Die Aufnahmen wurden im Auflichtverfahren unter 50-facher Vergrößerung mit dem „Axioskop2 Mat“ der Fa. ZEISS hergestellt. Vorab mussten die drei Folien aufrechtstehend in eine Form mit einem Kalteinbettssystem auf Harz-Härter Basis eingebettet werden. An diesen Probekörpern wurden mittels eines halbautomatischen Schleif- und Poliersystems Polierschliffe vorgenommen. Abbildung 5 zeigt exemplarisch den Aufbau einer Mehrschichtfolie am Beispiel der Folie F1.

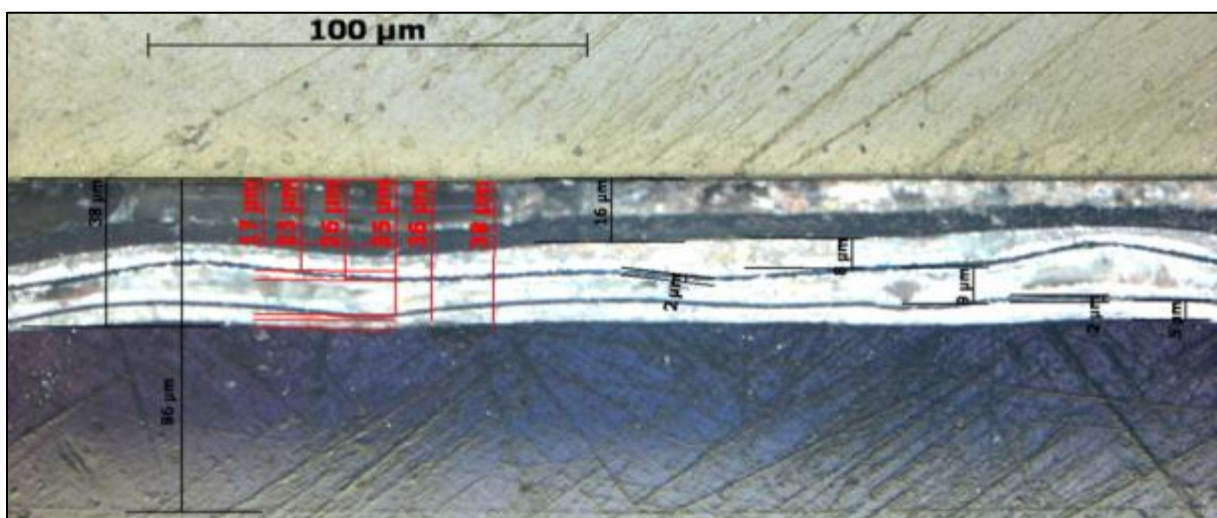


Abbildung 5: Lichtmikroskopische Aufnahme (Auflichtverfahren) der Folie F1 zum Verdeutlichen des Aufbaus aus einzelnen Schichten

In der Abbildung 5 sind die einzelnen Schichten der Folie F1 gut zu erkennen. Die beiden Deckschichten bilden mit 16 μm und 48 μm die Hauptbestandteile der Folie. Die Schicht mit einer Dicke von ca. 48 μm bildet dabei die Siegelschicht. Zwischen den beiden Deckschichten liegen die metallisierten Polyesterschichten und die jeweils einzelnen Primerschichten. Diese sind nach Angaben der Hersteller teilweise nur bis zu 2 μm Dick. Diese Primer- und Haftvermittlerschichten konnten im mikroskopischen Auflichtverfahren allerdings nicht detektiert werden. Für weitere Untersuchungen wurde daher ein Rasterelektronenmikroskop (REM) Leo Gemini 1530 der Fa. Zeiss eingesetzt. Die Probenpräparation erfolgte im eingefrorenen Zustand (Gefrierbruch) um die einzelnen Schichten bei der Probenpräparation nicht zu zerstören. So konnte eine plastische Deformation der Folie bei der Präparation vermieden werden. Abbildung 6 zeigt die Aufnahmen der Folie F1 unter einem REM.

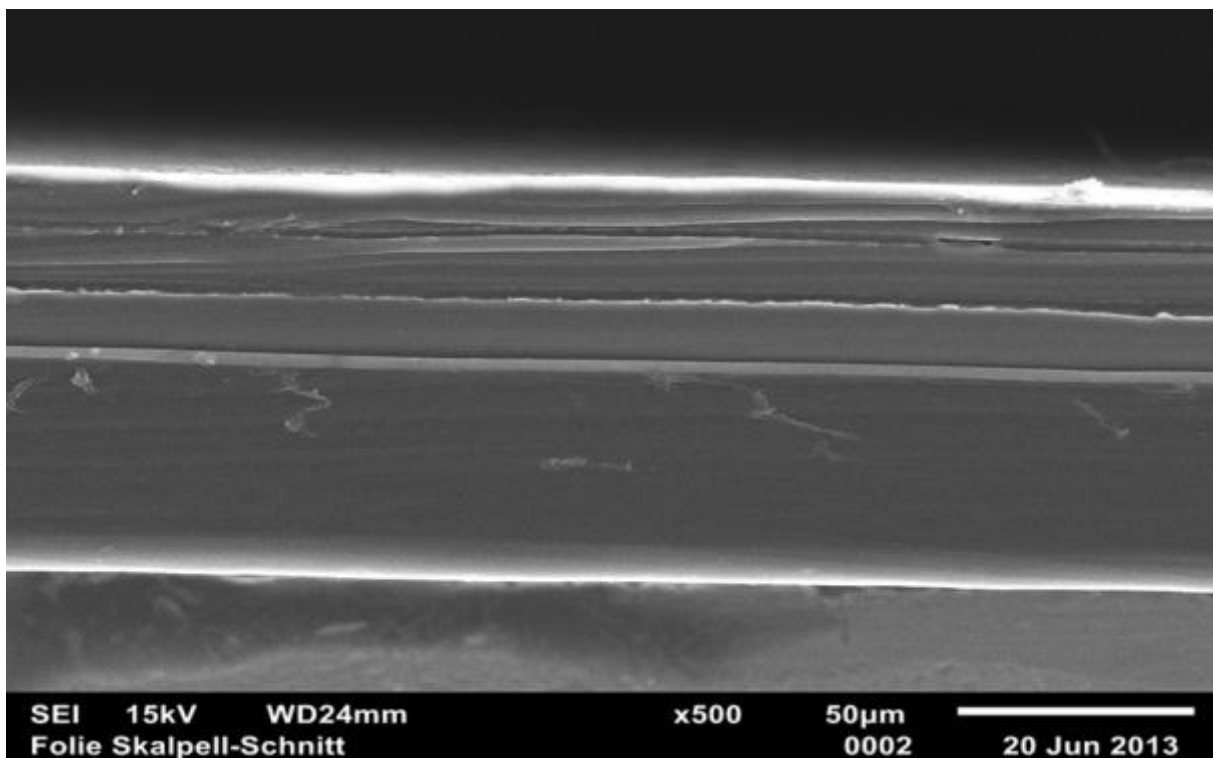


Abbildung 6: REM Aufnahme der Folie F1

Auch hier konnten die einzelnen Schichten der Folie F1 (ohne Primer- und Haftvermittlerschichten) erkannt werden. Die restlichen Folien wurden mit dem Lichtmikroskop „Axioskop2 Mat“ der Fa. ZEISS vermessen wurden. Tabelle 4 zeigt die gemessenen Schichtdicken der einzelnen Bestandteile der Folien.

Tabelle 4: Einzelnen Schichtdicken der Verbundfolien

	Folie F1	Folie F2	Folie F3
Foliendicke laut Hersteller [μm]	97	90	94
Gemessene Einzelschichtdicken [μm]	5	6	15
	2	14	2
	9	2	13
	2	12	2
	8	20	18
	16	38	45
	53		
Summe der gemessenen Schichtdicken [μm]	95	92	93

4.3.2 Dynamische Differenzkalorimetrie

Wie bereits erwähnt stellen die eingesetzten Folien ein Verbund bzw. ein Laminat aus mehreren Folienlagen unterschiedlicher Kunststoffe, Primerschichten sowie Aluminiumschichten dar. Um die thermischen Eigenschaften der unterschiedlichen Kunststoffe (im Folienverbund) zu bestimmen, wurde die Wärmestromkalorimetrie (DSC) und die Thermogravimetrie (TG) eingesetzt. Die DSC-Messungen wurden mit einer Heiz- und Kühlrate von 10 K/min gefahren. Der Temperaturbereich lag dabei zwischen 25 °C und 350 °C. Durch den Vergleich von zwei Heizphasen konnten verarbeitungsbedingte thermische Effekte vom reinen Materialverhalten separiert werden. Die Auswertung erfolgte in Anlehnung an die DIN EN ISO 11357-2 an der zweiten Aufheizkurve. Die DSC-Messungen lieferten dabei Rückschlüsse auf unterschiedliche polymere Bestandteile, die anhand ihrer Schmelzbereiche festgestellt werden konnten. So konnten unterschiedliche Schmelzpeaks für Polyolefine sowie Polyester detektiert werden. Die Polyolefinschicht, die die Folieninnenseite darstellt, dient als Siegelschicht. Die Polyesterschichten stellten die Außenschicht der Paneele dar. Aufgrund der unterschiedlichen olefinischen Siegelschichten besitzen die Folien verschiedene Siegeltemperaturen und somit auch unterschiedliche Verarbeitungsbedingungen bei der Herstellung von VIP.

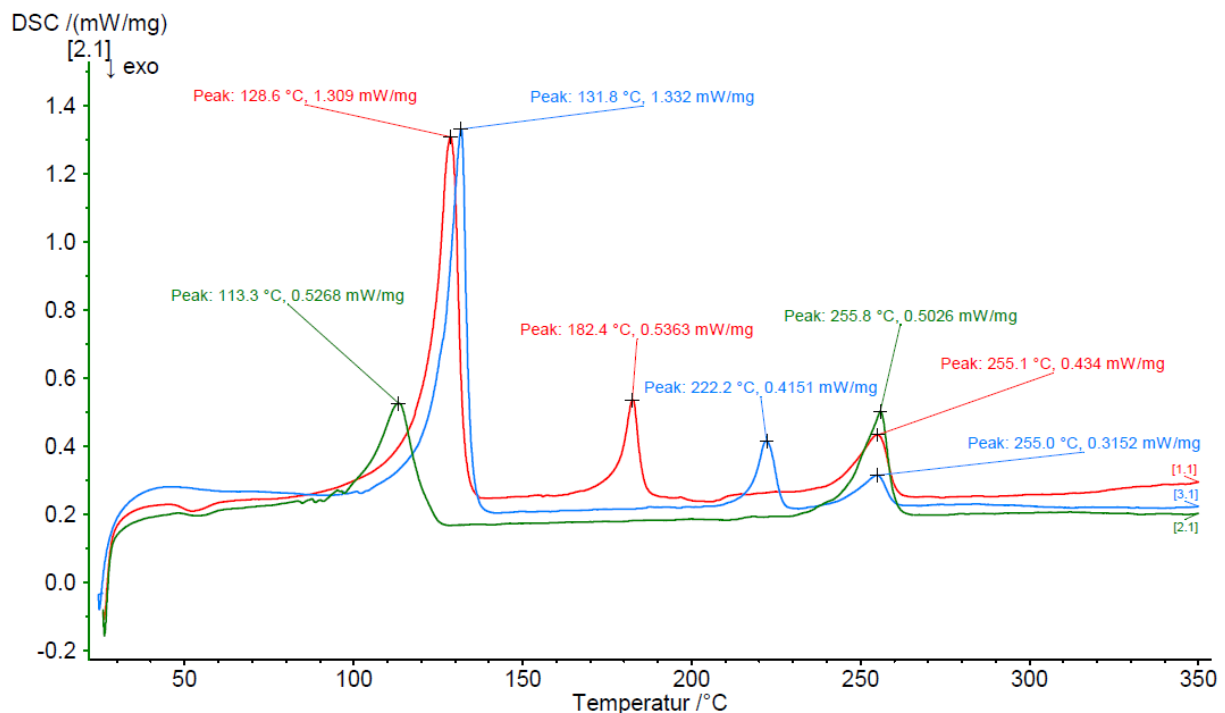


Abbildung 7: DSC Aufheizkurven der Folien mit den entsprechenden Schmelzpeaks

In Abbildung 7 sind die Schmelzpeaks der Folienlamine dargestellt. Aus den so erlangten Werten wurden die Prozessparameter zum Siegeln der Folien auf die jeweiligen Folientypen angepasst. Die Folie F1 ist grün, die Folie F2 blau und die Folie F3 rot abgebildet. Tabelle 5 stellt die Ergebnisse der DSC-Messungen tabellarisch dar.

Tabelle 5: Ermittelte Schmelzpeaks der einzelnen Folien im DSC sowie Vergleich mit Literaturwerten

Folie	Material	Schmelztemperaturen [°C] Literatur [DOM12]	Schmelztemperaturen [°C] DSC Messung
F1 (grün)	LLDPE	110 – 125	113,3
F2 (blau)	HDPE	130 – 145	131,8
F2 (blau)	PA6	220	222,2
F3 (rot)	HDPE	130 – 145	127,3
F3 (rot)	EVOH	k.A.	182,4
F1, F2, F3	PET	250 – 260	ca. 255,0

4.3.3 Thermogravimetrische Analyse

Die Resultate der thermogravimetrischen (TG) Messung stehen im Einklang mit den Ergebnissen der DSC-Untersuchungen. Anhand der Massenänderung und der Zersetzungstemperatur der Verbundfolien konnten mehrere polymere Bestandteile separiert und ausgewertet werden. Für die TG-Messungen wurde ein Temperaturprogramm mit 10 K/min unter Stickstoff gefahren. Der Temperaturbereich lag dabei zwischen 25 °C und 600 °C. In Abbildung 8 sind die Übergangstemperaturen als Onset, Wendepunkt und Endpunkt der Folien dargestellt.

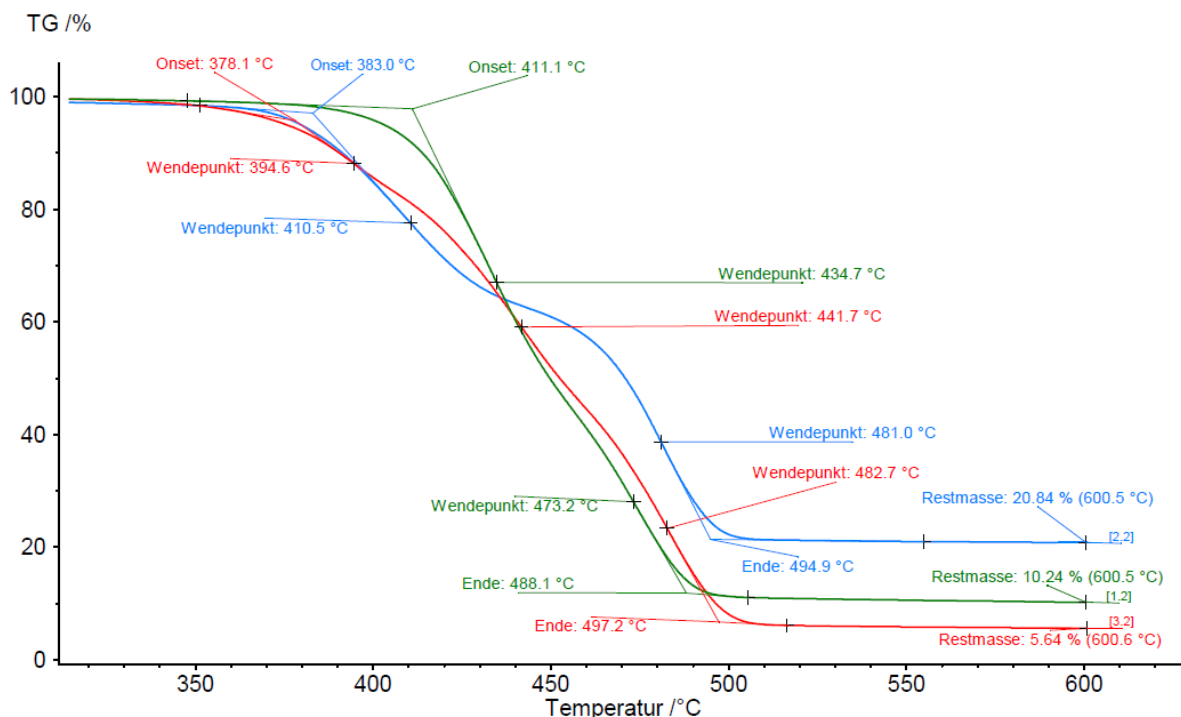


Abbildung 8: TG Kurven der Folien

Die Zersetzung jedes einzelnen Materials ist als stufenweiser Abfall der Masse in Abbildung 8 zu erkennen. So konnten die Zersetzungstemperaturen der einzelnen Bestandteile der Verbundfolien detektiert werden. Die Aluminium-Schicht ist als Restmasse im Diagramm zu erkennen. In der Tabelle 6 sind die Literaturwerte für Zersetzungstemperaturen sowie die gemessenen Zersetzungstemperaturen gegenübergestellt. Leichte Abweichungen der Zersetzungstemperaturen vom Literaturwert können auf Überlagerungen von mehreren Folienkomponenten zurückgeführt werden.

Tabelle 6: Zersetzungstemperaturen der Verbundkomponenten

Folie	Material	Zersetzungstemperatur [°C] Literatur [DOM12]	Zersetzungstemperatur [°C] TG Messung
F1 (grün)	LLDPE	487 - 498	488
F2 (blau)	HDPE	487 - 498	494
F2 (blau)	PA6	435	410
F3 (rot)	HDPE	487 - 498	497
F3 (rot)	EVOH	182	k.A.
F1, F2, F3	PET	425 - 440	434 - 441

4.3.4 Dynamisch-mechanische Analyse

Um eine Aussage über das Dämpfungsverhalten der Kernmaterialien sowie der eingesetzten Folien treffen zu können, wurden mittels dynamisch-mechanischer Analyse (DMA) zahlreiche Messreihen durchgeführt. Die DMA (DMA/SDT861 der Fa. Mettler Toledo) ist eine thermische Methode zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen. Die DMA unterwirft die zu untersuchende Probe in Abhängigkeit von der Temperatur einer sich zeitlich ändernden sinusförmigen mechanischen Beanspruchung. Dadurch verformt sich die Probe mit gleicher Periode. Gemessen werden die Kraftamplitude, die Verformungsamplitude sowie die Phasenverschiebung zwischen dem Kraft- und dem Verformungssignal.

Die Frequenz bei den hier durchgeführten Untersuchungen betrug 1 Hz. Die Probekörper wurden im Zugmodus mit einer Deformationsamplitude von 10 µm belastet. Der Temperaturbereich lag zwischen -50 °C und +80 °C. Die Versuche wurden bei einer konstanten Heizrate von 2 K/min gefahren. Vorab wurden die für die Prüfung notwendigen Zugstäbe (Typ 5S 19,5 x 4,0 mm) für die Folienprobekörper und für die Kernmaterialien Rechteckprobekörper 8,0 x 8,0 x 4,0 mm ausgestanzt bzw. geschnitten. In Abbildung 9 ist der Verlustfaktor ($\tan\delta$) sowie der Speicher- und Verlustmodul über der Temperatur der Folien 1, 2 und 3 (abgekürzt entsprechend F1 grün, F2 blau und F3 rot) aufgetragen.

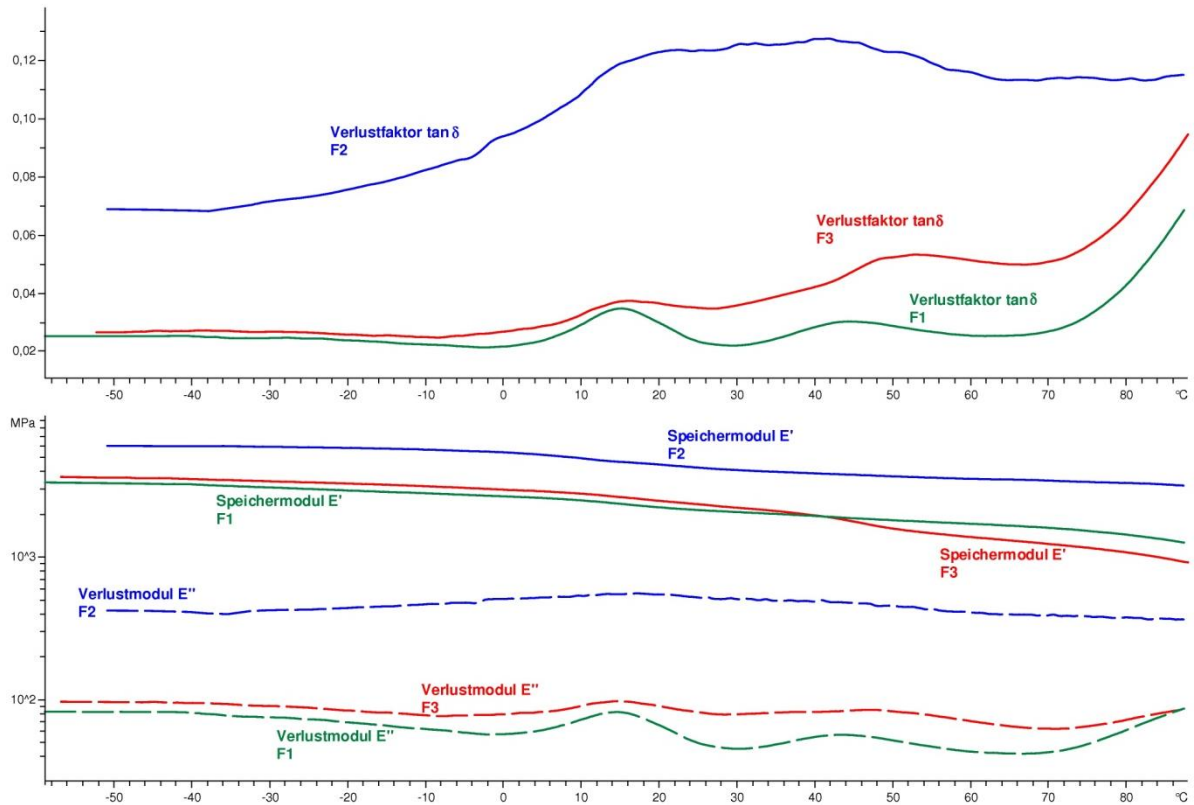


Abbildung 9: Verlustfaktor tan Delta und Speichermodul der Folien F1,F2 und F3 über der Temperatur

Abbildung 9 zeigt oben im Bild, dass die Folie F2 einen deutlich höheren Verlustfaktor ($\tan\delta$) im gesamten Temperaturbereich besitzt, was auf ein besseres Dämpfungsverhalten hinweist. Bei dieser Folie können somit mechanische Einwirkungen besser aufgenommen bzw. kompensiert werden, was sich in den Kurzzeitzugversuchen (Kap.4.4.1) widerspiegelt. Hier weiß die Folie F2 die geringsten Bruchkräfte auf. In Abbildung 10 ist der Verlustfaktor sowie der Speicher- und Verlustmodul der Kernmaterialien PUR-Standard und Nano-Foam aufgetragen.

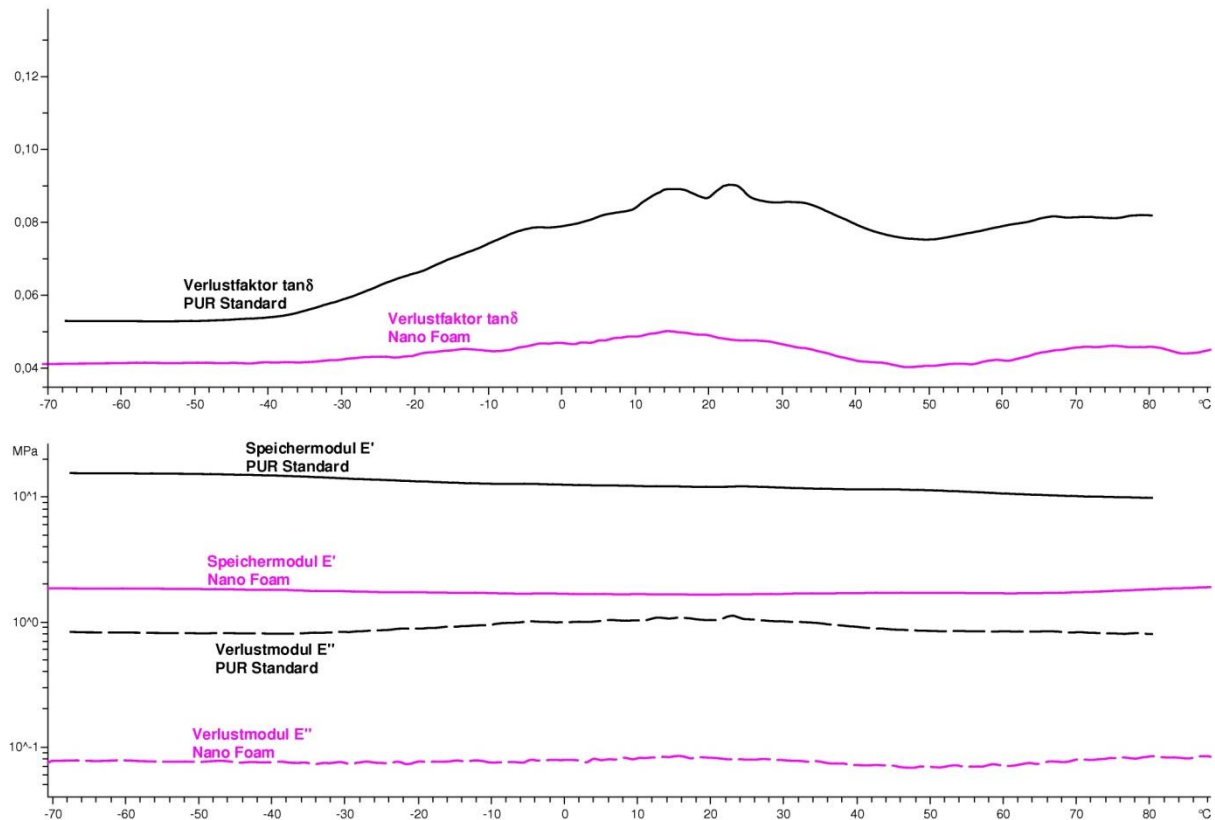


Abbildung 10: Verlustfaktor $\tan \Delta$ und Speichermodul der Kernmaterialien PUR-Standard und Nano-Foam

Aus der Gegenüberstellung ist erkennbar, dass das Kernmaterial PUR-Standard (schwarz) innerhalb des geprüften Temperaturbereichs einen deutlich höheren Speichermodul als das Kernmaterial Nano-Foam (pink) besitzt, was auf eine höhere Steifigkeit hinweist. Gleichzeitig ist der Verlustfaktor des PUR-Standard höher als der des Kernmaterials Nano-Foam, was auf bessere Dämpfungseigenschaften schließen lässt. Im Kurzzeitzugversuch (Kap.4.4.1) zeigte sich auch hier die leicht schlechteren Bruchkräfte des PUR-Standard Kernmaterials.

4.3.5 Messen der Oberflächenenergie der Folien

Neben den geplanten Techniken zum Einschäumen der Paneele, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes weitere Techniken wie z.B. Überkleben der Paneele mit schützenden Aluminiumblechen oder glasfaserverstärkten Kunststoffen untersucht. Die Verbindungstechnik Kleben setzt eine Benetzung der Oberfläche mit dem Klebstoff voraus. Über die Oberflächenenergie (OFE) der vorausgewählten Folien kann eine Aussage über die Benetzbarkeit sowie eine grundsätzliche Aussage der Klebeignung der Folien in Verbindung mit einem bestimmten Klebstoff getroffen werden. Dabei lässt eine niedrigere OFE des Substrates grundsätzlich auf eine schlechtere Klebeignung schließen.

Die OFE der Folien wurde mittels Kontaktwinkelmessung ermittelt. Hierzu wurden drei Flüssigkeiten (Diiodmethan, Wasser sowie Ethylenglycol) mit mindestens fünf Tröpfchen auf der Folienoberfläche abgelegt und der Kontaktwinkel bestimmt. Mit Hilfe der gemessenen Kontaktwinkel wurde die OFE der einzelnen Komponenten nach Methode OWRK [OWE69] ermittelt. In Tabelle 7 sind die gemessenen OFE der Folien dargestellt.

Tabelle 7: OFE der Innen- und Außenseiten von eingesetzten Folien

F1	Oberflächenenergie [mN/m]	disperser Anteil [mN/m]	polarer Anteil [mN/m]
Außenseite	56,12 ± 0,97	29,17 ± 0,44	26,99 ± 0,52
Innenseite „Siegelsschicht“	31,31 ± 0,18	31,05 ± 0,14	0,25 ± 0,03
F2	Oberflächenenergie [mN/m]	disperser Anteil [mN/m]	polarer Anteil [mN/m]
Außenseite	50,41 ± 1,07	34,05 ± 0,59	18,36 ± 0,47
Innenseite „Siegelsschicht“	35,80 ± 0,45	31,81 ± 0,40	3,98 ± 0,05
F3	Oberflächenenergie [mN/m]	disperser Anteil [mN/m]	polarer Anteil [mN/m]
Außenseite	51,12 ± 0,54	37,66 ± 0,33	13,46 ± 0,21
Innenseite „Siegelsschicht“	36,98 ± 0,38	31,25 ± 0,37	5,73 ± 0,01

Es konnten deutliche Unterschiede der Außen- und Innenseite der Folie bzgl. der OFE festgestellt werden. Die Innenseite der Folie besteht dabei aus einer Polyolefinschicht. Hier konnten die erwarteten niedrigeren Oberflächenenergien detektiert werden. Diese ist jedoch für eine Verklebung nicht relevant, sondern wird bei der Herstellung der Paneele zum thermischen Fügen der Folien benutzt.

Bei der Polyesterschicht der Folien-Außenseite konnten deutlich höhere OFE-Werte im Bereich > 50 mN/m gemessen werden. Die Werte lagen damit auch in dem für diese Materialgruppe typischen Bereich. Bei diesen relativ hohen OFE-Werten kann von einer

generell guten Klebeignung ausgegangen werden, ohne dass eine notwendige Oberflächenvorbehandlung notwendig ist. Die gemessene OFE wurde im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts u.a. für eine Auswahl geeigneter Klebstoffe verwendet.

4.3.6 Alterung der Paneele

Um eine Aussage über das Langzeitverhalten zu erlangen wurden die Paneele bei einer erhöhten Temperatur sowie teilweise auch einer erhöhten Feuchtigkeit ausgelagert. Die Temperatur in den Wärmeöfen betrug dauerhaft 70/80 °C. Die Paneele wurden aus den Wärmeöfen entnommen und nach entsprechender Abkühlzeit der Gasinnendruck gemessen. In Abbildung 11 ist der Gasinnendruck der Paneele mit Folie F1 waren über der Einlagerungsdauer im Wärmeofen (70 °C) dargestellt. Es wurden mindestens drei Paneele geprüft. Die dargestellten Werte des Gasinnendruckes stellen die Mittelwerte der Messungen dar. Die Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Diagramm dargestellt.

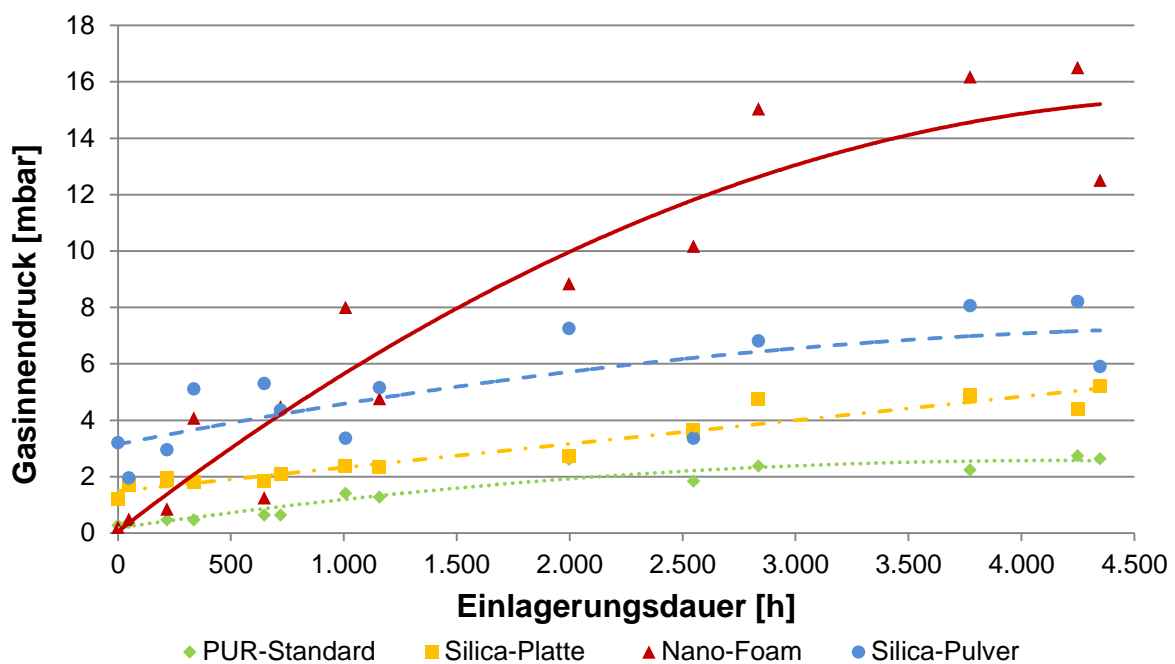


Abbildung 11: Ermittelter Gasinnendruck der Paneele mit der Folie F1 während der Warmlagerung (70 °C)

Zu erkennen ist ein Anstieg des Gasinnendruckes über die Einlagerungsdauer von ca. 4.350 Stunden bei allen Paneelen. Der Anstieg ist bei den Nano-Foam Paneelen etwas stärker ausgeprägt. Bei den restlichen Paneelen fiel der Anstieg des Gasinnendruckes ähnlich aus. Den geringsten Anstieg des Gasinnendruckes verzeichneten dabei die PUR-Standard Paneele. Bei ihnen erhöhte sich der Gasinnendruck um ca. 2 mbar über der gesamten Einlagerungsdauer, was sich als eine sehr gute Beständigkeit gegen Temperatur bewerten lässt.

In Abbildung 12 ist der Gasinnendruck der Paneele mit Folie F3 über der Einlagerungsdauer im Wärmeofen (70 °C) dargestellt. Es wurden mindestens drei Paneele geprüft. Die dargestellten Werte des Gasinnendruckes stellen die Mittelwerte der Messungen dar. Die Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Diagramm dargestellt.

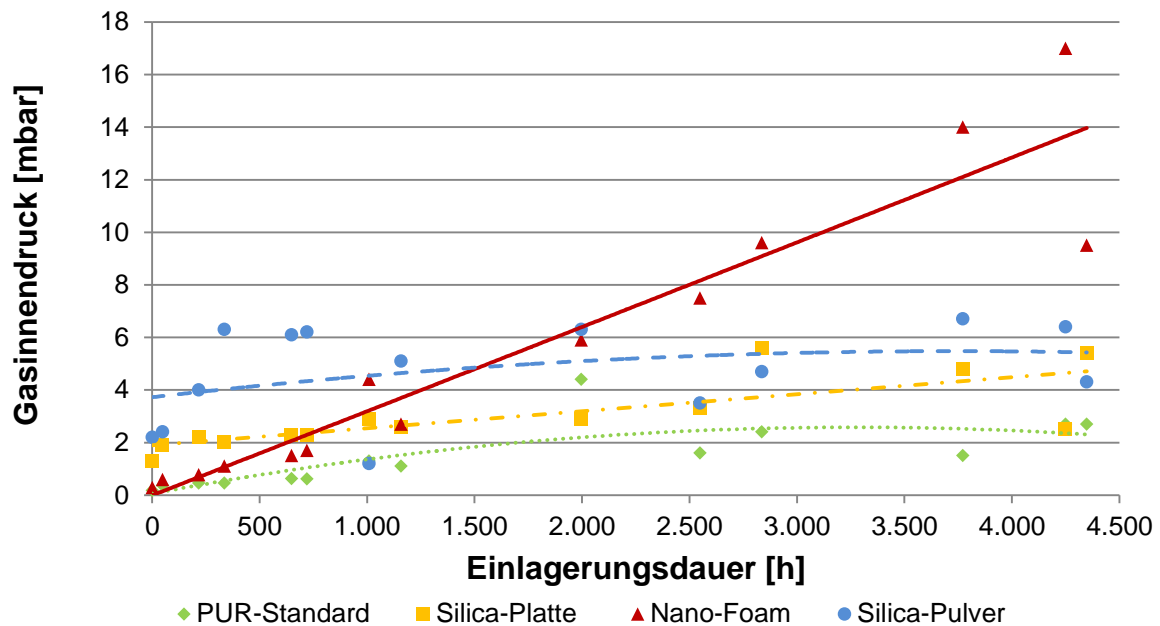


Abbildung 12: Ermittelter Gasinnendruck der Paneele mit der Folie F3 während der Warmlagerung (70 °C)

Auch hier ist ähnlich wie bei Folie F1 ein stärkerer Anstieg des Gasinnendruckes bei den Nano-Foam Paneelen zu erkennen. Jedoch ist der Anstieg des Gasinnendruckes bei allen Paneelen über der Einlagerungsdauer gegenüber den Paneelen, die mit der Folie F1 umschlossen waren, etwas geringer, was für eine schlechtere Gasdurchlässigkeit der Außenhülle spricht. Bei den Warmlagerungen zeigt die Folie F3 bessere Barriereigenschaften.

Zudem lagerte die va-Q-tec PUR-Standard, Nano-Foam und rezepturoptimierte PUR-Standard Paneele (PUR-Standard opti.) bei 80 °C in einem Wärmeofen aus. Die Abmessungen der Paneele wurden auf 400 x 400 x 25 mm erhöht, um einen geringeren Siegelnahteinfluss zu erreichen. In Abständen von 4 Wochen wurden der Gasinnendruck mittels va-Q-check Sensor ermittelt. In Abbildung 13 sind die Gasinnendruckwerte der Paneele mit der Folie F1 und F3 dargestellt.

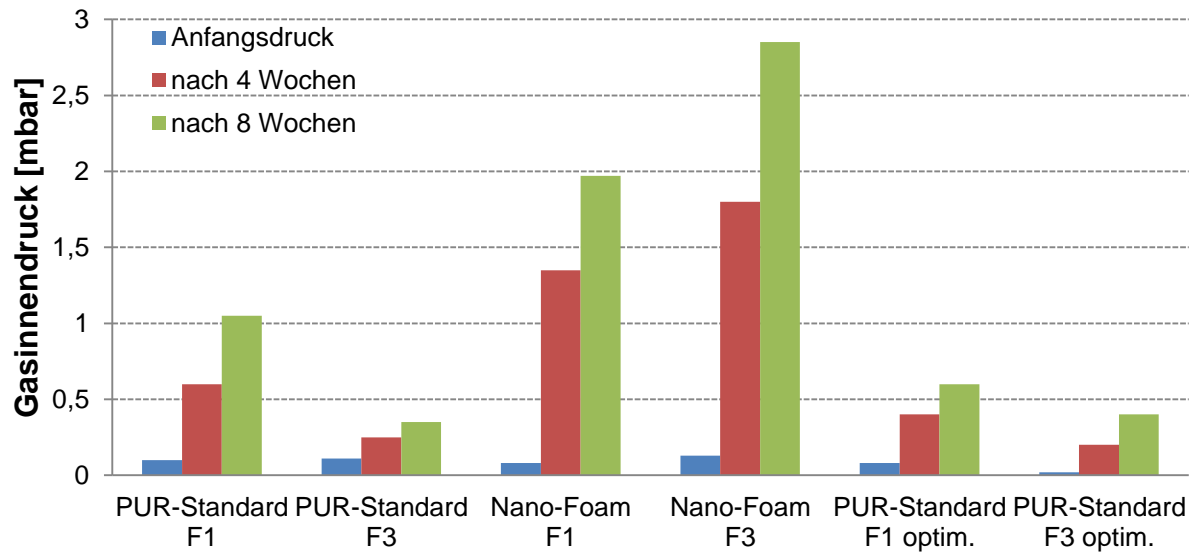


Abbildung 13: Ermittelter Gasinnendruck der Paneele während der Warmlagerung (80 °C)

In Abbildung 13 sind deutliche Anstiege der Gasinnendrucke der Nano-Foam Paneele mit der Folie F1 und F3 nach der ersten und der zweiten 4-wöchigen Auslagerung zu sehen. Bei der Warmlagerung sind vermutlich Ausgasungen des Nano-Foam Kernmaterials für eine Erhöhung des Gasinnendruckes verantwortlich. Hier bedarf es einer Rezepturoptimierung seitens der BASF. Dieser Anstieg deckt sich auch mit den Ergebnissen vom SKZ. Ein geringerer Anstieg der PUR-Standard sowie PUR-Standard optim. Paneele ist über gesamte Auslagerungsdauern zu erkennen. Bei den Paneelen mit der Folie F1 stieg der Gasinnendruck etwas schneller an.

In der Klimakammer wurde ein definiertes Prüfprogramm in Anlehnung an PV VW 1200 gefahren. In dieser Prüfvorschrift werden bestimmte Zyklen von Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen definiert. Die Temperatur variiert dabei in der Klimakammer zwischen -40 °C und +80 °C. Die Feuchtigkeit in der Klimakammer variiert dabei zwischen ca. 15 und 80% rel. F. Die Paneele wurden aus der Klimakammer entnommen und nach entsprechender Abkühlzeit der Gasinnendruck gemessen. In Abbildung 14 ist der Gasinnendruck der Paneele mit Folie F1 über der Einlagerungsdauer in der Klimakammer dargestellt. Es wurden mindestens drei Paneele geprüft. Die Einlagerungsdauer betrug ca. 790 Stunden. Die dargestellten Werte des Gasinnendruckes stellen die Mittelwerte der Messungen dar. Die Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Diagramm dargestellt.

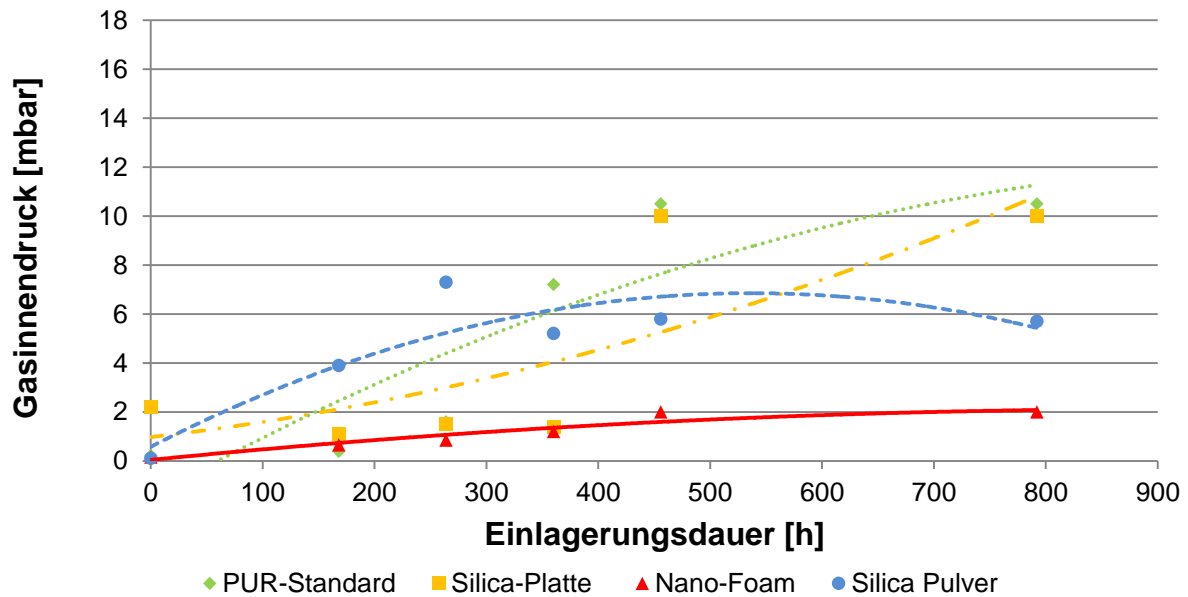


Abbildung 14: Ermittelter Gasinnendruck der Paneele mit der Folie F1 während der Klimalagerung (PV VW 1200)

Die Nano-Foam Paneele zeigten über der gesamten Einlagerungsdauer einen Anstieg des Gasinnendruckes von lediglich 2 mbar. Während Silica-Platte am Ende der Einlagerungsdauer einen Gasinnendruck von ca. 10 mbar aufwies. Die Silica-Pulver Paneele lagen mit 6 mbar dazwischen.

In Abbildung 15 ist der Gasinnendruck der Paneele mit Folie F3 über der Klimalagerung dargestellt. Die Einlagerungsdauer betrug ca. 790 Stunden. Es wurden mindestens drei Paneele geprüft. Die vorgestellten Werte des Gasinnendruckes stellen die Mittelwerte der Messungen dar. Die Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Diagramm dargestellt.

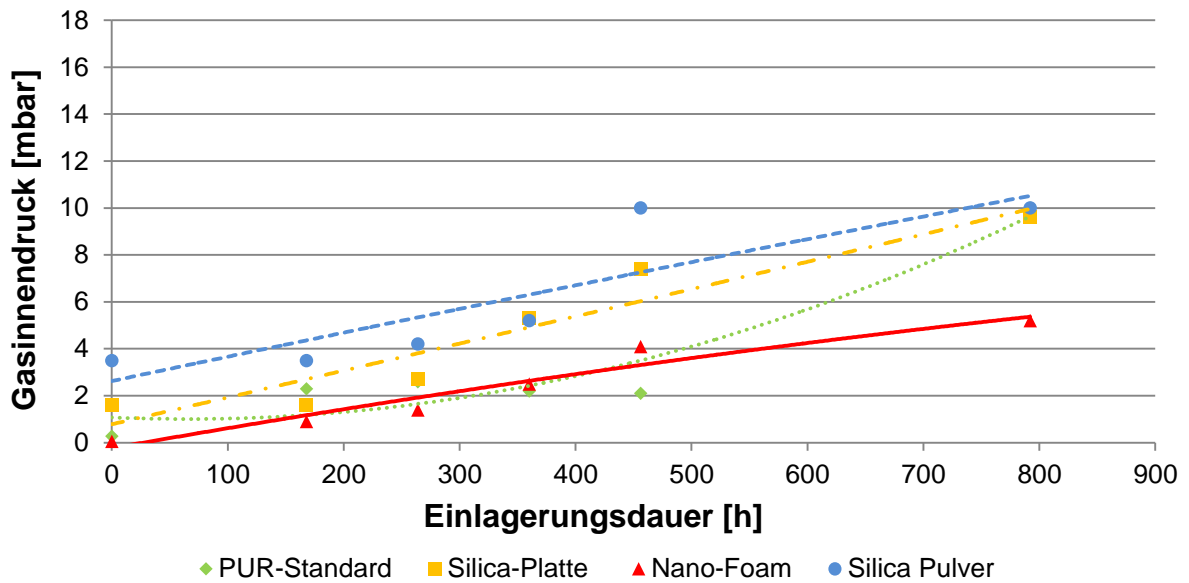


Abbildung 15: Ermittelter Gasinnendruck der Paneele mit der Folie F3 während der Klimalagerung (PV VW 1200)

Ein Ähnliches Verhalten während der Klimalagerung zeigten die Paneele mit der Folie F3. Die Silica-Platte Paneele und die PUR-Standard Paneele lagen bei ca. 10 mbar, während sich bei Nano-Foam Paneelen der geringste Anstieg des Gasinnendruckes bis auf ca. 5 mbar zeigte. Der stärkere Anstieg des Gasinnendruckes erklärt sich mit den Permeationseigenschaften bzw. der Wasserdampfdurchlässigkeit der einzelnen Folien und zeigt eine deutlich stärkere Abhängigkeit des Systems von der Temperatur in Verbindung mit der Luftfeuchtigkeit.

4.3.7 Wärmeleitfähigkeitsmessungen

Um eine Aussage über die Funktionsfähigkeit der Paneele bei erhöhter Temperatur machen zu können, wurden an den im Wärmeöfen (80 °C) ausgelagerten Paneelen (400 x 400 x 25 mm) auch Wärmeleitfähigkeitsmessungen bei erhöhter Temperatur von 80°C durchgeführt. Es wurden PUR-Standard, Nano-Foam und PUR-Standard opti. jeweils mit der Folie F1 und F3 ausgelagert. Vergleichend erfolgten Messungen bei Raumtemperatur (27°C). Die Einlagerungsdauer war insgesamt acht Wochen. Abbildung 16 zeigt Wärmeleitfähigkeitsmessungen ausgelagerter Paneele. Die Messungen wurden bei va-Q-tec durchgeführt.

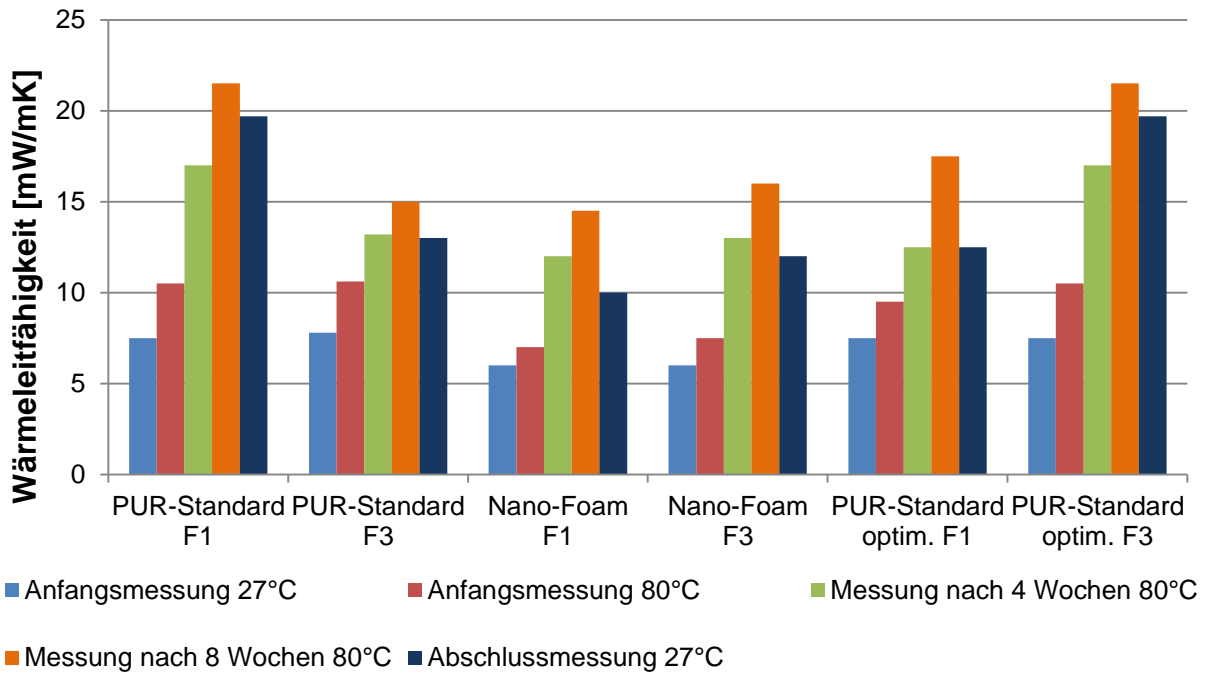


Abbildung 16: Ermittelte (80 °C)-Wärmeleitfähigkeiten der ausgelagerten Paneele mit Folie F1 und F3 während der Warmlagerung (80 °C)

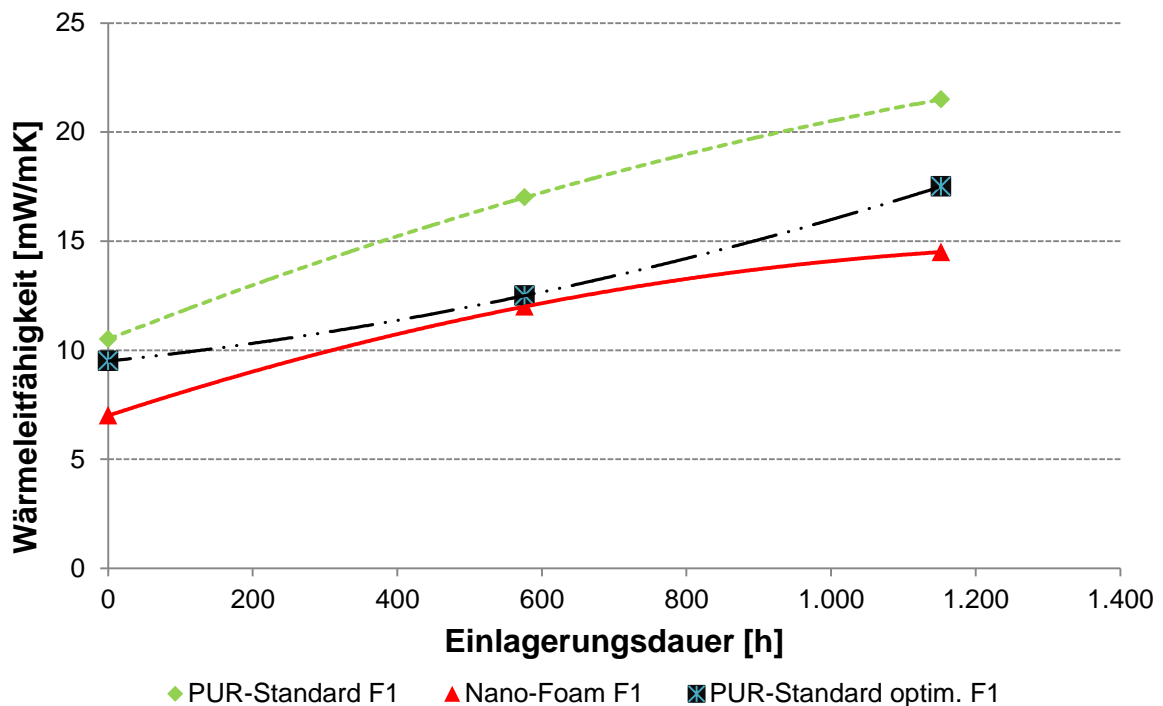


Abbildung 17: Ermittelte (80 °C)-Wärmeleitfähigkeiten der ausgelagerten Paneele mit Folie F1 während der Warmlagerung (80 °C)

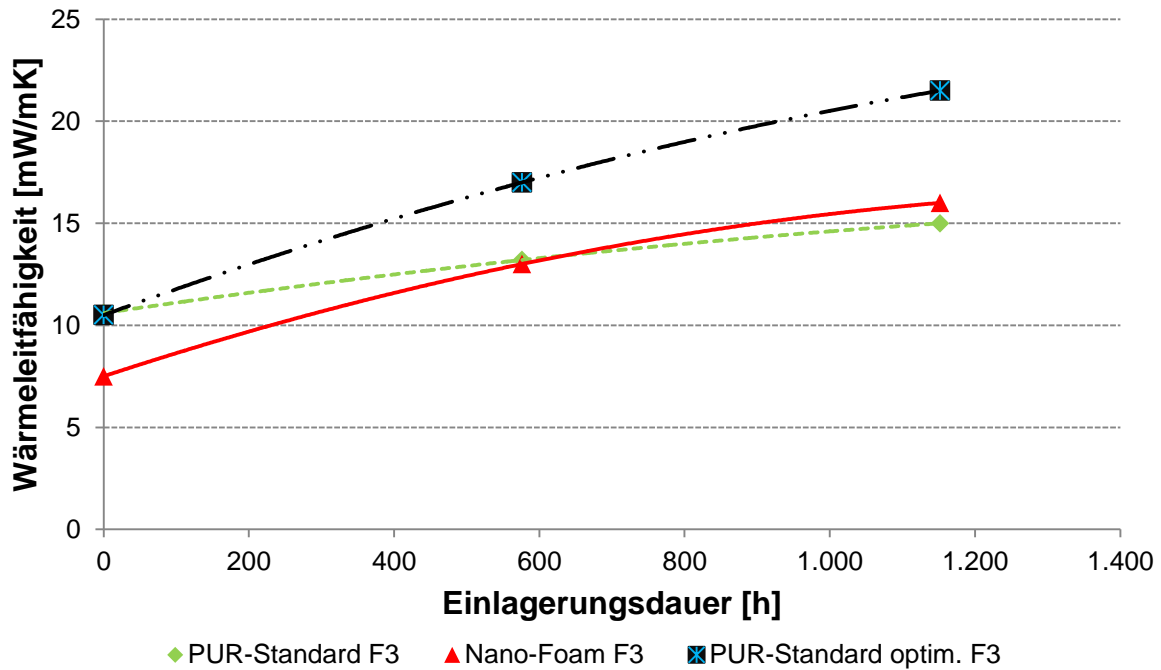


Abbildung 18: Ermittelte (80 °C)-Wärmeleitfähigkeiten der ausgelagerten Paneele mit Folie F3 während der Warmlagerung (80 °C)

Die Wärmeleitfähigkeiten der Paneele in Abbildung 16 steigt mit zunehmender Einlagerungsdauer von vier Wochen an. Bei der Abschlussmessung liegt dieser dann wieder etwas niedriger. Die gesamte Wärmeleitfähigkeitsmessung verschlechtert sich jedoch. Dies ist sowohl bei Raumtemperatur sowie 80 °C–Auslagerungen zu sehen. Bei den Paneelen untereinander hatte das PUR-Standard Paneel mit der Folie F1 die schlechtesten Wärmeleitfähigkeitswerte nach den letzten drei Messungen.

4.4 Ermittlung der mechanischen Kennwerte der Paneele

Für die Beurteilung der mechanischen Eigenschaften der Paneele im Ausgangszustand wurden mechanische Prüfungen wie Kurzzeitzugversuch, der technologischer Biegeversuch und das Stoßverhalten der Paneele durchgeführt. Zu Untersuchungen der Siegelnaht wurde der Siegelprozess der Folien mittels Wärmekontakt- und Ultraschallsiegeln nachgestellt. Des Weiteren wurden Proben der Siegelnaht an unterschiedlichen Stellen im Paneel entnommen und mittels Kurzzeitzugversuch bewertet. Für eine Verbesserung bzgl. der Verbundhaftung der Folie zum Kern wurden Versuche mittels Wärmeverbehandlung an den Paneelen vorgenommen.

4.4.1 Kurzzeitzugversuch der Folien, der Kerne und der Paneele

Um Informationen über Verarbeitungseinflüsse der Folien herauszubekommen, wurden Folienprobekörper in Extrusionsrichtung (Abzugsrichtung bei der Folienextrusion) sowie quer zur Extrusionsrichtung herausgestanzt. So können mögliche Orientierungen im Verarbeitungsprozess des Folienverbundes detektiert werden.

Für die mechanische Prüfung wurden Folienstreifen mit den Abmessungen 170 mm x 20 mm aus den Ausgangsfolien ausgestanzt. Diese wurden für 24 Stunden bei Normklima (23 °C, 50 % rel. F) ausgelagert und anschließend geprüft. Es wurde der Kurzzeitzugversuch nach DIN EN ISO 527-3 an den Probekörpern durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug dabei 100 mm/min. Hier wurden mindestens acht Probekörper pro Folie und Richtung gezogen. In Abbildung 19 sind die Bruchkräfte der einzelnen Folien in und quer zur Extrusionsrichtung dargestellt.

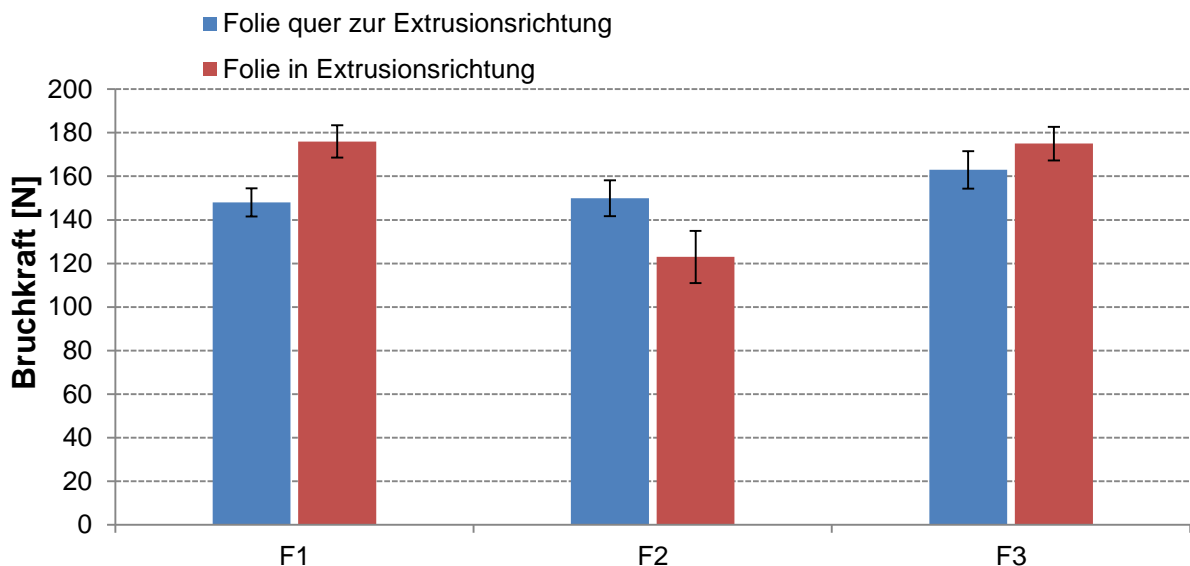


Abbildung 19: Bruchkräfte der Folien nach dem Kurzzeitzugversuch DIN EN ISO 527-3

Die Folien F1 und F3 zeigten in Extrusionsrichtung höhere Zugkräfte als die Folie F2. Bei den Kräften quer zur Extrusionsrichtung wies die Folie F2 jedoch vergleichbare Maximalkräfte auf. Diese Festigkeitsunterschiede könnten beim Abzug der Folien aus dem Extrusionswerkzeug im Herstellungsprozess entstehen. Hier kann die Folie in die Abzugsrichtung verstreckt werden, was zu einer Ausrichtung der Makromoleküle führen kann. Diese gerichteten Bereiche zeigen in Zugrichtung etwas höhere mechanische Eigenschaften auf und hängen im Wesentlichen von den Verarbeitungsparametern ab. Zudem besitzen die einzelnen Folien einen unterschiedlichen Folienlaminataufbau.

Der relativ geringe Maximalkraftunterschied bei den Folien F1 und F3 sowie die Tatsache, dass bei Folie F2 die Kraft quer zur Extrusionsrichtung höher ist als die in Extrusionsrichtung, kann in den unterschiedlichen Aluminiumschichten im Folienverbund liegen. Für

nachfolgende Untersuchungen wurden Paneelen mit Folie F1 und F3 verwendet. Anschließend wurden die unterschiedlichen Paneele, deren Kerne sowie die geschweißten Folienhüllen separat geprüft. Die Entnahme der kompletten Kerne für die Prüfung erfolgte durch seitliches Aufschneiden der Paneele. So konnte der reine Kern sowie die geschweißte Folienhülle getrennt für die Versuche verwendet werden. In Abbildung 20 sind Paneele mit einem PUR-Standard als Kernmaterial sowie die Folie F1 als Außenhülle zu sehen.



Abbildung 20: Eingespanntes Paneel links, Kernmaterial Mitte und Folienhülle rechts

Nach 24-stündiger Normklimalagerung (23 °C, 50 % rel. F) folgte die Prüfung in Anlehnung an die DIN EN ISO 527-3. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 10 mm/min. In Abbildung 20 sind die eingespannten Probekörper der Bestandteile eines PUR-Standard Paneels zu sehen.

Ein Problem bei der Durchführung der Zugversuche stellte das Einspannen der Paneele dar. Es mussten Spannbacken in der ausreichenden Breite und Spannkraft verwendet werden. Hier kamen hydraulische Spannklemmen zum Einsatz. Diese brachten die notwendige Kraft auf, so dass ein Herausrutschen der Probekörper verhindert wurde. Zudem verhinderten die hydraulischen Spannbacken durch ihre spezielle Beschichtung ein Beschädigen der Paneele.

Die folgende Abbildung 21 zeigt Maximalkräfte der unterschiedlichen Paneele (grüner Balken) und ihrer Einzelkomponenten Schaumkern (roter Balken) und Folienhülle (blauer Balken). Alle Ergebnisse in Abbildung 21 beziehen sich dabei auf die Folie F1. Vom Silica-Pulver Paneel sind die Maximalkräfte des Kerns nicht aufgetragen, da dieser aus einer losen Pulverschüttung besteht, an der kein Zugversuch gemacht werden konnte.

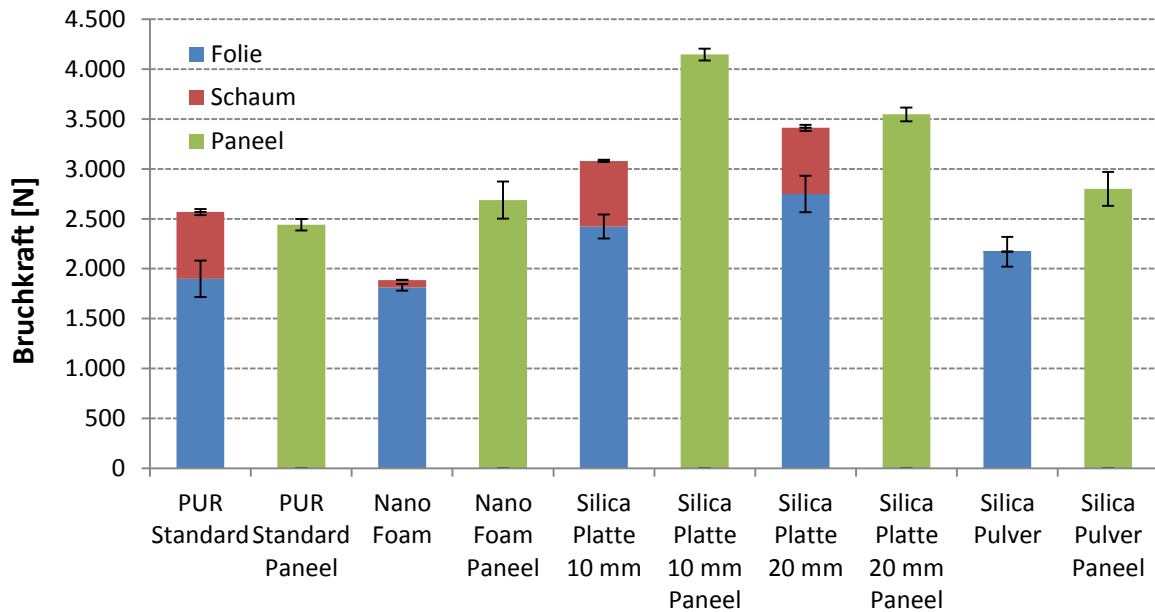


Abbildung 21: Bruchkräfte der Folie F1, Kernmaterial und der Paneele

Zu erkennen ist, dass beim PUR-Standard Paneel die Summe der Kräfte aus Folie F1 und Kernmaterialien nahezu gleich hoch ist wie die des Paneels. Bei den Silica-Platte Paneelen 10 mm und 20 mm hingegen sind die Kräfte des kompletten Paneels größer als die der einzelnen Komponenten, was an den unterschiedlichen Kernmaterialien liegen kann. Die Kernmaterialien können sich bezüglich der Maximalkraft im Verbund des Paneels anders verhalten als voneinander getrennt. Auch die Anzahl der Fließlagen bei den Silica-Platten Paneelen 10 mm und 20 mm kann einen Einfluss auf die Festigkeit haben. Die Bruchbilder zeigten, dass alle Paneele in der Schweißnaht, die quer zur Zugrichtung in der Mitte der Paneele liegt, gerissen sind. In Abbildung 22 ist das Bruchbild eines Silica-Platte Paneels nach dem Kurzzeitzugversuch dargestellt. Die Untersuchungen der Schweißnaht folgen in Kapitel 4.4.3.



Abbildung 22: Silica-Platte Paneel nach dem Kurzzeitzugversuch

4.4.2 Kurzzeitzugversuch der gesiegelten Folien

Um Informationen über Schwachstellen hinsichtlich einer Belüftung der Paneele zu erhalten, wurden die Schweißnähte der hergestellten Paneele im Kurzzeitzugversuch geprüft. Zudem wurden aus den unterschiedlichen Ausgangsfolien Siegelverbindungen hergestellt und mit den Siegelnähten der bei va-Q-tec gefertigten Paneele (DIN A5) im Kurzzeitzugversuch verglichen. Die Herstellung der Siegelnähte erfolgte mittels zweier Schweißverfahren, dem Wärmekontaktsiegeln (WK) und dem Ultraschallsiegeln (US). Beide Verfahren zeichnen sich bei Standardfolien durch kurze Zykluszeiten und hohe Siegelnahtfestigkeiten aus. Es wurden Folienstücke von 100 x 100 mm ausgestanzt und diese mit beiden Foliensiegelverfahren in und quer zur Extrusionsrichtung gesiegelt. Beim Ultraschallsiegeln wurde eine Siegelkraft von 200 N verwendet. Die Schweißamplitude betrug 25 µm und die Siegelzeit 0,9 Sekunden. Beim Wärmekontaktsiegeln lag die Backtemperatur bei der Folie F1 bei 140 °C und bei den Folie F3 bei 160 °C. Die Siegelzeit lag bei allen Folien bei 2 Sekunden und der Siegeldruck betrug 0,28 MPa. Anschließend wurden Folienstreifen mit einer Breite von 20 mm ausgestanzt und bei Normklima (23°C, 50 % rel. F) für 24 Stunden ausgelagert. Die Folienstreifen wurden danach in die Universalzugprüfmaschine Zwick Z010 eingespannt und geprüft. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 100 mm/min. Es wurden mindestens sechs Probekörper pro Material geprüft. In Abbildung 23 sind die maximalen Bruchkräfte der geschweißten Probekörper mit Folie F1 dargestellt. Die Ergebnisse der Ausgangsfolien sind

mit GM (für Grundmaterial), die der Siegelnaht aus Silica-Platte Paneelen mit SN (für Siegelnaht) abgekürzt.

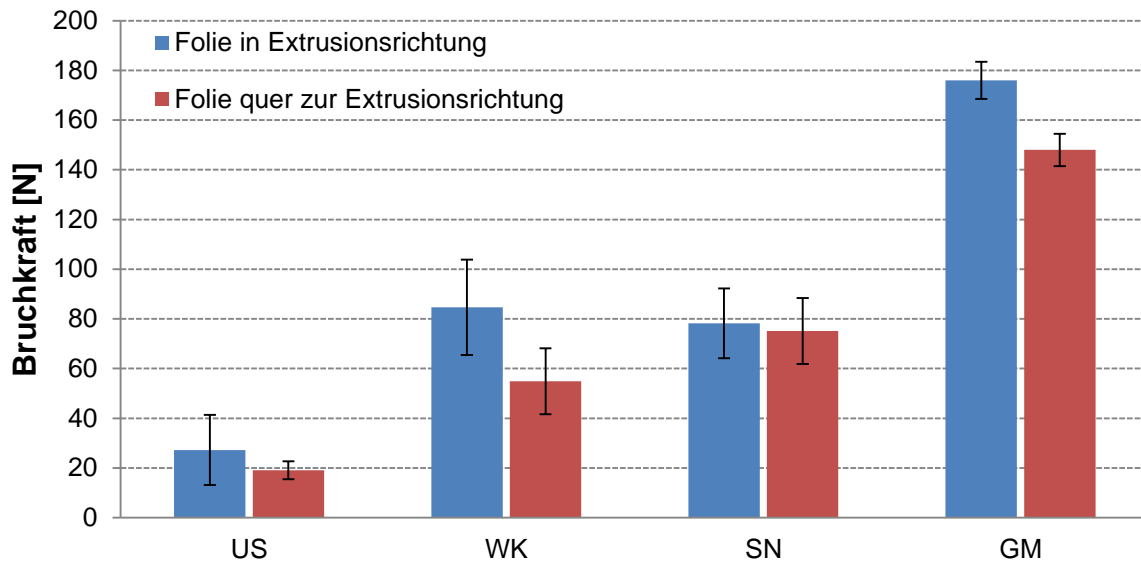


Abbildung 23: Bruchkräfte der geschweißten Folien und der Ausgangsfolie

Ein ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Foliensiegelverfahren (US und WK) links im Bild zu erkennen. Während bei den US- gesiegelten Probekörpern die Bruchkräfte nur ca. 30 N betragen, besaßen die WK- gesiegelten Probekörper mindestens doppelt so hohe Bruchkräfte. Der Vergleich zwischen den Siegelnähten aus den Paneelen und den WK- gesiegelten Probekörpern in Extrusionsrichtung zeigt ähnliche Werte. Die bei der va-Q-tec hergestellte Paneele wurden daher mit optimalen Siegelparametern im WK- Siegelverfahren hergestellt. Im Vergleich zu den Bruchkräften des Grundmaterials liegen die Bruchkräfte aller Siegelnähte deutlich darunter. Die ausgestanzten Probekörper der Folie in Extrusionsrichtung können mehr Kraft aufnehmen als solche quer zur Extrusionsrichtung. Die kann an Orientierungseinflüssen im Folienlaminataufbau liegen. Die Folien F3 zeigt ein ähnliches Verhalten.

4.4.3 Kurzzeitzugversuch der unterschiedlich liegenden Siegelnähte

Für weitere Untersuchungen wurden Paneele mit einer Siegelnaht, längs und quer zur Zugbeanspruchung verglichen. In Abbildung 24 sind die Paneele mit den unterschiedlichen Siegelnähten zu sehen.



Abbildung 24: Längs zur Zugbeanspruchung liegende Siegelnaht (Naht längs) links im Bild und quer zur Zugbeanspruchung liegende Siegelnaht (Naht quer) rechts im Bild

Hierbei sollte der Einfluss der Lage der Schweißnaht im Kurzzeitzugversuch untersucht werden. Es wurden vier Proben je Paneeltyp geprüft. In Abbildung 25 sind exemplarisch die maximalen Bruchkräfte von Silica-Platte 20 mm Paneelen der Folie F1 dargestellt.

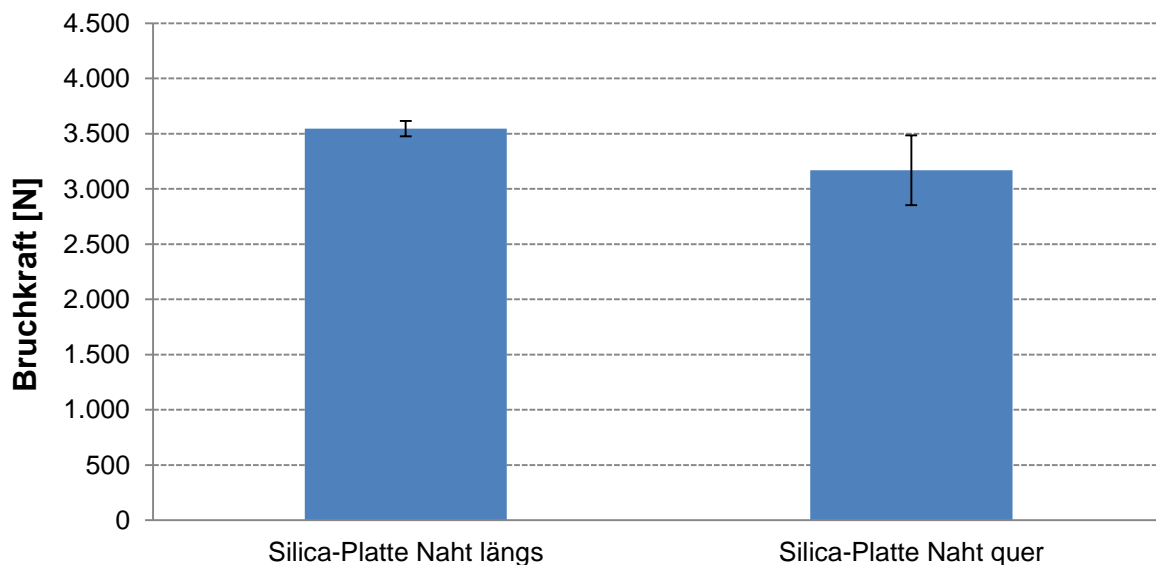


Abbildung 25: Bruchkräfte der Paneele mit Folie F1 mit Schweißnaht längs und quer zur Zugrichtung

Unterschiede bei den Bruchkräften der Paneele sind in dem dargestellten Diagramm durch die Lage der Schweißnaht bedingt. Die Schweißnaht stellt einen gefährdeten Bereich bei solchen Beanspruchungsarten dar. Nach Möglichkeit muss deswegen das Gesamtpaneel so konstruiert werden, dass die Schweißnaht in den realen Anwendungen in weniger bzw. geringer belastete Bereiche verschoben wird. Im weiteren Projektverlauf wurden die Siegelnähte der Paneele an die Längskanten der Paneele verlegt. Abbildung 26 zeigt beispielhaft ein solches Paneel mit den seitlichen Siegelnähten.



Abbildung 26: Seitliche Siegelnaht am Paneel

4.4.4 Technologischer Biegeversuch der Paneele

Zur weiteren mechanischen Analyse der Paneele wurde der Biegeversuch in Anlehnung an die DIN EN ISO 178 eingesetzt. Der Auflagerabstand betrug dabei 160 mm. Der Durchmesser der Auflagerstempel und der Druckfinne betrug 12 mm. Die Prüfungsgeschwindigkeit lag bei 20 mm/min. Die Paneele wurden während der Prüfungen sowohl im Druck- als auch im Zugbereich geprüft. Es wurden mindestens vier Probekörper pro Paneel geprüft. In Abbildung 27 ist die Prüfung im Anfangszustand (links) und während der Belastung des Panels (rechts) zu sehen.



Abbildung 27: Biegeversuch eines Silica-Platte Panels in Anlehnung an die DIN EN ISO 178 (links vor und rechts während der Belastung)

Als Versagenskriterium bei dieser Prüfung wurde das Zerstören (Belüften, Verlust des Vakuums) der Paneele definiert. Die Paneele wurden dafür nach der Prüfung visuell bewertet. Weiterhin wurden die Paneele mittels va-Q-check Messgerät direkt nach der Biegeprüfung ausgelesen und so der Gasinnendruck bestimmt. Kein Paneel wurde bei der Prüfung so zerstört, dass ein Verlust des Vakuums unmittelbar nach der Prüfung eintrat. Bei den Paneelen stellte sich die Verformung teilweise zurück. Es blieb allerdings immer eine Restverformung der Paneele (Abbildung 28). Der maximale Verfahrweg des Auflagestempels wurde bei den durchgeführten Biegeprüfungen stets erreicht.

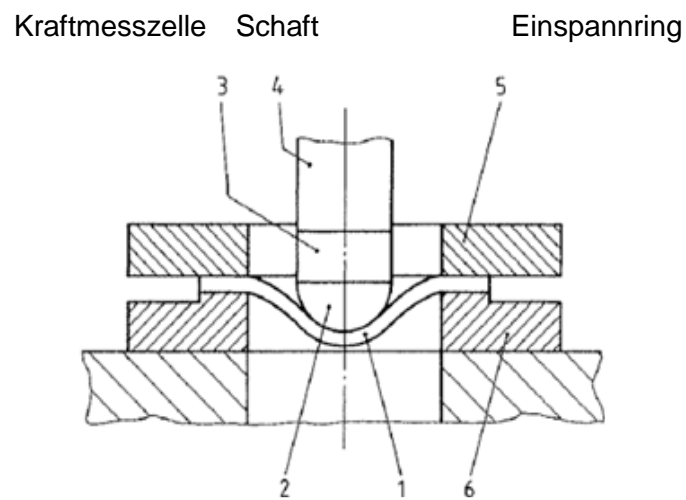


Abbildung 28: Bleibende Verformung des Silica-Platte Panels nach dem Biegeversuch

4.4.5 Bestimmung des Stoßverhaltens der Paneele

Um eine weitere Aussage über die Festigkeit und den Aufbau der Paneele zu erlangen, wurden Versuche in Anlehnung an die DIN EN ISO 6603-1 (Bestimmung des Stoßverhaltens von Kunststoffen) durchgeführt. Hierzu wurde das Paneel zwischen zwei Stahlplatten mit einer definierten Bohrung eingespannt. Anschließend wurde die Schädigungsarbeit bestimmt, indem die Paneele durch einen senkrecht fallenden Stoßkörper beansprucht

wurden. So wurde die Durchstoßenergie in Joule [J] und die Höchstkraft in Kilonewton [kN] ermittelt. Abbildung 29 zeigt schematisch die Einspannvorrichtung mit Probekörper sowie den halbkugelförmigen Stoßkörper. Es wurden mindestens drei Paneele pro Paneeltyp geprüft. Die Silica-Pulver Paneele wurden wegen ihres Aufbaus, der aus einer losen Pulverschüttung besteht, nicht geprüft, um die Verunreinigung der empfindlichen Prüfeinrichtung zu vermeiden.



Halbkugelförmiger Stoßkörper Probekörper Probekörperauflage

Abbildung 29: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus [DIN EN ISO6603-1]

Die Ergebnisse der Durchstoßprüfungen fasst die Abbildung 30 zusammen.

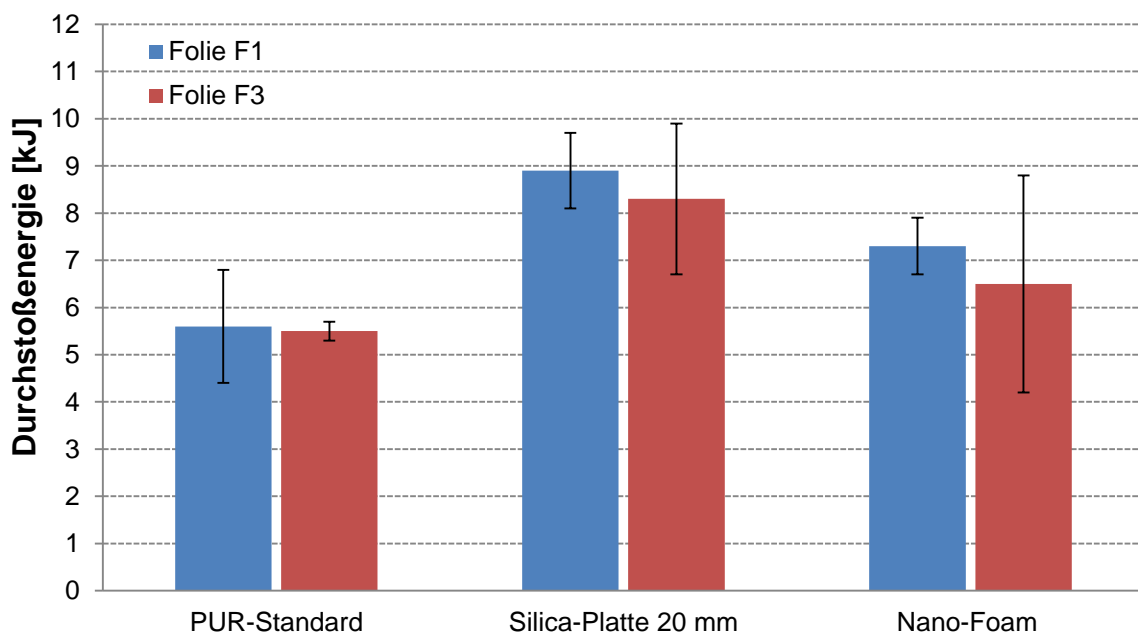


Abbildung 30: Durchstoßenergie der Paneele

Es sind durchaus stärkere Unterschiede bei der Durchstoßenergie der Paneeltypen zu erkennen. Während Silica-Platte Paneele am meisten Energie absorbieren können, liegen die PUR-Standard Paneele in ihrer Durchstoßenergie um etwa ein Drittel darunter. Die Nano-Foam Paneele liegen etwa zwischen den anderen beiden Paneelen. Die Messungen sind allerdings zum Teil mit relativ großen Standardabweichungen behaftet. Die hohe Energieaufnahme der Silica-Platte Paneele kann an dem Aufbau des Kernmaterials liegen, der deutlich mehr Energie aufnehmen kann. Die Dichte der Silica-Platte Paneele liegt dabei um bis zu Faktor 3 höher als die der PUR-Standard und Nano-Foam Paneele. Abbildung 31 zeigt PUR-Standard Paneele nach der Durchstoßprüfung. Links ist die Unterseite, rechts die Oberseite nach der Prüfung eines PUR-Standard Paneels zu sehen.



Abbildung 31: Unterseite links und Oberseite rechts eines PUR-Standard Paneels nach der Prüfung

4.4.6 Wärmeverbehandlung zur Haftung der Folie an den Kern

In einigen Vorversuchen wurde festgestellt, dass ein „Aufschrumpfen“ der Folie auf den festen PU-Kern der Paneele (PUR-Standard und Nano-Foam) zu einer Verbesserung von mechanischen Eigenschaften führen kann. Dies wird durch eine Haftung der beiden Komponenten (Hüllfolie und Kern) erreicht werden. Zur Verbesserung dieser Haftung wurden Versuche zur Wärmeverbehandlung an den Paneelen vorgenommen. Hierzu wurden die Paneele in einen Wärmeofen / Klimakammer ausgelagert, mit dem Ziel die Siegelschicht in einen schmelzeähnlichen Zustand zu überführen. Da im Inneren des Paneels ein Unterdruck

herrscht, kann die Hüllfolie auf den Kern aufschmelzen und sich mit ihm verbinden. Abbildung 32 zeigt eine Klimakammer in der die Paneele ausgelagert wurden.



Abbildung 32: Klimakammer zur Auslagerung

Bei den Versuchen wurden die Auslagerungstemperaturen sowie die Auslagerungsdauer variiert. Die Temperaturen lagen im Bereich zwischen 120 °C und 160 °C. Die Auslagerungszeiten lagen im Bereich zwischen 3 und 5 Minuten. Hier sollte durch gezielte Wärmeeinbringung die innenliegende Polyolefinschicht an den Kern durch Anschmelzen anhaften. Die unterschiedlich ausgelagerten Paneele wurden anschließend optisch auf Verzug und Verformung sowie Maßhaltigkeit bewertet. Abbildung 33 zeigt links ein unvorbehandeltes Paneel und rechts wärmevorbehandeltes Paneel.



Abbildung 33: Unvorbehandeltes Paneel links und wärmevorbehandeltes Paneel rechts

Weiterhin wurde der Gasinnendruck der Paneele vor und nach (Wartezeit drei Tage) der Wärmeverbehandlung mit dem va-Q-check Sensor gemessen. Aus umfangreichen Untersuchungen ergab sich eine Auslagerungstemperatur 140°C bei einer Dauer von 3 min als günstigste Parameterkombination. Die weiteren Paneele wurden daher bei 140°C für 3 min in einer Klimakammer ausgelagert.

Zur Beurteilung der Haftung der aufgeschrumpften Folie auf den Kern wurde der Kurzzeitzugversuch in Anlehnung an die DIN EN 1607 (Zugeigenschaften senkrecht zur Plattenebene) gewählt. Hierzu wurden speziell Paneele mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 20 mm von der Fa. va-Q-tec hergestellt. Es wurden Paneele mit dem Kernmaterialien PUR-Standard, Nano-Foam sowie PUR-Standard optim. in Kombination mit den Folien F1 und F3 hergestellt und geprüft. Vor den Prüfungen mussten die Paneele beidseitig mit Aluminiumplatten (als Vorbereitung für einen Zugversuch) verklebt werden. Zum Verbinden der Paneele mit den Aluminium-Platten wurde der silanmodifizierter 2K-SE Polymerklebstoff 690.00 von der Fa. Jowat verwendet. Die Oberfläche der Paneele wurde mit einem sauberen Tuch, getränkt in Isopropanol, abgewischt. Auf diese Weise konnten partielle Verunreinigungen, Produktionsablagerungen, Fingerabdrücke etc. entfernt und eine gute Haftung des Klebstoffes an der Paneele-Oberfläche gewährleistet werden. Die so vorbereiteten Paneele konnten nun auf die ebenfalls gereinigten Aluminiumplatten geklebt werden. Hierzu wurde auf einen ausreichend Dicken (1 mm) und homogenen Klebstoffauftrag, der mittels pneumatisch betriebener Auftragspistole realisiert wird, geachtet. Nach dem Auftragen wurde der Klebstoff mit einem Spachtel gleichmäßig auf der Oberfläche der Paneele verstrichen. Für eine reproduzierbare Klebung wurden dabei die Paneele und die Aluminiumplatten immer eingespannt. Ein definiertes Auflagergewicht wurde bis zum vollständigen Aushärten des Klebstoffes auf die geklebten Probekörper aufgebracht. Die Aluminiumplatten wurden von beiden Seiten auf das Paneel aufgeklebt. In Abbildung 34 rechts ist der Aufbau des verklebten Sandwiches zu sehen.

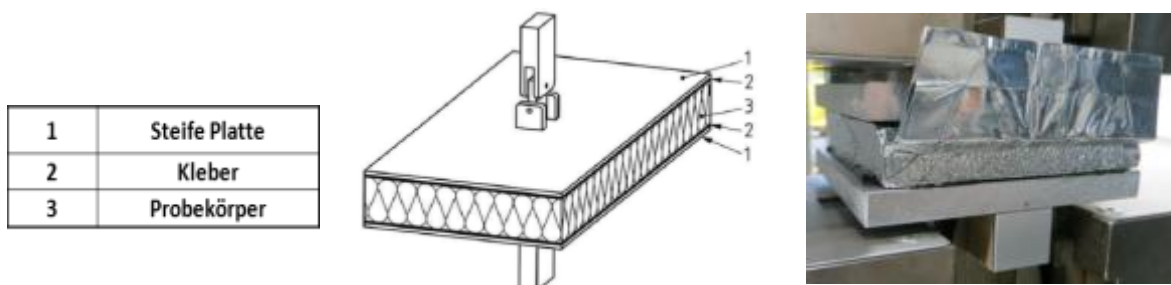


Abbildung 34: Schematische Darstellung der Einspannsituation links und verklebtes Paneel rechts [DIN EN 1607]

Zum Vergleich der wärmeverbehandelten, „aufgeschrumpften“ Paneele und herkömmlich hergestellter, nicht thermisch vorbehandelter Paneele, wurden an diesen einer Zugprüfung durchgeführt. Eine Normklimalagerung (23°C, 50 % rel. F) von 24 Stunden ging dem voraus.

Die Prüfgeschwindigkeit bei der Zugprüfung betrug 10 mm/min. Es wurden mindestens zwei Probekörper pro geklebtes Paneel geprüft. Abbildung 35 stellt die Ergebnisse der Zugprüfungen zusammen. Die Ergebnisse der optimierten Rezeptur werden im Diagramm rechts vorgestellt. Da nur wenig Probematerial bei den PUR-Standard opti. Paneelen zur Verfügung stand, wurden diese nur thermisch vorbehandelt verwendet.

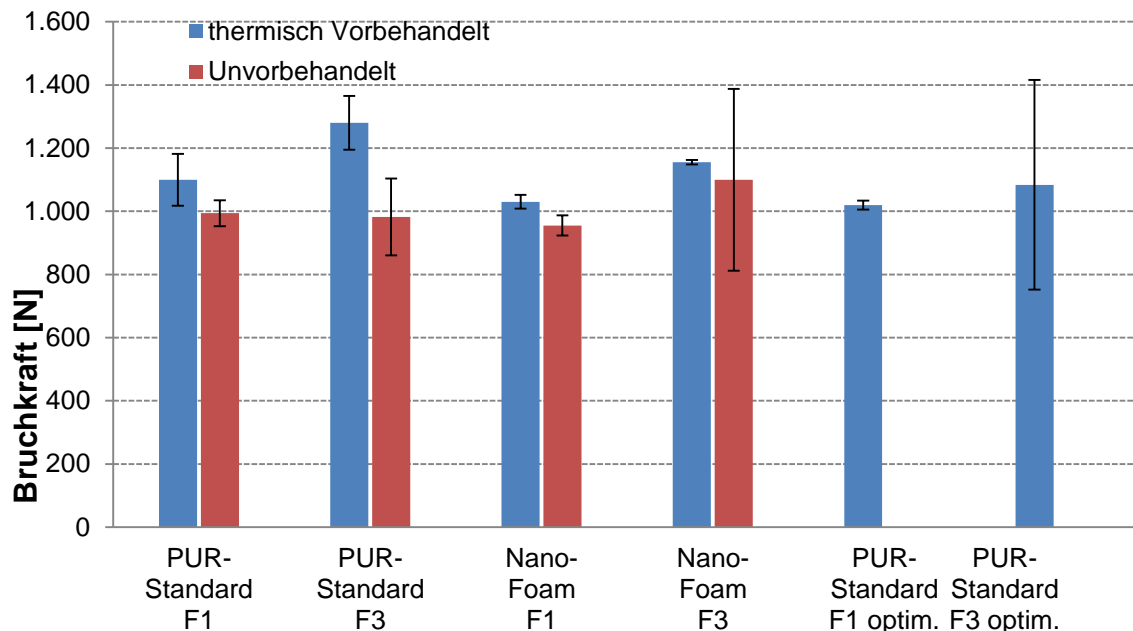


Abbildung 35: Bruchkräfte der wärmevorbehandelten, verklebten Paneele

Die erreichten Abzugskräfte lagen bei PUR-Standard mit Folie 1 und Folie 3 wärmevorbehandelt etwas höher als ohne Vorbehandlung. Dies war ebenfalls bei den Nano-Foam Paneelen zu erkennen.

Bei dem rezepturoptimierten PUR-Standard Paneelen waren die Abzugskräfte bei Folie 3 etwas höher. Die Messergebnisse waren allerdings mit einer hohen Standardabweichung aufgrund geringer Probekörperanzahl behaftet, die eine Aussage nur bedingt zulässt. Die Paneele waren nach optischer Beurteilung noch intakt. Messungen mittels va-Q-check Sensoren waren aufgrund von Klebstoffresten auf der Oberfläche der Paneele nicht möglich. Abbildung 36 zeigt ein geprüftes, wärmebehandeltes PUR-Standard Paneel nach dem Zugversuch.

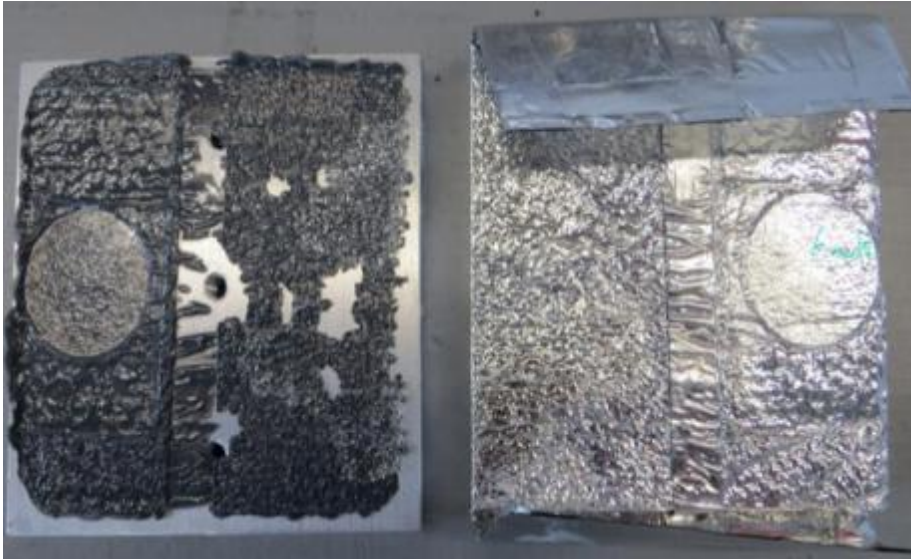


Abbildung 36: Aluminiumplatte links und geprüftes PUR-Standard Paneel rechts nach dem Abzugsversuch

Die Bruchfläche zeigt ein adhäsives Bruchverhalten. Der Klebstoff löste sich vollständig vom Paneel ab. So konnte keine Aussage über das Haftverhalten des Kerns an die Hüllfolie der thermisch vorbehandelten Paneele vorgenommen werden. Daher wurden erneut Zugversuche an den verklebten Paneelen vorgenommen. Unterschied zu dem oben gezeigten Versuchsaufbau war ein seitliches Aufschneiden der Paneele und damit ein Belüften der Paneele. Abbildung 37 zeigt ein PUR-Standard Paneel, dass seitlich aufgeschnitten wurde.



Abbildung 37: PUR-Standard Paneel, dass seitlich aufgeschnitten wurde

In Abbildung 38 sind Bruchbilder der thermisch vorbehandelten und seitlich aufgeschnittenen Nano-Foam und PUR-Standard Paneel nach der Zugprüfung zu sehen.



Abbildung 38: Ober- und Unterseite seitlich aufgeschnittener Nano-Foam links und PUR-Standard Paneele rechts nach der Zugprüfung

Es war kein Ablösen im Kernmaterials PUR-Standard (rechts im Bild) von der Hüllfolie zu erkennen. Der PUR-Standard Kern ist in seiner Schaumstruktur gebrochen. Das Kernmaterial PUR-Standard haftet an der Ober- bzw. Unterseite des Paneels. Beim Nano-Foam Paneel (links im Bild) war zu erkennen, dass das Kernmaterial nur teilweise an der Hüllfolie angehaftet blieb. Große Teile des Kernmaterials Nano-Foam wurden beim Zugversuch von der Hüllfolie abgelöst.

Die Untersuchungen zeigten, dass es bei den Paneelen mit PU-Kern durch eine thermische Behandlung möglich ist, die Hüllfolie auf den Kern im Schmelzzustand aufzuschrumpfen und einen mechanischen festen Verbund herzustellen. Bei Nano-Foam Paneelen war dieser Effekt weniger deutlich festzustellen. Die Verbundeigenschaften zwischen Kern und Hüllfolie konnten so nach einer thermischen Behandlung erhöht werden.

Bei den PUR-Standard opti. Paneelen in Kombination der Folien F1 und F3 konnten keine messbaren Haftungsverbesserungen beobachtet werden. Daher wurde die Rezepturmodifikation im Projektverlauf nicht weiter verfolgt. Für den weiteren Projektverlauf wurden daher in Abstimmung mit den Projektpartnern die PUR-Standard und Nano-Foam Paneele mittels Wärme vorbehandelt.

4.5 Klebeignung der Folien sowie einer möglichen Vorbehandlung

Um die Klebeignung der Folien zu untersuchen, wurden Folien untereinander sowie mit Aluminiumblech verklebt. Des Weiteren wurden unterschiedliche Vorbehandlungsmethoden wie z.B. Atmosphärendruck-Plasma (ADP) sowie Coronavorbehandlung an den Folien angewandt. Geprüft wurden die Klebungen in Anlehnung an die DIN EN 1465 (Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen).

4.5.1 Klebeignung der Folien

Es wurden Folienstreifen mit einer Fläche von 100 mm x 24 mm ausgestanzt. Die Folienoberflächen wurden mit einem sauberen Tuch, das mit einem geeigneten organischen Lösemittel (Isopropanol) getränkt wurde, abgewischt. Auf diese Weise ließen sich partielle Verunreinigungen, wie z.B. Produktionsablagerungen, Fingerabdrücke etc. entfernen. Nach ausreichendem Ablüften wurden die so vorbereitete Folien- und Aluminiumstreifen dann überlappend miteinander (Folie zu Folie) sowie mit Aluminiumblech (Folie zu Aluminiumblech) in einer Einspannvorrichtung miteinander verklebt. Abbildung 39 zeigt schematisch die Überlappklebung im Schnitt.

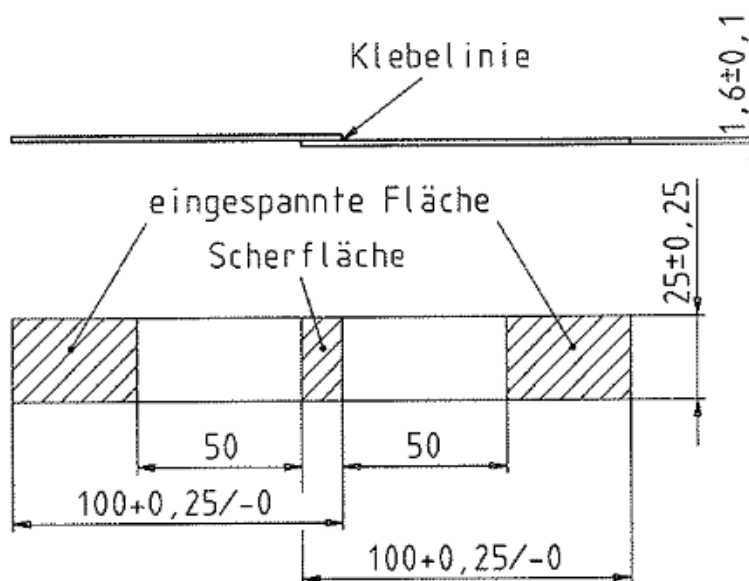


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Überlappklebung sowie die Abmessungen eines genormten Zugscherprüfkörpers nach 1465 [DIN EN 1465]

Hierzu wurde auf einen ausreichend dicken (0,3 mm) und homogenen Klebstoffauftrag, der mittels pneumatisch betriebener Auftragspistole realisiert wurde, geachtet. Bei diesem pneumatischen Auftrag wurde der Klebstoff durch eine Mischdüse, die beim Auftragen an die Klebstoffkartusche geschraubt wird, gepresst. Für eine reproduzierbare Klebung wurden die Folien und die Aluminiumplatten in eine Einspannvorrichtung eingespannt und mit einem definierten Auflagergewicht über 24 Std. verklebt. Die Klebefläche A betrug 20 x 25 mm. Bei den Klebstoffen handelte es sich um Klebstoffe, die sehr flexibel und elastisch sind. Die

Vorauswahl des Klebstoffes erfolgte nach Kriterien wie Klebbarkeit auf Kunststoffe und Metall sowie kurze Aushärtezeit. Die verwendeten Klebstoffe waren: Jowat 2K-SE Polymer 690.00, Teroson 8597 HMLC, Otto Coll 2K S610 und UHU Ultra Montageklebstoff. Abbildung 40 zeigt die Einspannvorrichtung mit verklebten Folien-Folie Probekörpern.

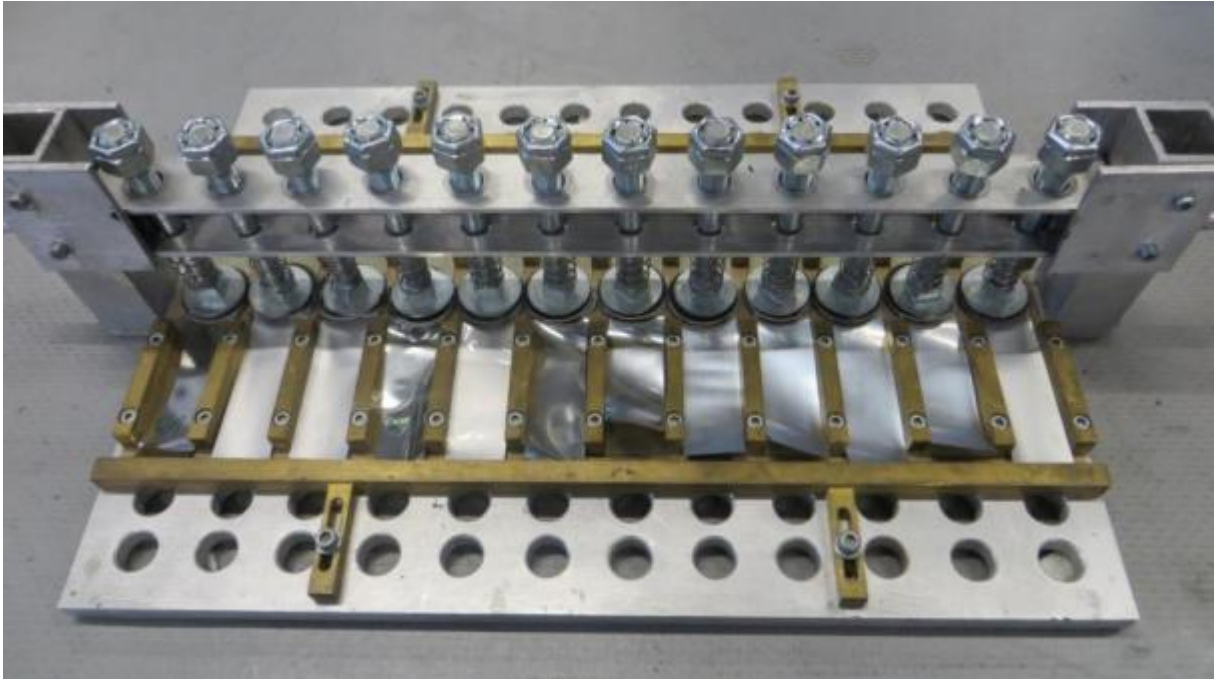


Abbildung 40: Vorrichtung mit eingespannten Klebprobekörpern

4.5.2 Bestimmung der Zugscherfestigkeit der Überlappungsklebungen

Zur Beurteilung der Klebstoffhaftung sowie der mechanischen Eigenschaften der Klebeverbindung wurden die geklebten Probekörper nach DIN EN 1465 geprüft. Diese wurden für 24 Stunden bei Normklima (23 °C, 50 % rel. F) ausgelagert und anschließend geprüft. Die Prüfgeschwindigkeit betrug dabei 100 mm/min. So wurden mindestens zwei Probekörper pro Folie und Klebstoff gezogen. Abbildung 41 zeigt die maximalen Zugscherfestigkeiten der Folie-Folie Klebungen.

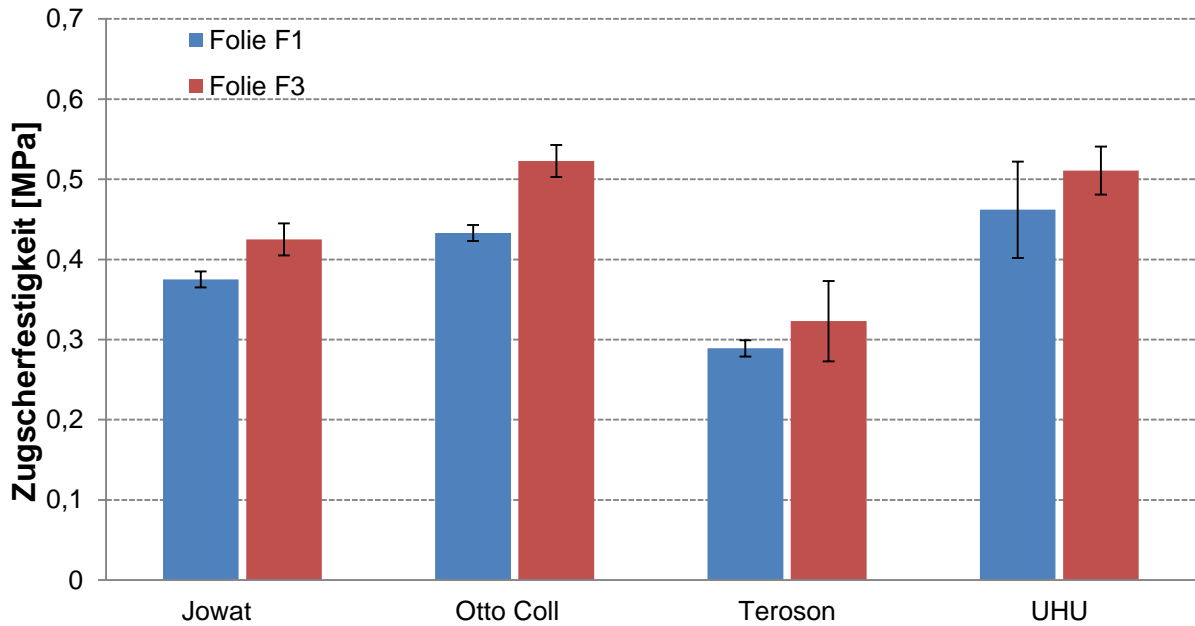


Abbildung 41: Zugscherfestigkeiten der Folie-Folie Klebungen

In Abbildung 42 sind die maximalen Zugscherfestigkeiten der Folie-Metall Klebungen zusammengefasst.

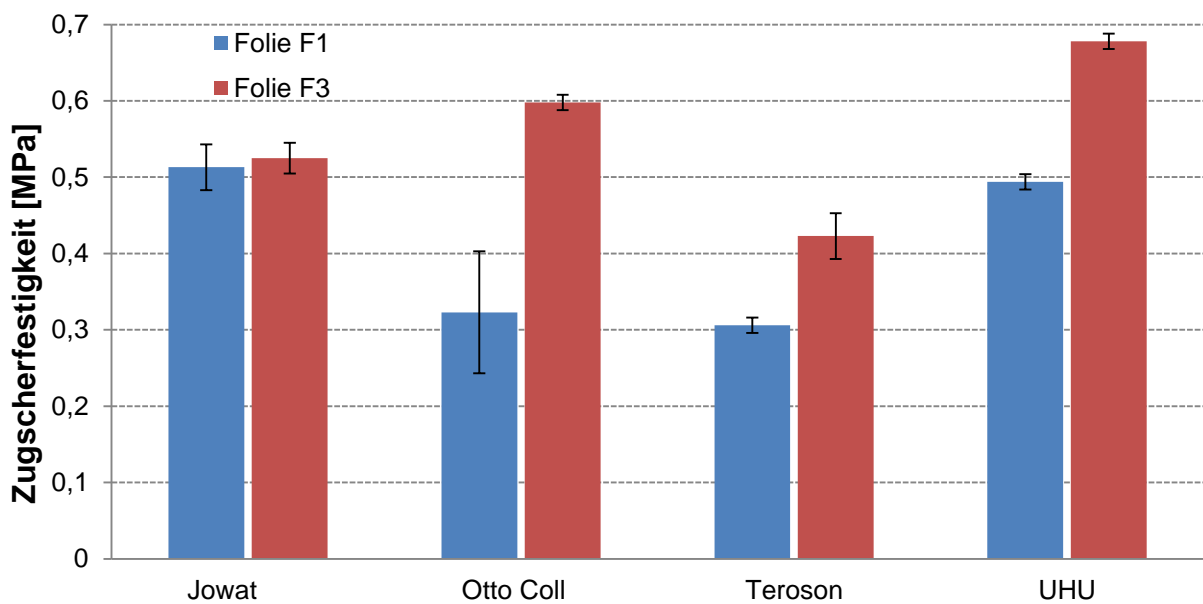


Abbildung 42: Zugscherfestigkeiten der Folie-Metall Klebungen

Während sich die Zugscherfestigkeiten der Folie-Folie Klebungen im Bereich zwischen ca. 0,3 bis 0,5 MPa mit wenig unterschiedlichen Festigkeitswerten zwischen den einzelnen Folien bewegten (Abb. 41), gab es bei den Klebungen Metall-Folie deutlich stärkere Unterschiede (Abb. 42). Die Verbunde mit der Folie F3 zeigten im Allgemeinen leicht höhere Zugscherfestigkeiten bei allen Klebstoffen, als die mit Folie F1. Die Bruchbilduntersuchung nach DIN EN ISO 10365 für Folie-Folie Klebungen weist ein Bruch im Grundmaterial bzw.

Substratbruch (SF) auf. Die leichten Unterschiede in den Festigkeiten zwischen Folien F1 und F3 können durch die unterschiedliche Festigkeiten der Grundmaterialien erklärt werden. Die unterschiedlichen Werte der Verbundfestigkeiten sind auf die verschiedenen Klebstofffestigkeiten sowie sich daraus ergebende unterschiedliche Spannungsverteilungen (hervorgerufen durch verschiedene Querkontraktionen während der Prüfung) in einer Klebeverbindung zurückzuführen. Die Standardabweichungen lagen für alle Zugscherfestigkeiten in ähnlicher Größenordnung.

Die Zugscherfestigkeiten der Folie-Metall Klebungen lagen im Bereich zwischen ca. 0,3 bis 0,65 MPa. Hier hat die Folie F3 etwas bessere Haftungseigenschaften gezeigt, was sich auch in ihrer Zugscherfestigkeit für alle Klebstoffe widerspiegelt. Die Bruchuntersuchungen der Klebungen nach DIN EN ISO 10365 mit Folie F3 zeigte durchgehend ein Bruch im Substrat (SF). Die Folie F1 zeigte mit den Klebstoffen Otto Coll und Teroson Adhäsionsbrüche (AF), was sich in etwas geringeren Festigkeiten der Verbindung widerspiegelt (Abbildung 42). Dieses Verhalten lässt sich ebenso durch eine sich ändernde Spannungsverteilung in der Fügeebene sowie eine verhinderte Querkontraktion (durch steife Substrate) erklären. Zur Verbesserung der Adhäsion wurden die Oberflächenvorbehandlungsverfahren eingesetzt.

So haben bezüglich der Klebstoffauswahl, die Klebstoffe Jowat 690.00 und UHU bei beiden Folien etwas höhere Festigkeiten gezeigt. Der Bruch erfolgte dabei bei Folie-Folie sowie Folie-Metall Klebungen in der Folie direkt neben der Klebestelle. Die ermittelten Festigkeitswerte stellen für diese Untersuchungen nur die Mindestkräfte der Klebeverbindung dar. Die Bruchbildbeurteilung für diese Untersuchungen werden zusammen mit den optimierten Klebeverbindungen im Kapitel 4.5.3 exemplarisch vorgestellt.

4.5.3 Erhöhung der Oberflächenenergie durch Vorbehandlung

Um eine Erhöhung der OFE mit dem Ziel die Adhäsion sowie die resultierende Haftung zu verbessern (insbesondere für den Einsatz der Klebstoffe Otto Coll und Teroson in Verbindung mit Metallverklebungen) wurden die Folienaußenseiten mittels Atmosphärendruckplasma (ADP) und Corona Vorbehandlung modifiziert. Bei diesen Verfahren wird durch Hochspannungsentladung ein Lichtbogen erzeugt. Durch Vorbeiströmen des Prozessgases (z.B. Druckluft) wird um diese Entladung ein Plasma erzeugt. Dieses Plasma gelangt anschließend durch einen Düsenkopf auf die Oberfläche zur Behandlung des Materials.

Für die Beurteilung der Vorbehandlungsmethoden wurden wie in Kapitel 4.3.5 Folienstreifen vorbehandelt und miteinander verklebt. Die Oberfläche kam bei der Vorbehandlung nur sehr kurz (ca. 2-3 Sekunden) mit dem Plasma in Kontakt. Der Abstand der Düse zur Folienoberfläche betrug dabei 12 mm. Die Oberflächenvorbehandlung im Rahmen des

Forschungsvorhabens erfolgte mit einem PG 5000 Gerät der Firma Plasmatrete GmbH mit einer Openair® Plasma-Rotationsdüse RD 1004. Die Vorbehandlungsgeschwindigkeit, mit der die Rotationsdüse über die Probekörper verfuhr, betrug ca. 600 mm/min. Die Düse war auf einer Lineareinheit montiert, so dass eine gleichmäßige Vorbehandlungsdauer und Verfahrensgeschwindigkeit der Rotationsdüse gewährleistet werden konnte. Abbildung 43 zeigt die Rotationsdüse während einer Vorbehandlung.



Abbildung 43: Rotationsdüse der Atmosphärendruckplasmaanlage

Die eingesetzte Corona-Anlage Arcojet® PG051 der Fa. Arcotec GmbH hatte eine Leistung von 400 Watt, die auf eine Fläche von ca. 20 x 50 mm abgestrahlt wird. Die Corona-Entladung erfolgte als charakteristisch leuchtende Hochspannungsentladung bei einer Wechselspannung von etwa 10 bis 20 kV und Frequenzen von 21 kHz. Die Einstellung der Prozessparameter Zeit, Düsenabstand und Verfahrensgeschwindigkeit erfolgte analog einer Plasmavorbehandlung mit einer CNC-Lineareinheit.

Aufgrund der Metallschichten in den Folienlaminaten und deren damit verbundenen Leitfähigkeit wird der erzeugte Lichtbogen von der Fläche abgeleitet. So konnte keine Vorbehandlung mittels Corona erzielt werden.

Zur Beurteilung der Vorbehandlung wurden die Probekörper in Anlehnung an DIN EN 1465 geprüft. Diese wurden für 24 Stunden bei Normklima (23 °C, 50 % rel. F) ausgelagert und anschließend gezogen. Die Prüfgeschwindigkeit betrug dabei 100 mm/min. So wurden mindestens zwei Probekörper pro Folie und Klebstoff geprüft. Abbildung 44 zeigt die ermittelten Zugscherfestigkeiten unvorhandelter und vorbehandelter Klebproben.

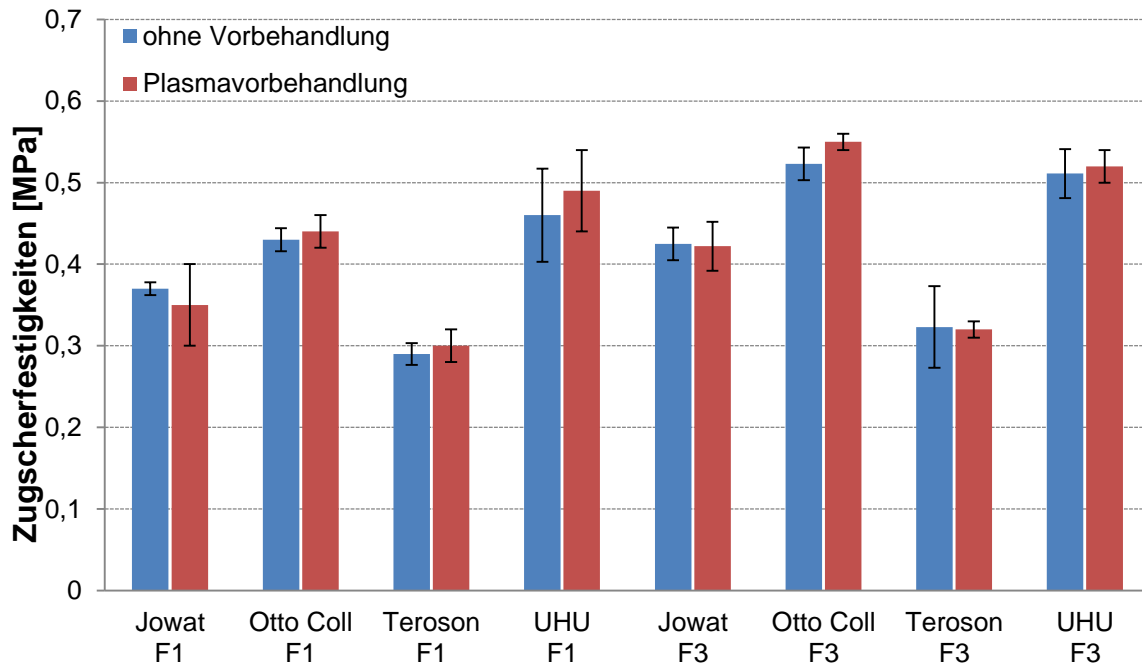


Abbildung 44: Zugscherfestigkeiten unvorbehandelter und vorbehandelter Klebproben

Aus den Diagrammen sind geringe bis gar keine Zugscherfestigkeitssteigerungen durch den Einsatz einer Vorbehandlung zu erkennen. Die Bruchbilder nach DIN EN ISO 10365 zeigten jedoch ausnahmsweise (auch für Teroson und Otto Coll) einen Bruch im Substrat (siehe Abbildung 45).

Die ermittelten Zugscherfestigkeiten der unterschiedlichen Folien und Klebstoffe lagen zwischen 0,28 und 0,56 MPa. Diese Werte liegen im Bereich der Zugfestigkeit der Folien, so dass der Bruch in der Folie erfolgte. In Tabelle 8 sind vergleichend die Grundmaterialzugfestigkeiten der beiden eingesetzten Folien F1 und F3 nochmals dargestellt.

Tabelle 8: Zugfestigkeiten der Folie F1 und F3

	Zugfestigkeiten Folie F1 [MPa]	Zugfestigkeiten Folie F3 [MPa]
Zugrichtung quer zur Extrusionsrichtung	0,29	0,33
Zugrichtung längs zur Extrusionsrichtung	0,35	0,35

Eine Steigerung der Festigkeit ist auf eine Spannungsverteilung in der Klebebene während der Prüfung zurück zu führen.

In Abbildung 45 sind exemplarisch die Bruchbilder nach DIN EN ISO 10365 der geprüften Klebprobekörper für Folie F1 dargestellt.

Teroson 8597 HMLC vorbehandelt	Teroson 8597 HMLC unvorbehandelt	Otto Coll S610 vorbehandelt	Otto Coll S610 unvorbehandelt	SE Polymer 690.00 vorbehandelt	SE Polymer 690.00 unvorbehandelt
--------------------------------------	--	-----------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	--



Abbildung 45: Bruchbilder der vorbehandelten sowie unvorbehandelten Folie-Metall Klebungen

Wie aus der Bruchbildbewertung zu entnehmen ist, konnte bei allen eingesetzten Klebstoffen nur die Bruchkraft bzw. Festigkeit der Folie nach der Vorbehandlung ermittelt werden. Die Festigkeit der Klebung liegt etwas höher.

4.6 Schutz der Paneele

Um die besonders verletzungsanfällige Außenhülle der VIP zu schützen wurden Versuche unter Einsatz von unterschiedlichen Schutzmechanismen durchgeführt.

Da manche Schutzmechanismen ein Umschließen (Einschäumen, Verkleben mit Metall oder Umschließen mittels Hot-Melt Klebstoff) der Paneele zur Folge haben, kann der Gasdruck des Paneels wegen des fehlenden direkten Kontaktes zum Sensor mittels va-Q-check nicht mehr ausgelesen werden. Aus diesen Gründen hat die Fa. va-Q-tec ein neuartiges Messsystem (RFID Sensoren) der Firma Nanotron zusätzlich in ausgewählte Paneele integriert. Bei diesem RFID-System wird ein Messsensor in eine Aussparung des Kernmaterials, die mittels einer Bohrung von 35 mm Durchmesser realisiert wird, eingebracht. Anschließend werden die Paneele wie gewohnt mit der Folie umschlossen und fertiggestellt. Beim Auslesen des Gasinnendruckes über den RFID – Sensor muss der Messkopf während der Messung nicht direkt am Sensor anliegen. Das Abfragesystem erlaubt es, den Gasinnendruck berührungslos durch die umgebende Klebstoff- oder Schaumschicht abzufragen. Abbildung 46 zeigt das Abfragemessgerät links im Bild sowie den Sensor der Fa. Nanotron mit der eingebrachten Kernbohrung im Kernmaterial.



Abbildung 46: RFID - Auslesegerät links und RFID-Sensor mit Aussparung im Nano-Foam Kern rechts

Im Einsatz erwiesen sich die Sensoren unerwarteter Weise als sehr störanfällig, weshalb eine Vielzahl von Sensoren ausgelesen werden konnten.

4.6.1 Einschäumen der Paneele mittels Polyurethanschaum

Zentraler Ansatz zum Schutz der Paneele war das Umschäumen mittels Polyurethanschaum. So sollten die Paneele mit Polyurethan allseitig umschlossen werden. Da sich das Einschäumen als sehr zeitaufwendig erwies, konnte dies nicht wie ursprünglich geplant beim Unterstützungspartner BASF Polyurethanes durchgeführt werden. Nach einer Schulung bei der BASF in Lemförde und einer Unterweisung vor Ort, wurden während des Projektes die mehrerer hundert Einschäumungen mit einem Leihwerkzeug der BASF in Köllda bei der va-Q-tec durchgeführt.



Abbildung 47: Laborwerkzeug links und beheizbare Schaumform mit eingelegtem VIP rechts

Die unterschiedlichen VIP wurden mit einem Polyurethanhartschaum-System der Zieldichte 80 g/L der BASF Polyurethanes in einem zweistufigen Prozess eingeschäumt. Zum Einsatz kam eine entsprechend eingestellte 2-Komponentenmischung mit einem Isocyanat M50. Abbildung 47 zeigt links im Bild das geschlossene Laborwerkzeug sowie rechts im Bild die beheizbare Schaumform mit eingelegtem VIP. Beim Einschäumen wurde zuerst die Polyolkomponente (A-Komponente) mit dem Treibmittel Cyclopentan vorgelegt und anschließend die Isocyanatkomponente (B-Komponente) zu dosiert und kurz aufgerührt. Das aufschäumende Gemisch wurde in das Werkzeug mit eingelegtem VIP gegossen. Nach Aushärten konnte das einseitig eingeschäumte VIP entnommen werden (Abb. 48).

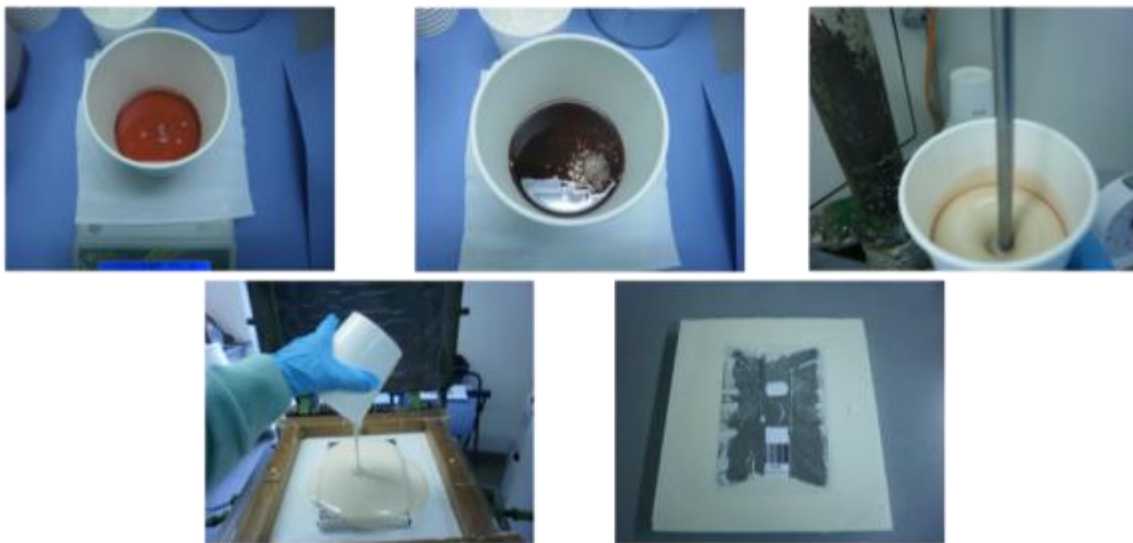


Abbildung 48: Einschäumprozess der ersten Seite

In einem Folgeschritt wurde die zweite Seite entsprechend eingeschäumt. Bei Vorversuchen zum Einschäumen der Paneele hat sich gezeigt, dass die seitliche Siegelnaht (kurze Lasche) als Fließbarriere für den Schaum wirkt. Daher wurden die Nähte verlängert und umgelegt (lange Lasche) sowie mittels Klebestreifens fixiert. Abbildung 49 zeigt ein solches PUR-Standard Paneel mit seitlich umgelegter Siegelnaht (lange Lasche). Die Abmessungen der fertig eingeschäumten Paneele betragen 290 x 320 x 50 mm. Für die weiteren Prüfungen wurden die Schaumkörper auf ein Maß von 250 x 280 x 40 mm zugeschnitten.



Abbildung 49: PUR-Standard Paneel mit seitlich umgelegter Siegelnaht (lange Lasche)

Es ist möglich die VIP nicht nur in einem diskontinuierlichen Verfahren wie bei den Versuchsmustern im Laborwerkzeug, sondern auch in einem kontinuierlichen Prozess einzuschäumen. In Abbildung 50 ist ein Testmuster gezeigt, bei dem im Technikum der BASF in Lemförde großflächige Silica-Pulver Paneele eingelegt und in einer Doppelbandanlage eingeschäumt wurden. Dieser kontinuierliche Prozess ist ein Standardverfahren für die Herstellung von Dämmelementen.

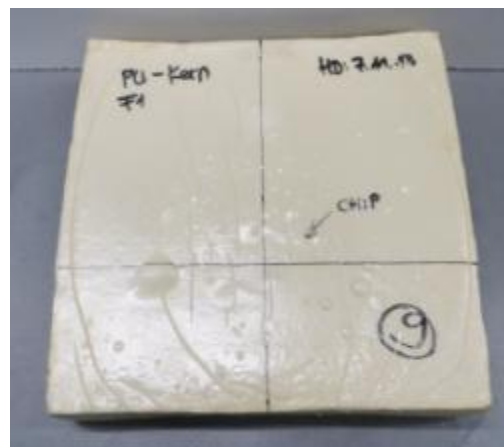


Abbildung 50: Paneel in einer Doppelbandanlage eingeschäumt links und Paneel im Laborwerkzeug eingeschäumt rechts

4.6.2 Kurzzeitzugversuch der eingeschäumten Paneele

Zur Beurteilung der unterschiedlichen Zugfestigkeiten wurde der Kurzzeitzugversuch nach DIN EN ISO 527-3 an den Schaumkörpern durchgeführt. Diese wurden für 24 Stunden bei Normklima (23 °C, 50 % rel. F) ausgelagert und anschließend geprüft. Es wurden hydraulische Spannklemmen eingesetzt, die die nötige Kraft aufbringen, um ein Herausrutschen der Paneele zu verhindern. In Abbildung 51 ist ein eingeschäumtes PUR-Standard Paneel in der Zugprüfung zu sehen. Die Prüfgeschwindigkeit betrug dabei 50 mm/min. So wurden mindestens vier Probekörper geprüft. Die Probekörper wurden bis zum Bruch geprüft.



Abbildung 51: Eingeschäumtes PUR-Standard Paneel in einer Zugprüfmaschine

Es wurde keine Abfrage des Gasinnendruckes während sowie nach der Prüfung vorgenommen. Eine visuelle Begutachtung nach der Zugprüfung zeigte, dass alle Paneele gerissen (Folienhülle zerstört) sind. Der Bruch des umschließenden Schaums erfolgte parallel zur Zugbeanspruchung an einer der Außenseiten der innenliegenden eingeschäumten Paneele.

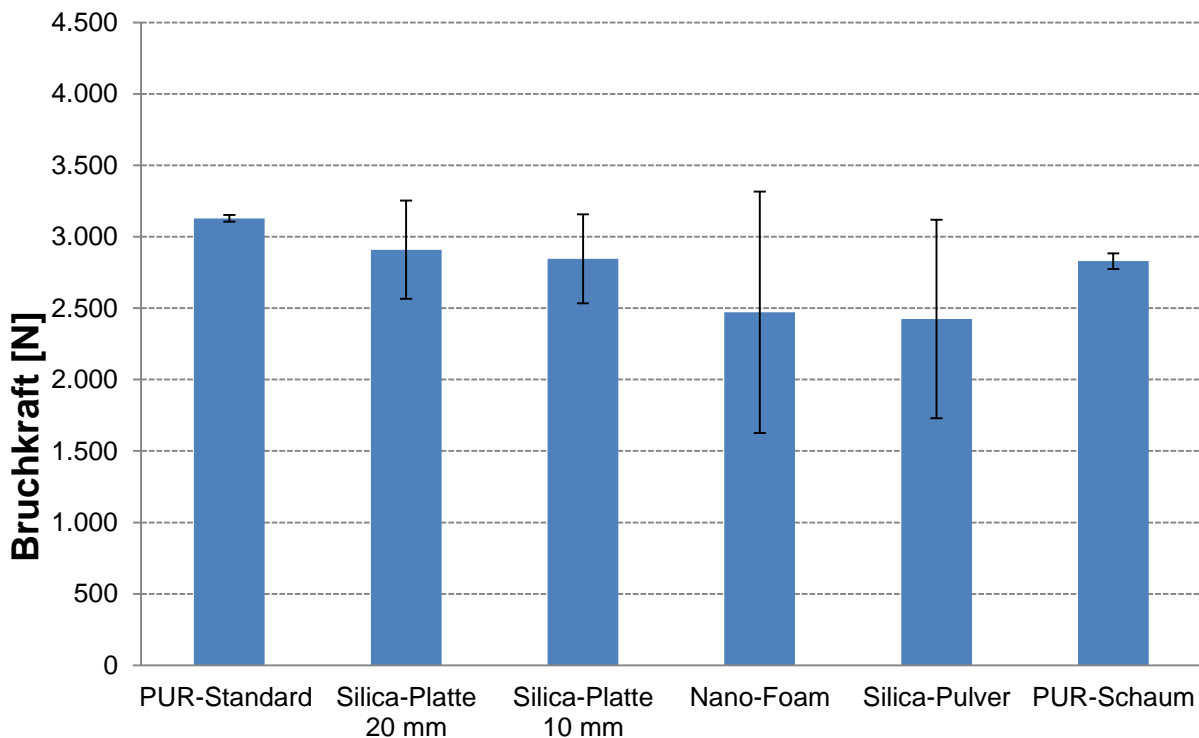


Abbildung 52: Bruchkräfte der eingeschäumten Paneele sowie eines reinen PUR-Schaums

Beim Festigkeitsvergleich konnten beim PUR-Standard Paneelen die höchsten Bruchkräfte festgestellt werden. Die Silica-Platte Paneele lagen knapp dahinter. Es war kaum ein Unterschied zwischen den 10 und 20 mm dicken Silica-Platte Paneelen zu erkennen. Dies könnte am ähnlichen Aufbau dieser Paneele liegen. Lediglich die Dicke der Paneele ist hier verschieden. Nano-Foam und Silica-Pulver Paneele liegen bezgl. der Bruchkräfte nahezu gleich. Die beiden Paneeltypen besitzen zudem höhere Standardabweichungen. Die gemessenen Bruchkräfte der Paneelen mit Folie F1 und F3 sind zusammengefasst in der Abbildung 52 dargestellt. Sowohl die Paneele mit Folie F1 als auch mit Folie F3 lieferten ähnliche Bruchkräfte, weshalb beide zusammen in einem Diagramm dargestellt wurden. Eine Erhöhung der Bruchkräfte ist durch die innenliegenden Paneele nicht zu erkennen.

4.6.3 Technologischer Biegeversuch der eingeschäumten Paneele

Zur mechanischen Analyse der eingeschäumten Paneele wurde der Biegeversuch in Anlehnung an die DIN EN ISO 178 eingesetzt. Vorab wurden die eingeschäumten Paneele für 24 Stunden bei Normklima (23 °C, 50 % rel. F) ausgelagert und anschließend geprüft. Der Auflagerabstand betrug 260 mm. Der Durchmesser der Auflagerstempel und der Druckfinne betrug 12 mm. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 20 mm/min. Es wurden mindestens vier Probekörper je Paneeltyp geprüft. In Abbildung 53 sind die maximalen Biegekräfte der eingeschäumten Paneel sowie des reinen Schaumblockes dargestellt.

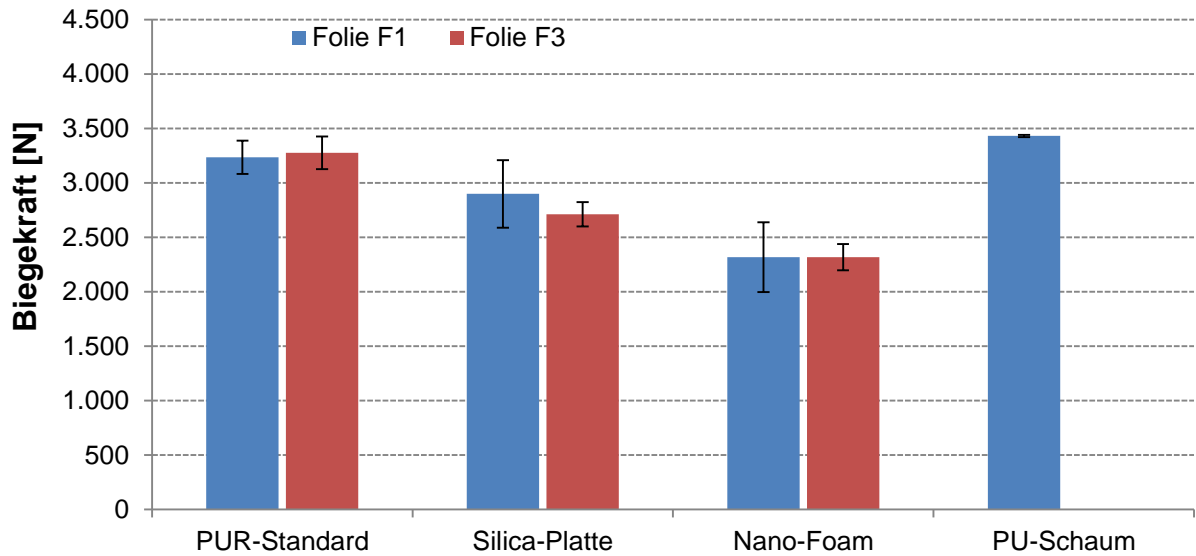


Abbildung 53: Biegekräfte der eingeschäumten Paneele sowie eines reinen PU-Schaums

Die gemessenen Biegekräfte der eingeschäumten Paneele mit der Folie F1 und F3 sind in der Abbildung 53 dargestellt. Die Prüfung wurde beendet als die eingeschäumten Paneele in der Mitte brachen. Es war immer ein glatter Durchbruch bis zum innenliegenden eingeschäumten Paneel unter der Druckfinne zu verzeichnen. Abbildung 54 zeigt ein eingespanntes Paneel nach der Biegeprüfung. Die innenliegenden Paneele brachten keine Erhöhung der Biegekräfte im Vergleich zu dem PU-Schaum. Hierbei zeigte PUR-Standard und Silica-Platte die Werte bzgl. der Biegekraft. Diese Ergebnisse decken sich auch mit den Ergebnissen des Kurzzeitzugversuches der eingeschäumten Paneele.



Abbildung 54: Gebrochenes, eingeschäumtes Paneel nach Abbruch der Biegeprüfung

Nach visueller Begutachtung konnte keine Beschädigung (Belüften) des innenliegenden Panels festgestellt werden. Es wurde keine Abfrage des Gasinnendruckes mittels va-Q-check Sensor oder RFID - Sensor während sowie nach der Prüfung vorgenommen.

4.6.4 Bestimmung des Stoßverhaltens der eingeschäumten Paneele

Die eingeschäumten Paneele wurden bzgl. des Stoßverhaltens nach DIN EN ISO 6603-1 untersucht. Hierzu wird der Schaumblock zwischen zwei Stahlplatten mit definierter Bohrung eingespannt. Anschließend wird die Schädigungsarbeit bestimmt, indem der Schaumblock durch einen senkrecht fallenden Stoßkörper beansprucht wird. So wird die Durchstoßenergie in Joule [J] und die Höchstkraft in Kilonewton [kN] ermittelt. Es wurden mindestens vier Probekörper pro Versuchsreihe geprüft. Einen schematischen Aufbau der Prüfung ist in Abbildung 29 im Kapitel 4.4.5 zu entnehmen. Abbildung 55 stellt die Ergebnisse der Untersuchungen in einem Diagramm zusammenfassend dar.

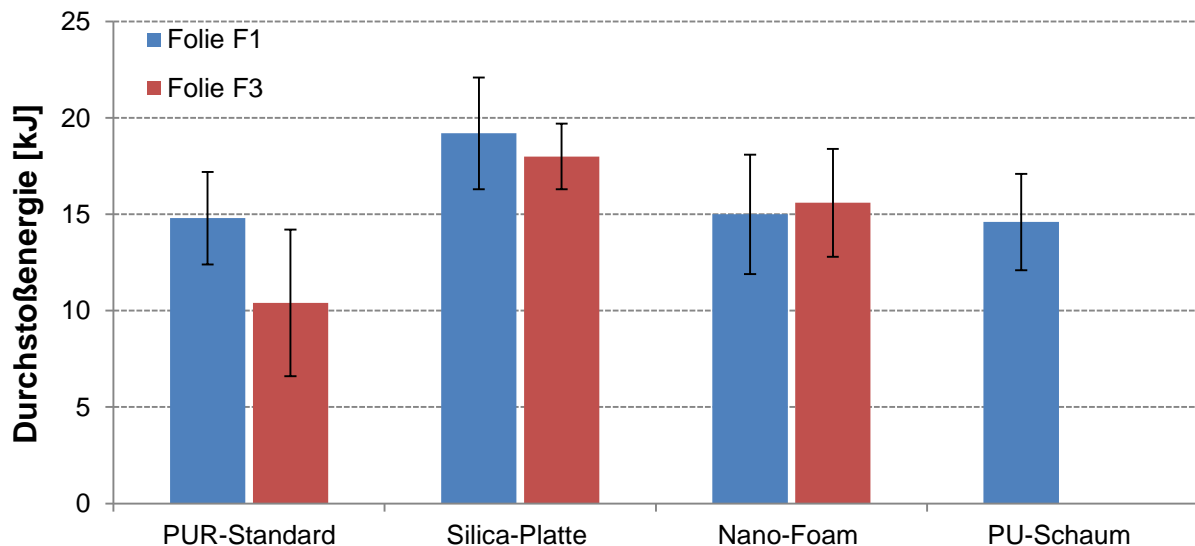


Abbildung 55: Durchstoßenergien der eingeschäumten Paneele sowie eines reinen PU-Schaums

Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die eingeschäumten Silica-Platte Paneele die meiste Energie aufnehmen können und somit die besten Durchstoßenergien erreichen. Die Dichte der Silica-Platte Paneele liegt dabei um bis zu Faktor 3 höher als die der PUR-Standard und Nano-Foam Paneele. Ähnliches Verhalten zeigte auch die Bestimmung der Durchstoßenergie der reinen Paneele. In Tabelle 9 sind die Durchstoßenergien der reinen Paneele zum Vergleich dargestellt. Die Silica-Pulver Paneele konnten wegen ihres Aufbaus, der aus einer losen Pulverschüttung besteht und der empfindlichen Messkammer des Prüfgerätes nicht geprüft werden. Silica-Platte 10 mm Paneel wurden aufgrund des Prüfumfanges ebenfalls nicht mit geprüft. Ein geprüftes eingeschäumtes Paneel ist in Abbildung 56 dargestellt.

Tabelle 9: Durchstoßenergie der reinen Paneele

		PUR-Standard	Silica-Platte 20 mm	Nano-Foam
Durchstoßenergie [kJ]	Folie F1	5,6	8,9	7,3
Durchstoßenergie [kJ]	Folie F3	5,5	8,3	6,5



Abbildung 56: Unterseite eines eingeschäumten PUR-Standard Paneels nach der Prüfung

In Abbildung 56 ist die Unterseite eines eingeschäumten PUR-Standard Paneels nach der Prüfung zu sehen. Deutlich zu erkennen ist die Austrittsöffnung aus der der halbkreisförmige Stoßkörper ausgetreten ist. Bei allen Paneelen erfolgte ein glatter Durchstoß wie er im Bild zu sehen ist.

4.6.5 Untersuchungen zur Anbindung der Paneele zum umschließenden Schaum

Es wurde eine komplette Kräfteentkopplung der eingeschäumten Paneele zum umschließenden Schaum untersucht. Dazu wurden acht Paneele exemplarisch vom Typ PUR-Standard mit Folie F1 geprüft. Die Kräfteentkopplung wurde mittels eines Trennmittels realisiert. Dieses wurde vor dem Einschäumprozess auf die Paneele gesprüht. Nach ausreichender Trockenzeit wurden diese dann wie die herkömmlichen Paneele eingeschäumt. Diese wurden für 24 Stunden bei Normklima (23 °C, 50 % rel. F) ausgelagert und anschließend geprüft. Bewertet wurden die Paneele mittels Kurzzeitzugversuch in Anlehnung an die DIN EN ISO 527-3. Die Zugprüfgeschwindigkeit betrug 50 mm/min.

Abbildung 57 zeigt links die Maximalkraft eines ohne Trennmittel eingeschäumten Paneels und rechts die Maximalkraft eines mit Trennmittel entkoppelt eingeschäumten Paneels. Die Prüfung erfolgte analog wie in Kapitel 4.6.2 beschrieben.

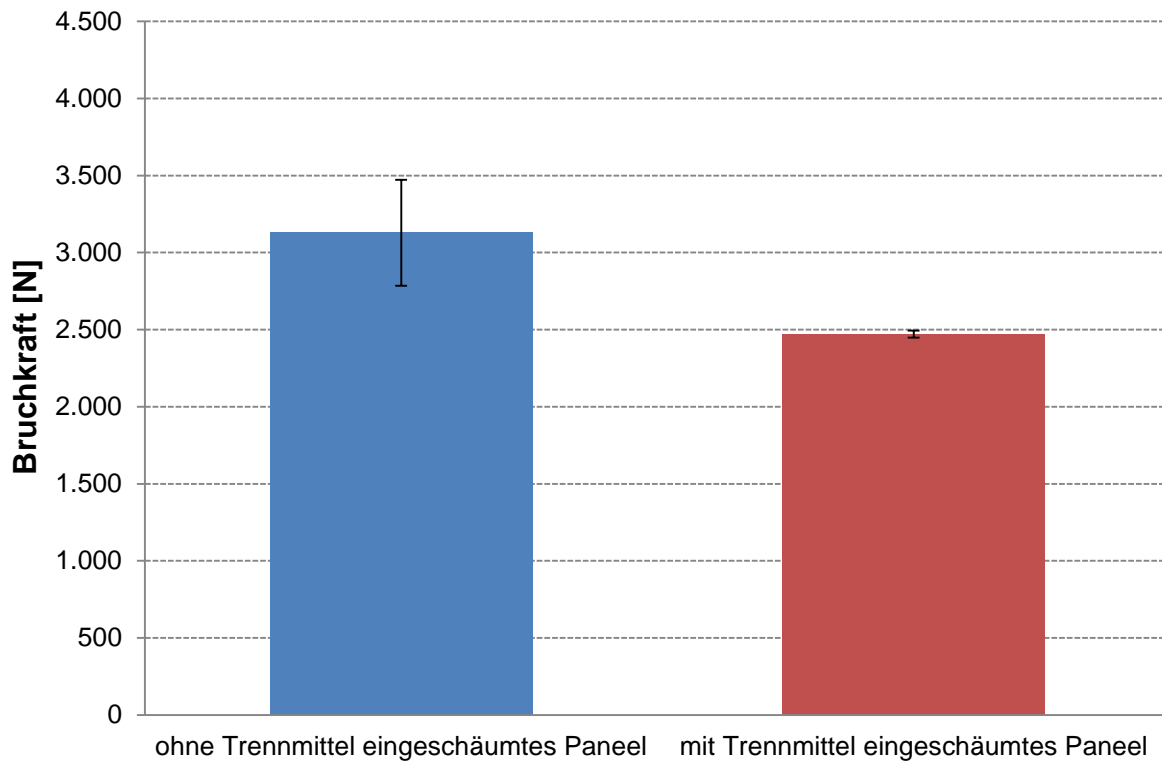


Abbildung 57: Bruchkräfte eines Paneels ohne Trennmittel links und Bruchkräfte eines Paneels mit Trennmittel

Deutlich zu erkennen ist der Unterschied bei den Bruchkräften. Die Bruchkraft eines entkoppelten Paneels liegt ca. 700 N unter der eines ohne Trennmittel eingeschäumten Paneels. Das Entkoppeln der Paneele zum umschließenden Schaum brachte keine Festigkeitssteigerung. Daher wurden im weiteren Projektverlauf nur Paneele ohne Trennmittel eingeschäumt.

4.6.6 Alterung der eingeschäumten Paneele

Um eine Aussage über das Langzeitverhalten zu erlangen wurden auch die eingeschäumten Paneele bei einer erhöhten Temperatur sowie teilweise auch einer erhöhten Feuchtigkeit ausgelagert. Die Temperatur in den Wärmeöfen betrug dauerhaft 70 °C. Als Alterskriterium diente bei beiden Auslagerungen der Anstieg des Gasinnendruckes der eingeschäumten Paneele. Die eingeschäumten Paneele wurden in regelmäßigen Abständen entnommen und über die RFID – Sensoren ausgelesen. Aufgrund von zahlreich nicht auslesbaren RFID-Sensoren konnte teilweise nur ein Paneel je Paneeltyp und Folie ausgewertet werden. Daher sind die Messergebnisse nur bedingt aussagekräftig. Die vorgestellten Werte des Gasinnendruckes stellen teilweise die Mittelwerte der Messungen dar. Die

Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Diagramm dargestellt.

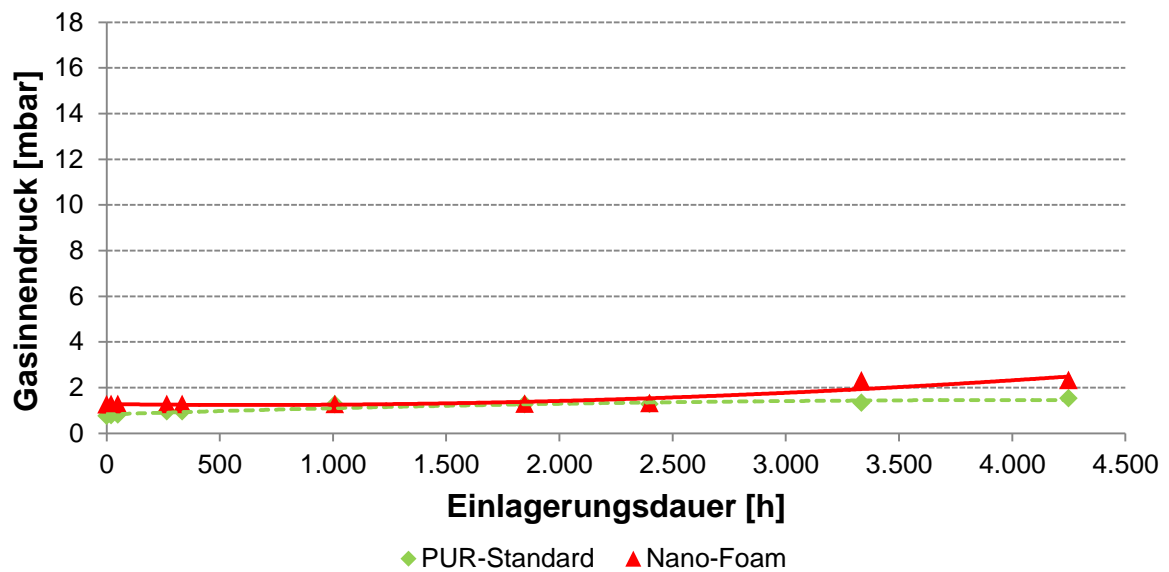


Abbildung 58: Ermittelter Gasinnendruck der eingeschäumten Paneele mit Folie F1 während der Warmlagerung (70 C)

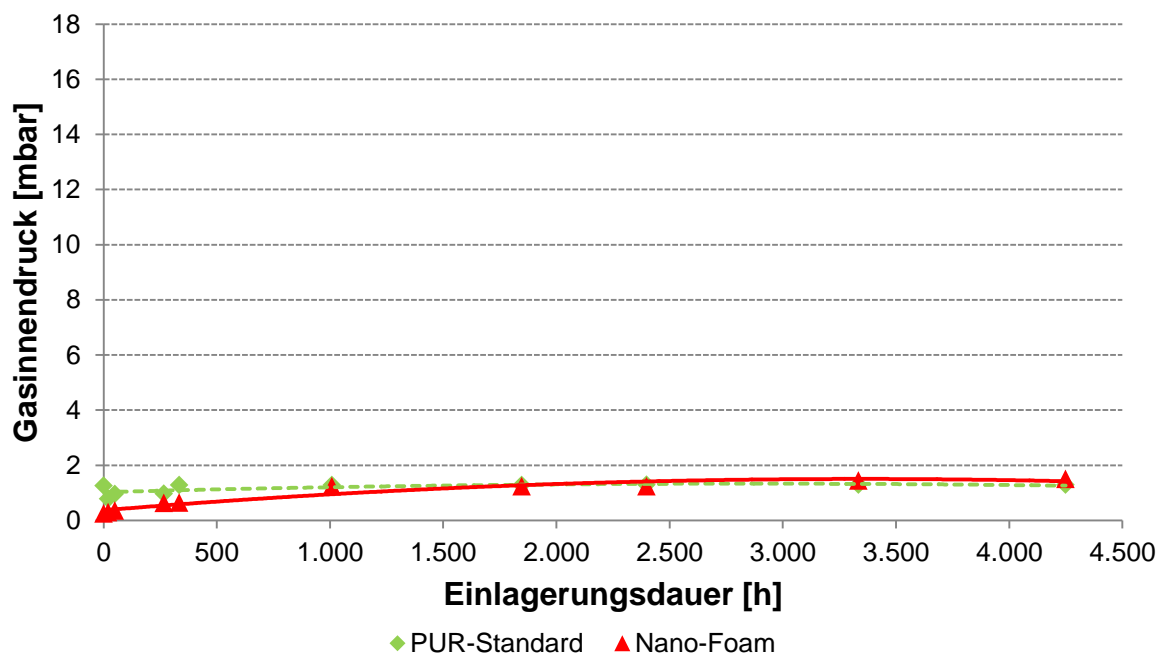


Abbildung 59: Ermittelter Gasinnendruck der eingeschäumten Paneele mit Folie F3 während der Warmlagerung (70 C)

In Abbildung 58 und Abbildung 59 sind die Gasinnendrucke über einer Einlagerungsdauer von 4.350 Stunden der PUR-Standard Paneele mit der Folie F1 und F3 sowie der Nano-Foam Paneele mit der Folie F1 und F3 in einem Wärmeofen aufgetragen. Der Anstieg des Gasinnendruckes hielt sich bei den PUR-Standard Paneelen sowie den Nano-Foam Paneelen sehr gering. Über der gesamten Einlagerungsdauer ist der Gasinnendruck nur bis

auf ca. 2 mbar angestiegen. Der Schaum um die Paneele hat hier eine schützende Wirkung gezeigt. Ein Vergleich zwischen den Warmlagerungen der nicht eingeschäumten Paneelen zeigt, dass diese in der gleichen Einlagerungsdauer einen deutlich steileren Anstieg des Gasinnendruckes (Kapitel 4.3.6) zu verzeichnen hatten.

In der Klimakammer wurde ein definiertes Prüfprogramm in Anlehnung an PV VW 1200 gefahren. In dieser Prüfvorschrift werden bestimmte Zyklen von Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen definiert. Die Temperatur variiert dabei in der Klimakammer zwischen -40 °C und +80 °C. Die Feuchtigkeit in der Klimakammer variiert dabei zwischen ca. 15 und 80% rel. F. Die Paneele wurden aus der Klimakammer entnommen und nach entsprechender Abkühlzeit der Gasinnendruck gemessen. In Abbildung 60 ist der Gasinnendruck der Paneele mit Folie F1 über der Einlagerungsdauer in der Klimakammer dargestellt. Es wurden mindestens drei Paneele geprüft. Die Einlagerungsdauer betrug ca. 530 Stunden. Die dargestellten Werte des Gasinnendruckes stellen die Mittelwerte der Messungen dar. Die Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Diagramm vorgestellt.

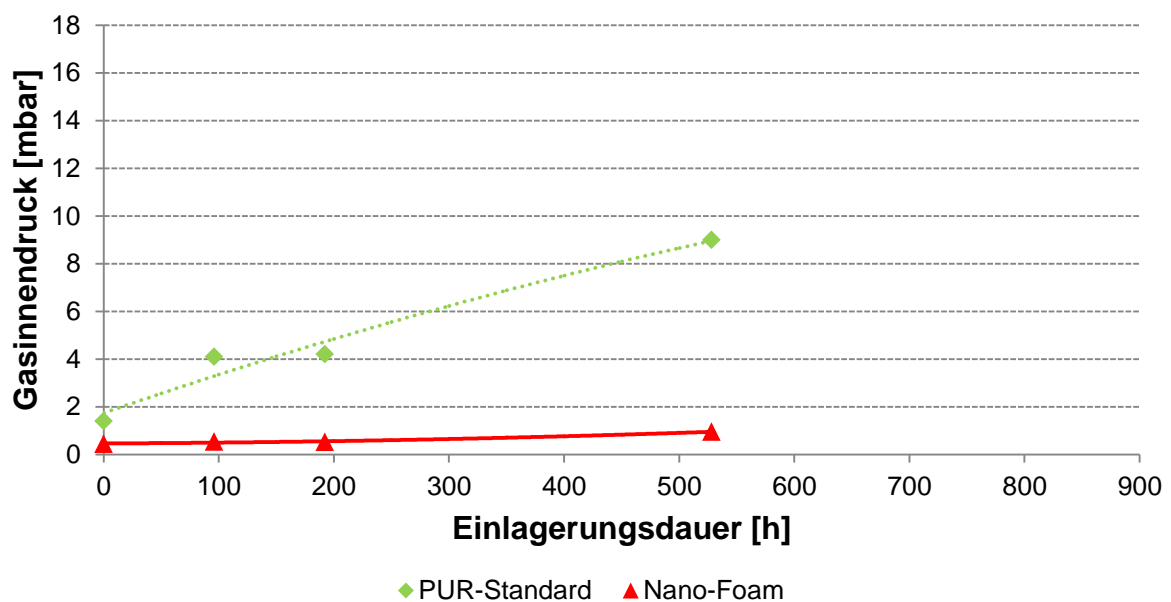


Abbildung 60: Ermittelte Gasinnendruck der eingeschäumten Paneele mit Folie F1 während der Klimalagerung (PV VW 1200)

Ein äußerst geringer Anstieg des Gasinnendruckes war die den eingeschäumten Nano-Foam Paneelen (bis auf ca. 1 mbar) zu erkennen. Die eingeschäumten PUR-Standard Paneele hingegen stieg über der Einlagerungsdauer bis auf ca. 9 mbar an.

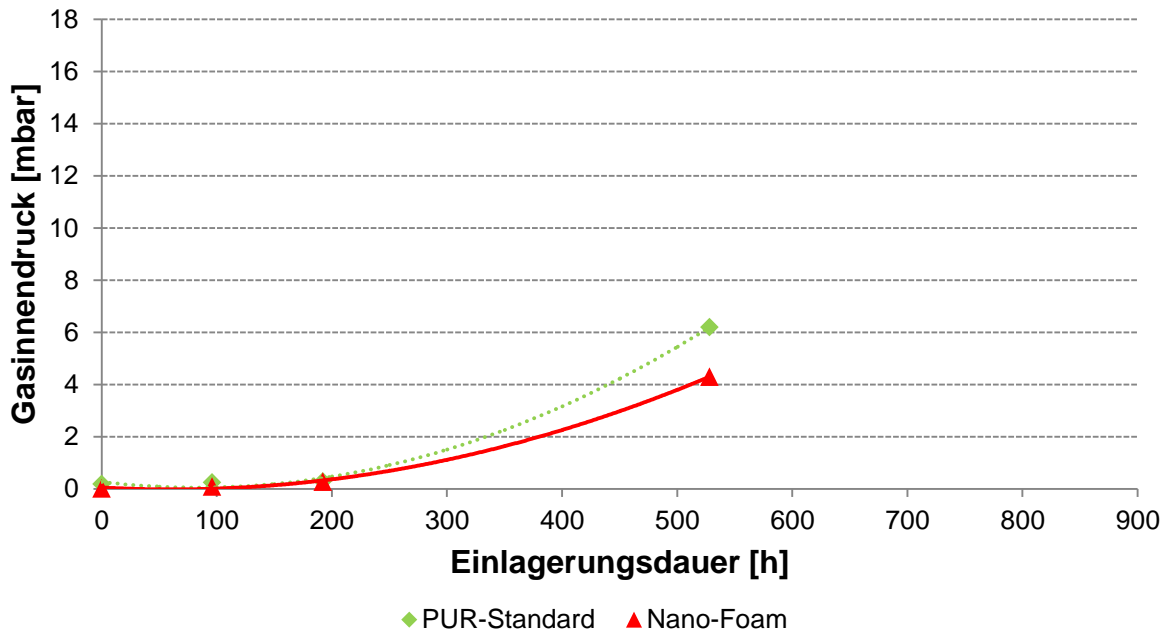


Abbildung 61: Ermittelter Gasinnendruck der eingeschäumten Paneele mit Folie F3 während der Klimalagerung (PV VW 1200)

In Abbildung 61 sind die Gasinnendrucke über einer Einlagerungsdauer von ca. 530 Stunden der PUR-Standard Paneele und der Nano-Foam Paneele mit der Folie F1 und F3 in einer Klimakammer aufgetragen. Bei den PUR-Standard Paneelen mit Folie F1 war über der Einlagerungsdauer ein Anstieg bis auf ca. 8 mbar, bei den Paneelen mit der Folie F3 und bis auf ca. 6 mbar zu verzeichnen. Bis zu einer Einlagerungsdauer von ca. 200 Stunden war der Anstieg des Gasinnendruckes bei beiden Paneeltypen mit Folie F3 gering. Danach stieg der Gasinnendruck schnell an. Hier konnte der umschließende Schaum die innenliegenden Paneele nur schützen. Der PU-Schaum ist wasserdampfdurchlässig.

4.6.7 Kleben mit Metall und GFK

Ein weiterer Ansatz zum Schutz der Paneele war das Bekleben der Paneele mit Metall- bzw. glasfaserverstärkten Kunststoffplatten. Bei dem eingesetzten Klebstoff handelte es sich um 2K-SE Polymer 690.00 (Fa. Jowat), der flexible und elastische Eigenschaften aufweist. Der ausgewählte Klebstoff besitzt eine lange Verarbeitungs- und Topfzeit, sowie ein hohes Spaltfüllvermögen. Er härtet bei Raumtemperatur und ohne Feuchte aus.

Es wurden von allen Paneeltypen drei Paneele mit jeweils zwei Aluminiumplatten oder zwei glasfaserverstärkten Kunststoffplatten beidseitig verklebt. Die Dicke der Aluminiumplatten betrug 2 mm, die der glasfaserverstärkten Kunststoffplatten 1,5 mm. Für den Mischvorgang des 2K-Klebstoffes wird dieser durch eine Mischdüse, die beim Auftragen an die Klebstoffkartusche geschraubt wird, gepresst. So wird ein homogener und gleichmäßiger Mischvorgang gewährleistet. Nach einer Reinigung der Platten und der Paneele wurde so

der Klebstoff gleichmäßig auf die Flächen der Paneele aufgetragen. Anschließend wurden die Platten auf die mit Klebstoff beschichteten Paneele gelegt und mittels Schraubzwingen gespannt. In Abbildung 62 ist links der aufgetragene Klebstoff und rechts ein Paneel, das mit einer Glasfaser verstärkten Kunststoffplatte verklebt ist, dargestellt.



Abbildung 62: Aufgetragener Klebstoff links und Paneel mit glasfaserverstärkter Kunststoffplatte verklebt rechts

4.6.8 Eingießen der Paneele mittels PU-Gießharzsystem und Hot-Melt-Klebstoff

Zum Schutz der Paneele wurde neben dem Einschäumen und Bekleben weiterer Ansätze verfolgt. Einerseits das Umhüllen mit einem Polyurethan-Gießharz-System Elastic HS PU 655. Dieses System ist ein lösemittelfreies 2-Komponenten-PUR-System. Nach seiner Aushärtung ist es ein sehr elastisch, gummiartiger Formstoff mit geringem linearem Schwund, gute Chemikalienbeständigkeit, gutem Dehnvermögen, hoher Rückstellkraft, guter Weiterreisfestigkeit und einer Shore-A-Härte von ca. 55. Die Paneele wurden in Gieß-Tauchverfahren in einem Arbeitsgang allseitig beschichtet. Problematisch zeigten sich die Siegelnähte an den Kanten der Paneele, bei denen die Schichtdicke von ca. 1,5 mm nicht immer eingehalten werden konnte. Abbildung 63 zeigt ein mit Polyurethan-Gießharz umhülltes Paneel.



Abbildung 63: Eingegossenes Paneel mit einem Polyurethan-Gießharz System

Andererseits wurde zum Umhüllen der Paneele ein Heißklebstoff der Fa. Bühnen (TYP70931) verwendet. Dieser Klebstoff wurde im Sprühverfahren auf die Paneele mit einer Schichtdicke von 2 mm gleichmäßig in zwei Arbeitsschritten aufgetragen. Die Sprühdüse erzeugt mittels Luft einen gleichmäßigen Klebefilm. Aus verarbeitungstechnischen Gründen musste erst eine Seite des Paneels eingesprüht und nach entsprechender Aushärtezeit die andere Seite eingesprüht werden. Der Klebstoff besitzt eine Verarbeitungstemperatur von 160 °C. Die relativ hohe Schmelztemperatur des Schmelzklebstoffes erwies sich als problematisch. Es kam bei einigen Paneelen zur Beschädigung der Folienhülle und somit zum Verlust des Vakuums der Paneele. Zudem konnte ein Verzug der Paneele beim einseitigen Auftrag des Schmelzklebstoffes auf eine Paneeloberfläche beobachtet werden. Diese Krümmung/Wölbung der Paneele glich sich auch beim Auftragen des Klebstoffes auf der gegenüberliegenden Seite nicht aus. Aufgrund der Beschädigung der Paneele wurden weitere Versuche mittels Heißklebstoff unterlassen und die Materialien nicht weiter untersucht.

4.6.9 Schutzwirkung der Beschichtung

Die oben beschriebenen mit PU-Gießharz umschlossenen Paneele wurden mit Hilfe der DIN EN IOS 6603-1 untersucht. Hierzu wurde das Paneel zwischen zwei Stahlplatten mit einer definierten Bohrung eingespannt. Anschließend wurde die Schädigungsarbeit bestimmt, indem die Paneele durch einen senkrecht fallenden Stoßkörper beansprucht wurden. So wurde die Duchstoßenergie in Joule [J] und die Höchstkraft in Kilonewton [kN] ermittelt. Es wurden mindestens zwei Probekörper pro Versuchsreihe geprüft. Die Silica-Pulver Paneele konnten wegen ihres Aufbaus, der aus einer losen Pulverschüttung besteht, in der empfindlichen Messkammer des Prüfgerätes nicht geprüft werden. Silica-Platte 10 mm Paneele wurden aufgrund des Prüfumfanges ebenfalls nicht mit geprüft.

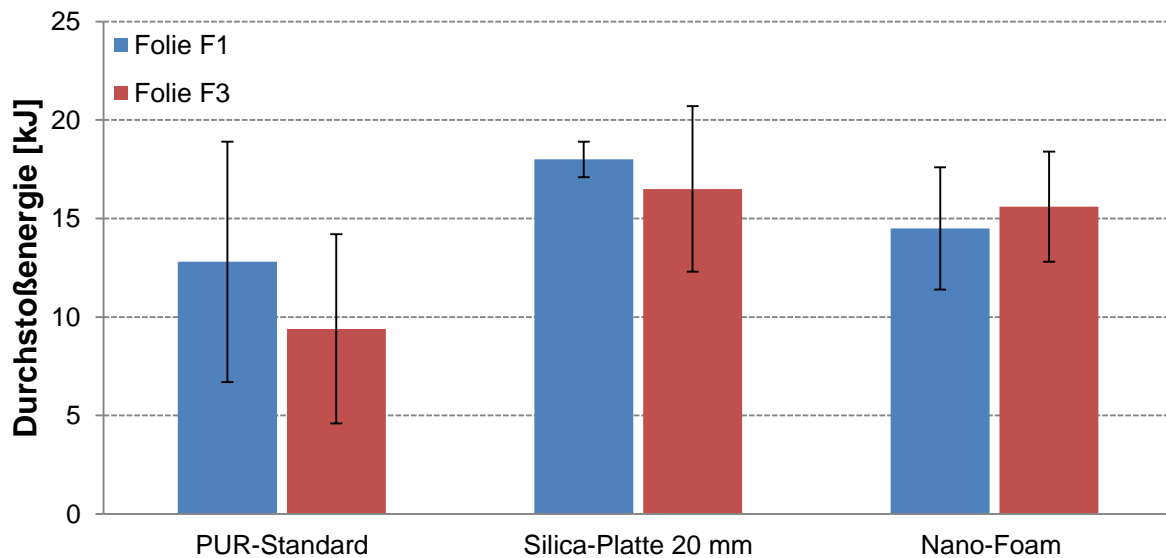


Abbildung 64: Durchstoßenergie der mit PU-Gießharz umschlossenen Paneele

In Abbildung 64 ist zu erkennen, dass die Werte der Durchstoßenergie der Folie F1 bei den umgossenen PUR-Standard Paneelen sowie bei den Nano-Foam Paneelen höher liegen als die der Folie F3. Zwischen den umschlossenen Paneeltypen besitzen die Silica-Platte Paneele die besten Werte in der Durchstoßenergie, dies kann an den Aufbau des Kernmaterials liegen. Die Dichte der Silica-Platte Paneele liegt, wie bereits erwähnt, um bis zu Faktor 3 höher als die der PUR-Standard und Nano-Foam Paneele und kann somit mehr Energie aufnehmen. Die Standardabweichungen liegen insbesondere bei PUR-Standard sehr hoch. Jedoch liegen die Werte unter den der mit PU-Schaum eingeschäumten Paneele.

4.7 Dynamische Untersuchungen an Paneelen und Verbunden

Die Bestimmung der dynamischen Langzeiteigenschaften der Paneele und der eingeschäumten Paneele wurde mit Hilfe einer servo-pneumatischen Schwingprüfmaschine untersucht. Abbildung 65 zeigt diese servo-pneumatische Schwingprüfmaschine mit eingespanntem Paneel.

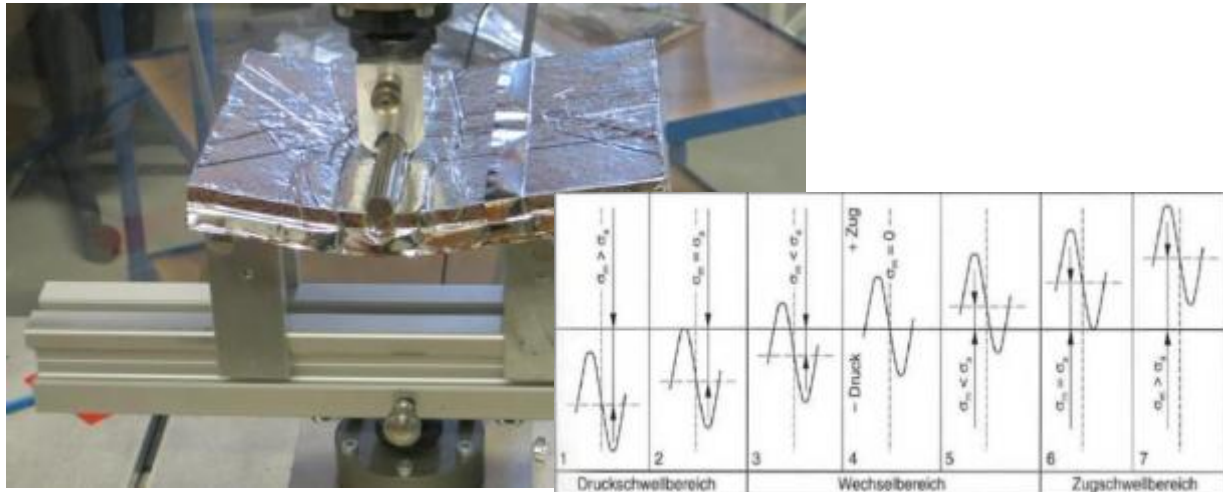


Abbildung 65: Servo-pneumatische Dauerprüfmaschine im Druckschwellbereich

Für die Untersuchungen der dynamischen Langzeiteigenschaften musste eine spezielle Vorrichtung gebaut und in eine servo-pneumatische Dauerschwingprüfmaschine der Firma Dynamess integriert werden.

Die Paneele wurden in die Vorrichtung leicht außermittig eingespannt, um den mittig sitzenden va-Q-check Sensors nicht zu beschädigen. Aufgrund von Vorversuchen wurde eine Prüffrequenz von 5 Hz gewählt. Das Lastverhältnis wurde im statischen Biegeversuch ermittelt. Es soll grundsätzlich im Bereich von 10 bis 90 % der Kraft des statischen Biegeversuches liegen. Das Lastverhältnis lag im Bereich von 23,8 bis 238,5 N. Versagens- und Abbruchkriterium bei dieser Prüfung war der Verlust des Vakuums der Paneele. In Abständen von ca. 5.000 Belastungszyklen wurde der Gasinnendruck mittels va-Q-check Sensor ermittelt. Es wurden jeweils drei Paneele je Paneeltyp untersucht. Aufgrund des Prüfumfanges wurde bei diesen Versuchen der Schwerpunkt auf Paneele mit der Folie F1 und F3 gelegt.

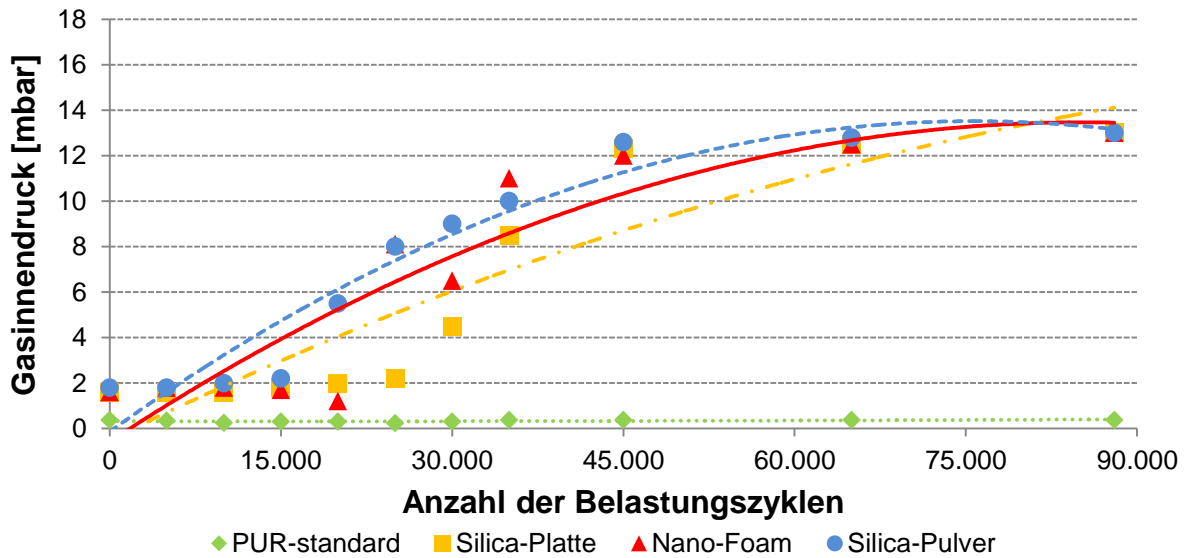


Abbildung 66: Ermittelter Gasinnendruck der Paneele mit Folie F1 über einer dynamischen Zug/Druck Wechselbelastung

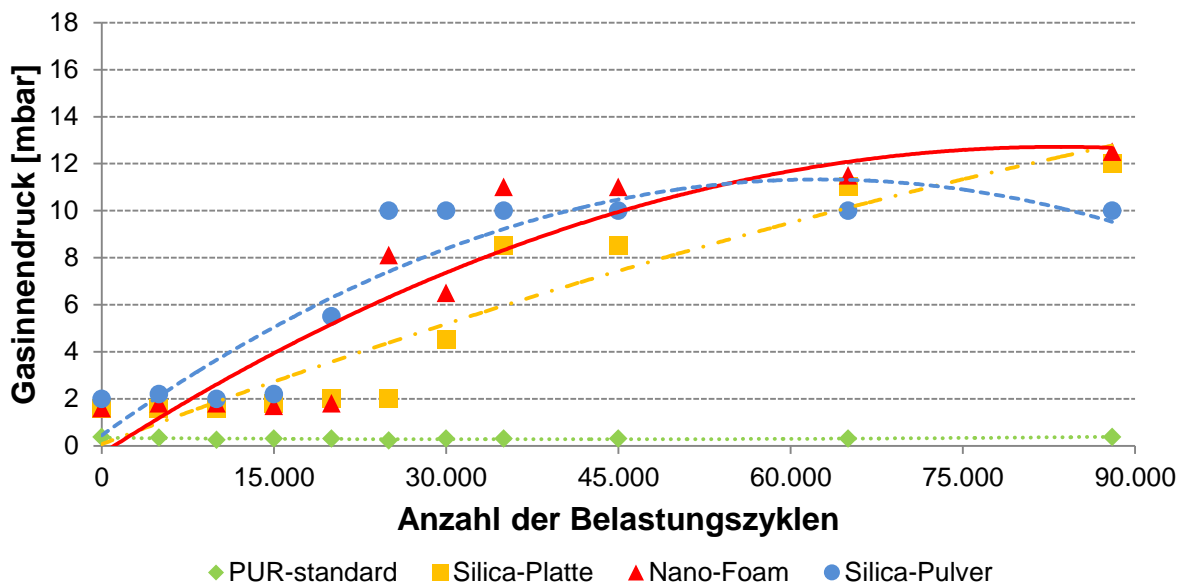


Abbildung 67: Ermittelter Gasinnendruck der Paneele mit Folie F3 über einer dynamischen Zug/Druck Wechselbelastung

In Abbildung 66 und Abbildung 67 ist der Gasinnendruck über einer dynamischen Druckschwellbelastung zu erkennen. Während der Gasinnendruck bei den Silica-Pulver Paneelen schon bei ca. 15.000 Zyklen anstieg war der Gasinnendruck bei den PUR-Standard Paneelen nach 90.000 Zyklen noch nahezu unverändert. Bei den Nano-Foam Paneelen und den Silica-Platte Paneelen erfolgte der Anstieg des Gasinnendruckes ab ca. 20.000 bis 25.000 Zyklen. Bis zur vollständigen Versagen der Paneele dauerte es im Schnitt dann noch weitere ca. 10.000 Zyklen.

Für die Untersuchungen der eingeschäumten Paneele wurden diese ebenfalls in einem servo-pneumatischen Dauerprüfstand eingespannt. Es wurden eingeschäumte Paneele vom

Typ PUR-Standard, Silica-Platte und Nano-Foam geprüft. Die PUR-Standard und Nano-Foam Paneele wurden vor dem Einschäumprozess wärmevorbehandelt. Die Prüfung erfolgte im Zug/Druck Wechselbereich. Das Lastverhältnis lag im Bereich von ca. -800 N bis +800 N. Die Prüffrequenz lag bei ca. 1 Hz. Als Versagenskriterium diente der Verlust des Vakuums. In Abständen von ca. 15.000 Belastungszyklen wurde der Gasinnendruck mittels RFID-Sensor gemessen. Aufgrund von zahlreichen nicht auslesbaren RFID-Sensoren konnte teilweise nur ein Paneel je Paneeletyp und Folie ausgewertet werden. Daher sind die Messergebnisse nur bedingt aussagekräftig und weitere Versuchsreihen hier notwendig.

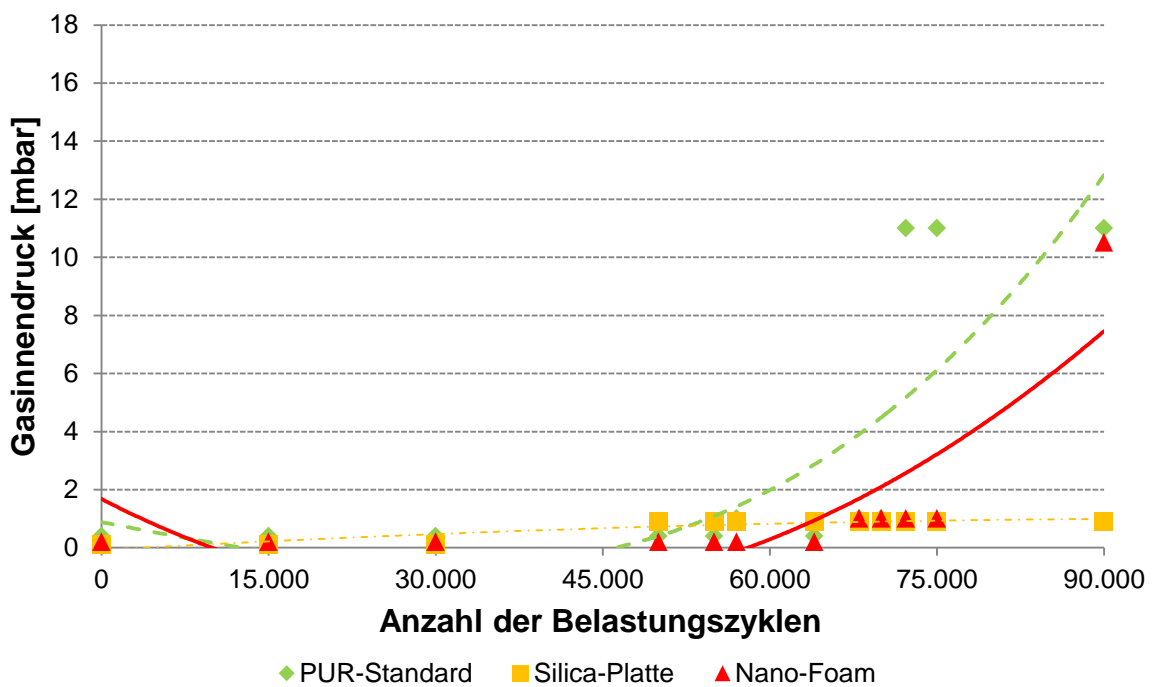


Abbildung 68: Ermittelter Gasinnendruck der eingeschäumten Paneele mit Folie F1 über einer dynamischen Zug/Druck Wechselbelastung

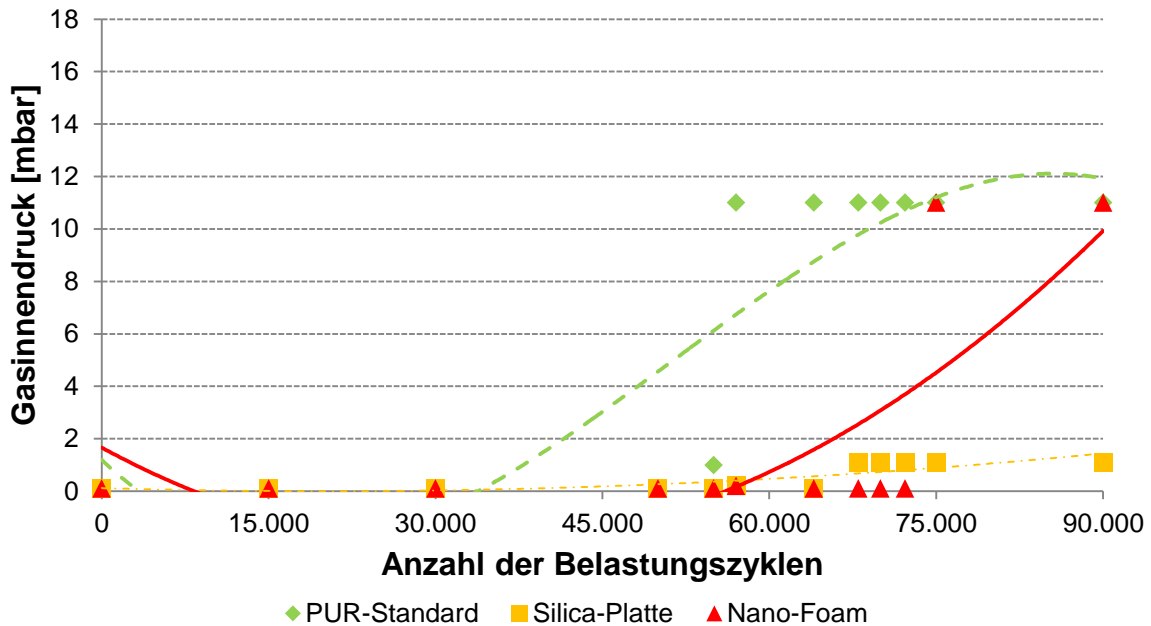


Abbildung 69: Ermittelter Gasinnendruck der eingeschäumten Paneele mit Folie F3 über einer dynamischen Zug/Druck Wechselbelastung

In Abbildung 68 und Abbildung 69 sind die Gasinnendrucke über einer dynamischen Zug/Druck Wechselbelastung zu sehen. Im Bereich zwischen 60.000 und 70.000 Belastungszyklen steigt der Gasinnendruck bei PUR-Standard Paneelen sowie Nano-Foam Paneelen deutlich an. Bei Silica-Platte Paneele hingegen steigt der Gasinnendruck nur sehr gering. Aufgrund von teilweise nur einer Messung pro Paneel ist hier eine Aussage bzgl. des Anstieges des Gasinnendruckes in einer dynamischen Wechselbelastung nur schwer möglich.

4.8 Große und anwendungsnahe Strukturen aus eingeschäumten Paneelen

Im Projektverlauf wurden Paneele in Winkelform hergestellt, um exemplarisch Eckverbindungen darzustellen. In Abbildung 70 sind PUR-Standard Paneele auf Stoß links und ein Silica-Pulver Paneel mit geprägter Eckfalz rechts als mögliche VIP Körper für eine Umschäumung dargestellt. In Abbildung 71 links sind die PUR-Standard Paneele auf Stoß in eingeschäumtem Zustand zu sehen. Hierzu wurde behelfsweise auf eine bei der BASF Polyurathenes vorhandene Form zurückgegriffen, um für diesen Zweck kein kostenintensives Werkzeug bauen zu müssen.



Abbildung 70: Einzuschäumte Eckstrukturen PUR-Standard Paneele auf Stoß links und Silica-Pulver Paneel mit geprägter Eckfalz



Abbildung 71: Eingeschäumte Eckstruktur links sowie ein großes anwendungsnahes Paneel rechts

Durch Versuche im Technikum der BASF in Lemförde konnte gezeigt werden, dass sich die Erfahrungen aus den Laborumschäumungen auf größere Bauteile übertragen lassen. In Abbildung 71 rechts ist ein großflächiges Seitenwandbauteil mit mehreren eingelegten PUR-Standard Paneelen (120 x 80 cm) gezeigt.

5 Brandprüfung des Schaumes

Die Bestimmung der Brandgeschwindigkeit des eingesetzten Schaumes erfolgte nach UL 94. Diese Norm sieht eine horizontale und vertikale Brandprüfung vor. Diese gibt an, welchen Weg die Flamme innerhalb einer bestimmten Zeit zurücklegt. Es wurde exemplarisch das Kernmaterial PUR-Standard nach dieser Norm geprüft. Hierzu mussten Streifen mit den Abmessungen 125 x 13 x 10 mm herausgeschnitten werden. In Abbildung 72 sind diese präparierten Streifenprobekörper eingespannt in der Brandkammer vertikal und horizontal dargestellt.

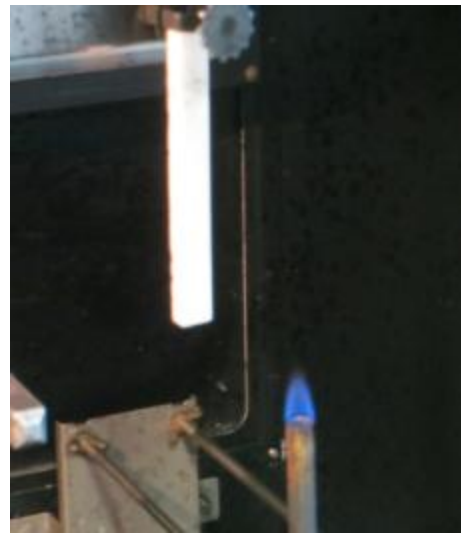
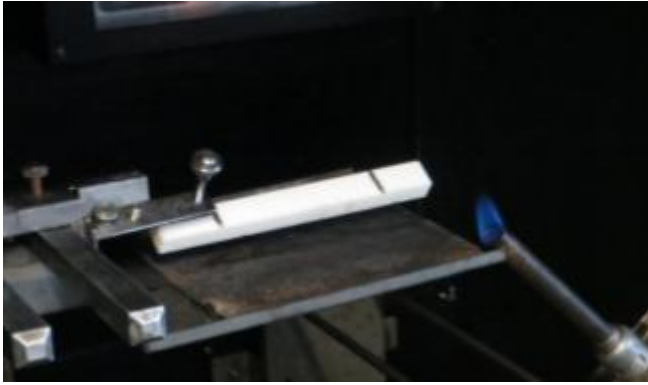


Abbildung 72: Horizontal und vertikal eingespannte Probekörper in der Brandkammer



Abbildung 73: Abbrennender Schaumproben in der Brandkammer

Eine Klassifizierung des Schaumes war nur sehr schwer möglich, da dieser sehr schnell abbrannte (Abbildung 73). Es besteht die Möglichkeit solch einen PUR-Standard Schaum mit Flammenschutzmitteln entsprechend für den Bedarf der jeweiligen Anwendung auszurüsten. Ein solch flammgeschützter Schaum wurde bei den Brandtests nicht geprüft.

6 Ökonomische und Ökologische Potentiale

6.1 Bewertung ökonomischer Aspekte in der Nutzungsphase

Neben den ökonomischen Faktoren spielen beim Betrieb eines Kühlauflegers für den Kunden durchaus auch die ökologischen Aspekte eine große Rolle. Eine integrierte Untersuchung beider Dimensionen, wie sie hier vorgenommen wurde, ist daher zur Bewertung verschiedener Dämmmaterialien ratsam.

Zunächst wurden die Kosten in der Nutzungsphase betrachtet. Diese werden durch die Anschaffungskosten des Kühlauflegers und die Kühlung im Betrieb bestimmt. Die Kosten für den Kühlaufleger setzen sich aus den in Tabelle 10 aufgeführten Grund- und Dämmkosten zusammen. Bei PU-Schaum handelt es sich um die derzeit im Betrieb standardmäßig eingesetzten PU-Dämmungen. Die angenommenen Kosten für das Dämmmaterial können in Abhängigkeit der zukünftigen Produktionsmenge durchaus variieren.

Tabelle 10: Kosten für den Kühlaufleger

Kosten in €		
Grundkosten Kühlaufleger		70.000
Kosten Dämmmaterial in € pro m ³	Silica-Pulver Paneel	500
	Nano-Foam Paneel	500
	PU-Schaum	100

Die Betriebskosten berechnen sich aus dem notwendigen Energieaufwand zur Kühlung. Dieser wurde aus den Betriebsstunden, der Nutzungsdauer, dem Gesamtwärmeübergangskoeffizienten, der Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen sowie den Energiekosten berechnet. Es werden bezüglich des Dieserverbrauchs (l/h) bei Kühlauflegern sowie Tiefkühlauflegern unterschiedliche Verbräuche angenommen. In Tabelle 11 und Tabelle 12 sind die verwendeten Daten zur Kalkulation dargestellt.

Tabelle 11: Daten zur Berechnung der ökonomischen und ökologischen Faktoren

Abmessungen	
Länge in m	12
Breite in m	2,3
Höhe in m	2,5
Volumen in m ³	69
Fläche in m ²	126,7
Randbedingungen	
Temperaturdifferenz Kühlaufleger in K	10
Temperaturdifferenz Tiefkühlaufleger in K	35
Nutzungsdauer in a	10
Betriebsstunden in h/a	3780
Heizwert von Diesel in MJ/l	35
Dieselpreis in €/l	1,428
Daten zum Auflieger	
Dieserverbrauch Kühlaufleger l/h	von 2,5 bis 6,0
Dieserverbrauch Tiefkühlaufleger l/h	von 3,5 bis 7,0
Leistung Kühlaufleger in kW	9
Leistung Tiefkühlaufleger in kW	12

Tabelle 12: Materialkennwerte

	Silica-Pulver Paneel	Nano-Foam Paneel	PU-Schaum
Wärmeleitfähigkeit in mW/mK	3,5	4,5	24,0
Halbwertsdruck in mbar	600	15	k.A.
Folieneintrag in mbar l/m ²	30	30	10
Kosten Folie in €/m ²	2	2	0
Sonstige Kosten in €/m ²	1	1	1
Kostenfaktoren	5	5	3

Mit den aufgeführten Daten konnten sowohl die entstehenden Kosten als auch die Umweltwirkungen in der Nutzungsphase berechnet werden.

Nachfolgende Abbildungen zeigen den Kostenverlauf der verschiedenen Paneelen Silica-Pulver Paneele, Nano-Foam Paneele und PU-Schaum bei variabler Dicke der Dämmschicht. Zudem wurde zwischen energieeffizienten und weniger energieeffizienten Kühl- und Tiefkühlauflegern anhand des Kraftstoffverbrauchs unterschieden.

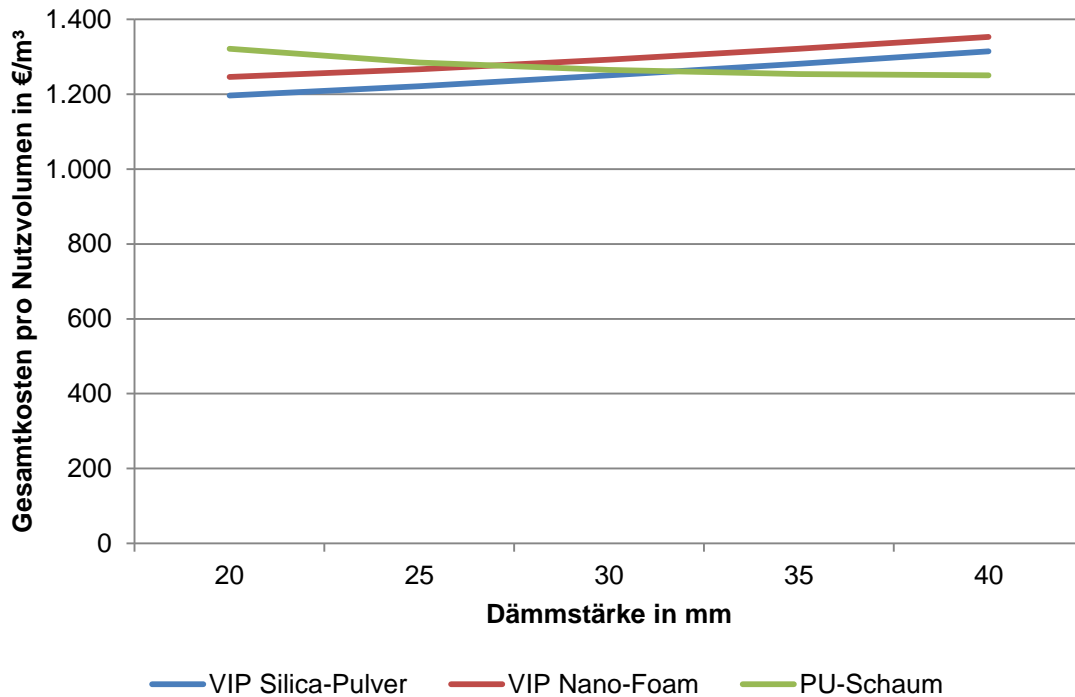


Abbildung 74: Gesamtkosten Kühlaufleger (Verbrauch: 2,5 l Diesel)

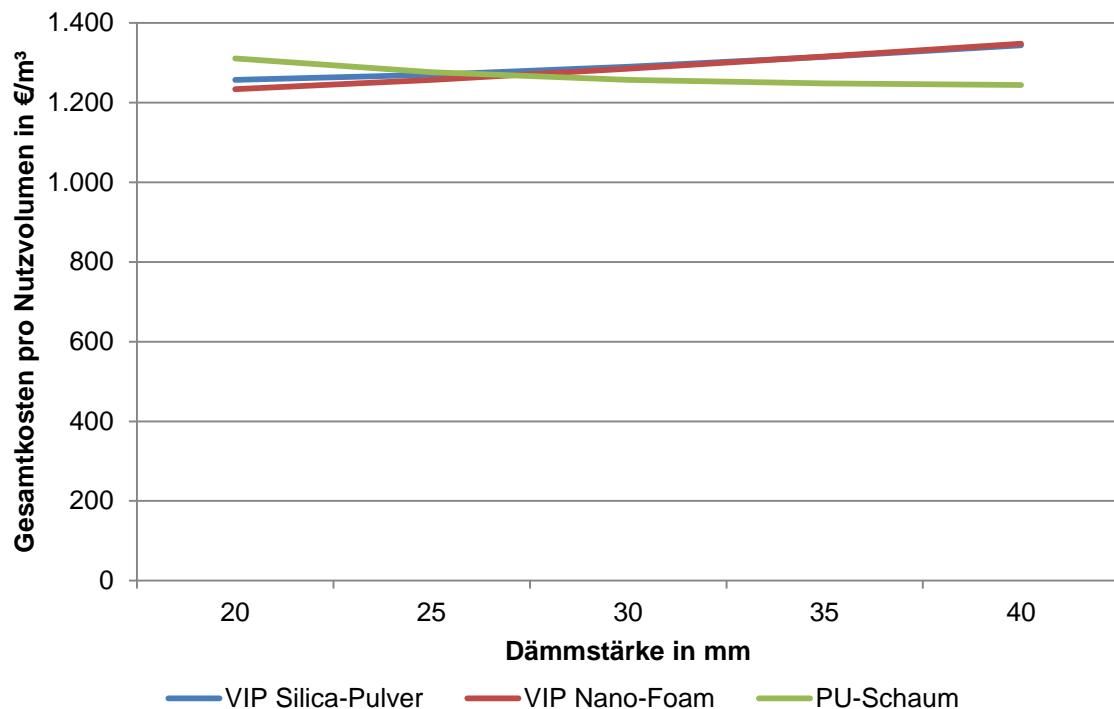


Abbildung 75: Gesamtkosten für Kühlaufleger (Verbrauch: 6 l Diesel)

Unabhängig von dem Dieserverbrauch sind die Gesamtkosten bei Kühlauflegern mit dünneren Dämmstärken für Silica-Pulver Paneele und Nano-Foam Paneele geringer als bei PU-Schaum. Ab Dämmstärken von 30 mm bei 2,5 l Dieserverbrauch bzw. 25 mm bei 6 l Dieserverbrauch stellte sich PU-Schaum als kostengünstigeres Dämmmaterial heraus.

Im Gegensatz dazu sind bei den Tiefkühlaufliegern, mit Dämmstärken zwischen 50 mm und 70 mm, die Materialien Silica-Pulver Paneele und Nano-Foam Paneele eindeutig im Vorteil. Die Differenz zu PU-Schaum beträgt zwischen ca. 20 und 800 €/m³.

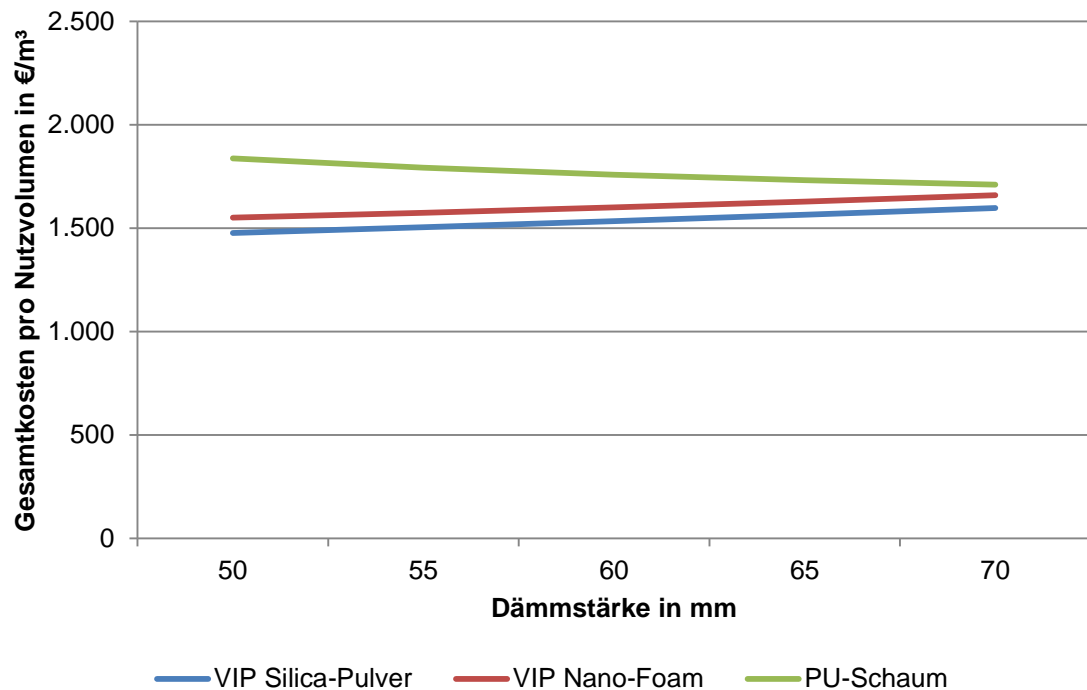


Abbildung 76: Gesamtkosten für Tiefkühlauflieger (Dieselverbrauch: 3,5 l)

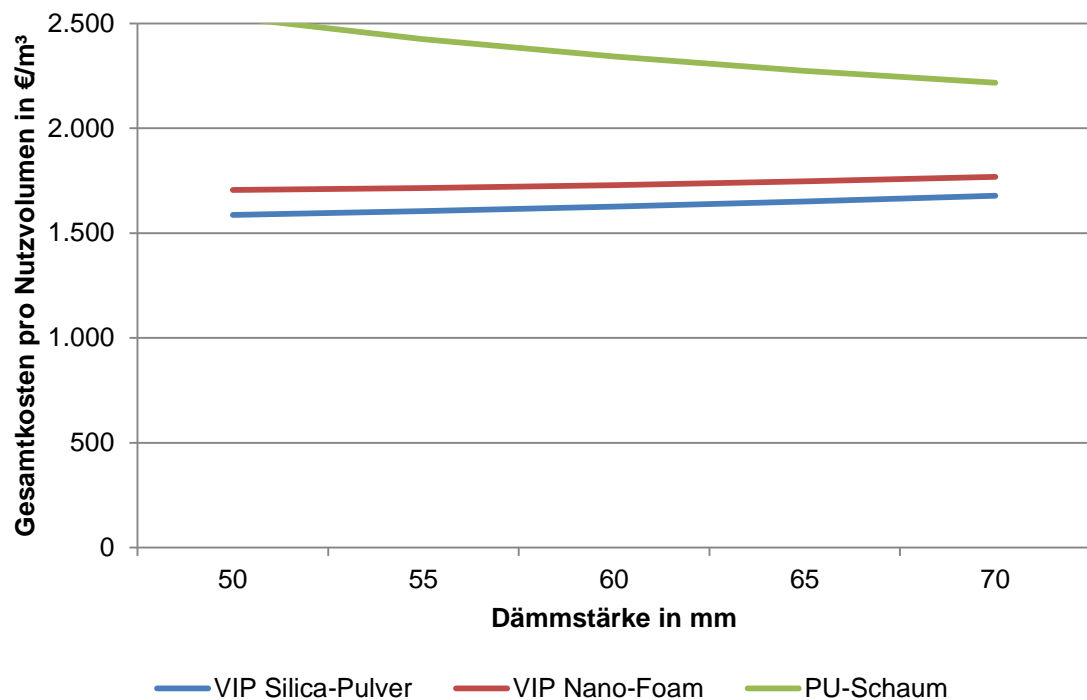


Abbildung 77: Gesamtkosten für Tiefkühlauflieger (Dieselverbrauch: 7 l)

Unabhängig von der Art des Aufliegers, kühl- oder tiefkühlgeeignet, stellt eine Dämmung mittels Silica-Pulver Paneelen in den meisten Fällen die kostengünstigste Variante dar.

Um den Einfluss einzelner Parameter beim Betrieb eines Aufliegers zu ermitteln, wurden verschiedene Parameter, wie Nutzungsdauer, Dieselpreis und Temperaturdifferenz, variiert.

Nutzungsdauer: Laut Aussagen von Branchenkennern beträgt die Nutzungsdauer bei Erstbesitzern in der Regel ca. 4 Jahre und die Auflieger werden anschließend weiterverkauft. Folglich wurden die Gesamtkosten bei einer Nutzungsdauer von 4 Jahren kalkuliert. Eine Verkürzung der Nutzungsdauer führt bei einem Kühlaufleger mit 2,5 l Dieserverbrauch und einem Tiefkühlaufleger mit 3,5 l Dieserverbrauch dazu, dass der PU-Schaum in den spezifischen Dämmstärken stets die kostengünstigere Variante darstellt. Bei höheren Energieverbräuchen mit einem Dieserverbrauch von 6 bzw. 7 l können durch den Einsatz der teureren Materialien Silica-Pulver Paneele und Nano-Foam Paneele Kosten reduziert werden.

Längere Nutzungsdauern von 15 oder 20 Jahren führen bei Silica-Pulver Paneele und Nano-Foam Paneele durch die steigende Wärmeleitfähigkeit zu einem leichten Anstieg der Gesamtkosten um maximal ca. 70 €/m³.

Temperaturdifferenz: Im Sommer können im Außenbereich durchschnittlich bis zu 30° C erreicht werden. Um dieses Szenario darzustellen, wurden die Temperaturdifferenzen für den Kühlaufleger von 10 auf 25 K und für den Tiefkühlaufleger von 35 auf 50 K erhöht. Dies führt bei beiden Aufliegern dazu, dass PU-Schaum die kostenintensivere Variante darstellt. Beim Kühlaufleger können durch Silica-Pulver Paneele und Nano-Foam Paneele Kosteneinsparungen von 20 bis 200 €/m³ erreicht werden. Beim Tiefkühlaufleger fallen diese Unterschiede mit 250 bis 500 €/m³ noch etwas höher aus.

Dieselpreis: Der Preis für Dieselkraftstoff an der Tankstelle ist stark vom Ölpreis abhängig und unterliegt somit ständigen Schwankungen. Bei einer Senkung des Dieselpreises von 1,43 €/l auf 1,20 €/l wurden keine starken Veränderungen in Bezug auf das relative Verhältnis der Gesamtkosten der einzelnen Dämmmaterialien festgestellt. Prinzipiell ist jedoch festzuhalten, dass bei niedrigem Dieselpreis der Kostenanteil für das Dämmmaterial an den Gesamtkosten zunimmt.

6.2 Bewertung ökologischer Aspekte in der Nutzungsphase

Zur Bewertung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase wurde der Betrieb mit einbezogen, nicht jedoch die Anschaffung und die Entsorgung des Kühl- bzw. Tiefkühlauflegers. Die Umweltwirkungen eines Produktes oder Prozesses wurden anhand verschiedener Kategorien beurteilt. Nachfolgend werden die Umweltwirkungen durch das Treibhauspotential dargestellt. Dieses hängt direkt mit dem Ressourcenverbrauch und somit

dem Verbrauch an Diesel zusammen. Die Abbildung 78 bis Abbildung 81 zeigen das Treibhauspotential pro Nutzvolumen für die einzelnen Aufliegervarianten.

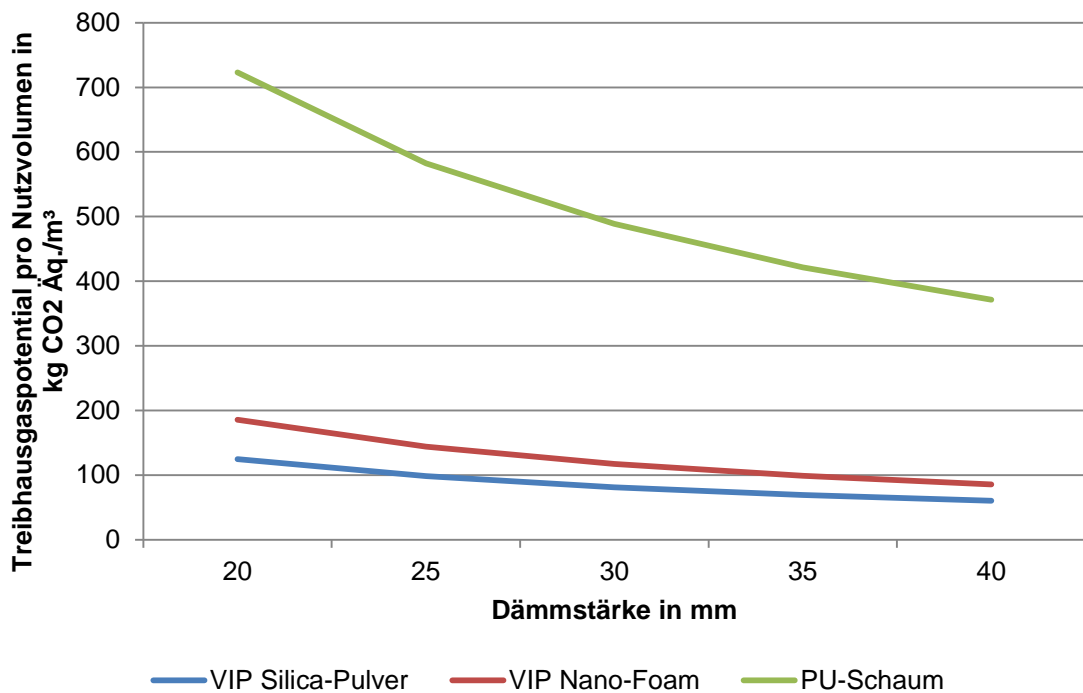


Abbildung 78: Treibhauspotential Kühlaufleger (Dieselverbrauch: 2,5 l)

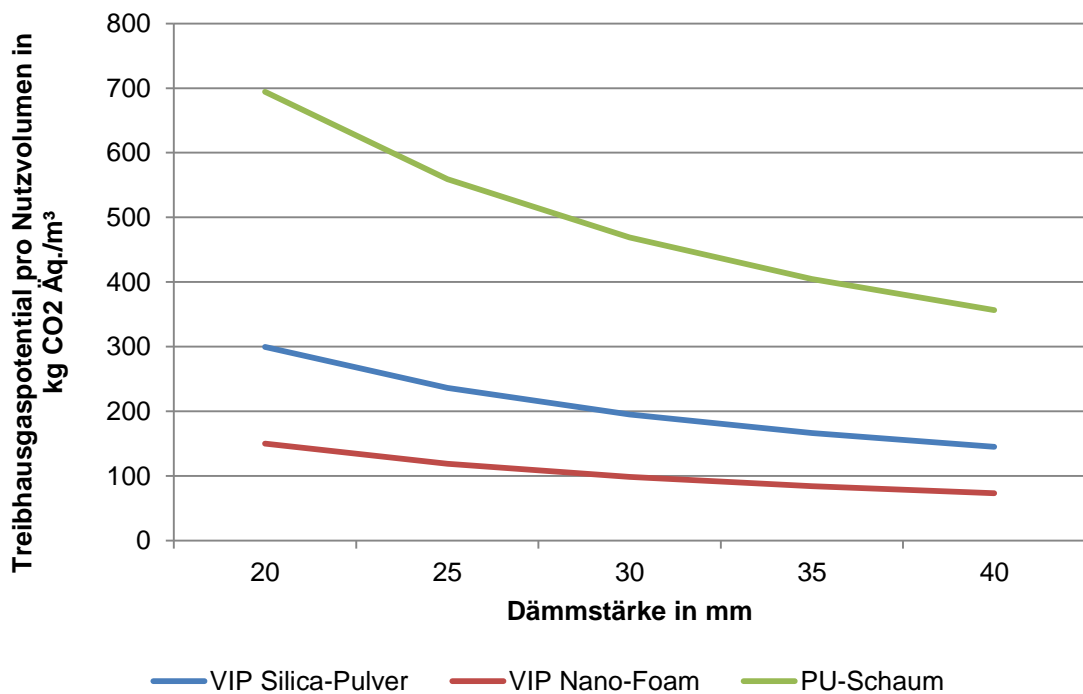


Abbildung 79: Treibhauspotential Kühlaufleger (Dieselverbrauch: 6 l)

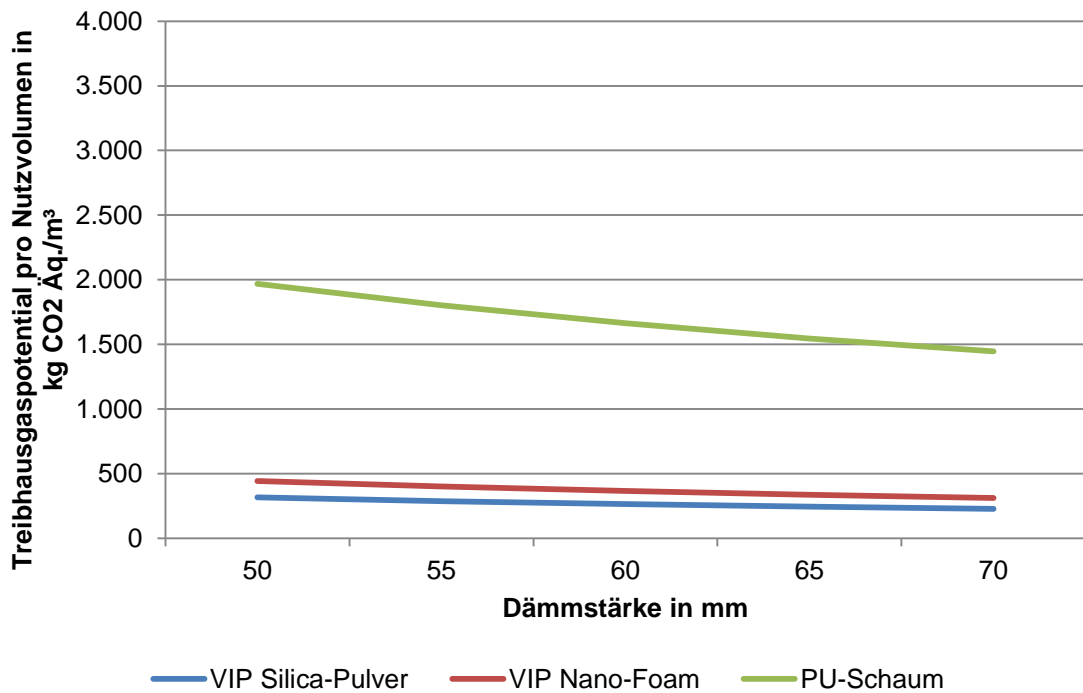


Abbildung 80: Treibhauspotential von Tiefkühlauflieger (Dieselverbrauch: 3,5 l)

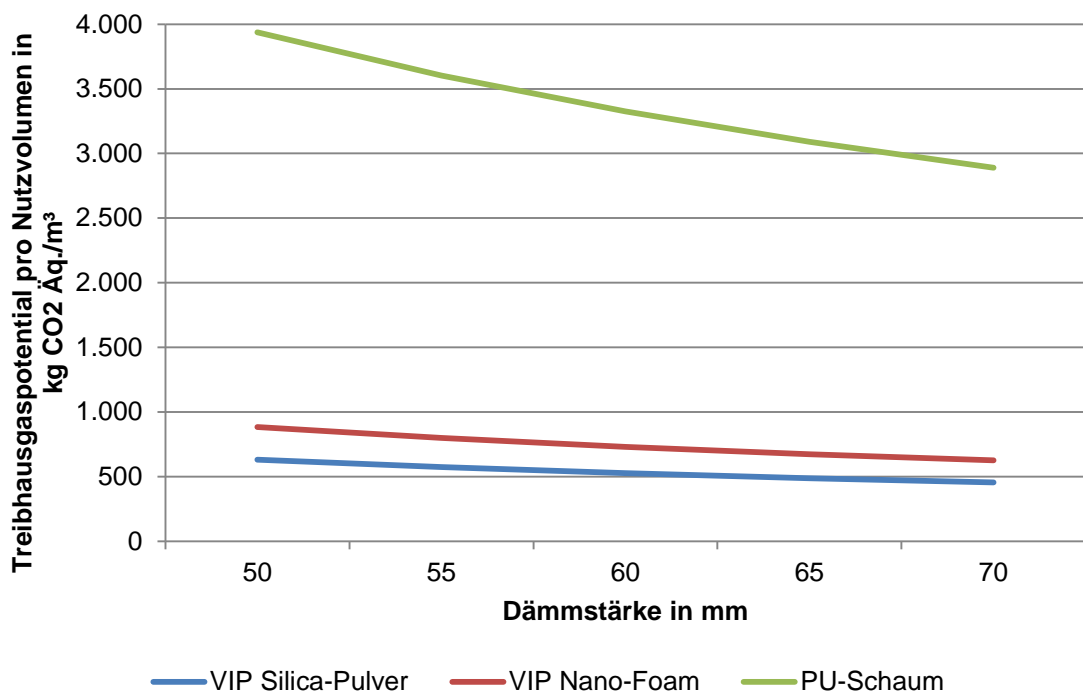


Abbildung 81: Treibhauspotential von Tiefkühlaufliegern (Dieselverbrauch: 7 l)

In allen Fällen ist das Treibhauspotential für Kühlauflieger mit PU-Schaum Dämmung durch den erhöhten Dieselverbrauch um das Zwei- bzw. Vierfache höher als bei den anderen Dämmmaterialien. Bei dem Vergleich von Tiefkühlaufliegern mit Kühlaufliegern verursachen erstere zwei- bis fünfmal so viel CO₂-Äq.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nachfrage nach Energieressourcen steigt weltweit. In diesem Spannungsfeld ist die Energieeffizienz ein Schlüssel für eine erfolgreiche Energiepolitik. Denn Energie, die nicht gebraucht wird, muss auch nicht erzeugt bzw. transportiert werden. Eine sinnvolle Lösung zur Steigerung der Energieeffizienz bieten die Vakuumisulationspaneele (VIP) durch ihre sehr hohe Isolationswirkung. Ziel war es Technologien zum Schutz der hocheffizienten Vakuumisulationspaneele für den Einsatz unter dynamischen Belastungen soweit zu entwickeln, dass die langfristige Dämmqualität dieser Paneele (insbesondere keine Verletzungen der Außenhülle) über den gesamten Nutzungszeitraum gewährleistet wird. Anfänglich wurden umfangreich die Ausgangsmaterialien der herzustellenden Paneele und der Schutzkomponenten charakterisiert.

Es wurden drei Folien verwendet, bei denen es sich um etablierte Barrierefolien sowie ein Forschungsprodukt handelte. Weiterhin wurden vier Kernmaterialien für die VIP – Fertigung genutzt: Silica-Platte, Silica-Pulver, PUR-Standard und Nano-Foam. Bei letzterem handelt es sich um ein aktuelles Entwicklungsprodukt der BASF. Das Herstellungsverfahren der Paneele wurde hinsichtlich Automatisierung (Siegelnaht) optimiert. Neben der etablierten va-Q-check Technologie kam ein berührungsloses RFID-Messsystem zur Gasinnendruckbestimmung zum Einsatz. Der Gasinnendruck ist entscheidendstes Kriterium für die Leistungsfähigkeit der VIP.

Es wurden verschiedenste thermische Analysen wie die DSC-, TG-, DMA-Messungen durchgeführt. Bei den DSC- und TG-Messungen ergaben sich keinerlei Abweichungen zu Literaturwert.

An den Hüllfolien wurden Oberflächenenergie (OFE) charakterisiert und Plasma sowie Corona zur Steigerung des Klebeverhaltens eingesetzt. Es wurden ein- und zweikomponentige auf Basis von silan- und polyurethanmodifizierten Klebstoffen eingesetzt sowie eine Handlungsempfehlung ausgesprochen. Es wurden Folie/Folie-, Folie/Metall-Verbunde (als mögliche Gehäusekomponente) untersucht. Die Klebstoffe Jowat SE 690.00 oder UHU Universal sowohl für Folie-Folie- als auch für Folie-Metall-Verbunde ohne eine Vorbehandlung eingesetzt werden.

Das Langzeitverhalten der Paneele wurde mittels einer Auslagerung im Wärmeschrank (50, 70/80 °C) und Klimakammer (PV VW 1200) simuliert. Bei den Warmlagerungsversuchen zeigten die PUR-Standard Paneele den geringsten Anstieg des Gasinnendruckes. Die Nano-Foam Paneele hingegen den größten. Bei den Klimalagerungen zeigten die Nano-Foam Paneele den geringsten Anstieg des Gasinnendruckes. Neben dem Gasinnendruck als Alterungskriterium wurden auch Wärmeleitfähigkeitsmessungen bei Raumtemperatur und

erhöhter Temperatur gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit steigt bei erhöhter Temperatur und zunehmender Auslagerungsdauer bei allen Paneelen an. Aufgrund der Prüfraumgröße wurden standardmäßig Paneele mit den Maßen DIN A5 verwendet.

Die mechanischen Kennwerte wurden mittels Kurzzeitzug- und Biegeversuch sowie Bestimmung des Stoßverhaltens untersucht. Eine wichtige Rolle spielte dabei die Lage der fertigungsbedingten Siegelnaht am Paneel. Sie sollte an die Außenkanten der Paneele gelegt werden. Der Kurzzeitzugversuch zeigte leichte Vorteile der Silica-Platte Paneele durch ihren Aufbau auf. Der technologische Biegeversuch zeigte Relaxion mit bleibender Restverformung der Paneele, die visuell noch intakt waren. Der maximale Verfahrweg der Druckfinne wurde bei der Biegeprüfung stets erreicht. Die Silica-Platte Paneele zeigten im Stoßverhalten aufgrund ihrer höheren Dichte Vorteile. Ein wichtiges Projektergebnis war es, dass es bei Paneelen mit PU-Kern (PUR-Standard und Nano-Foam) es möglich war, durch Wärmeverbehandlung einen mechanisch festen Verbund zu erzeugen. Hier wurde eine umfangreiche Optimierung der Prozessparameter durchgeführt. In einem angepassten Prüfverfahren konnte gezeigt werden, dass der Bruch nicht in der haftenden Schicht, sondern im Schaumkörper stattfindet. Zentraler Ansatz zum Schutz der Paneele war das Einschäumen dieser mit Polyurethanschaum. Hierzu wurden bei der va-Q-tec mehrere hundert Paneele auf einem Leihwerkzeug der BASF eingeschäumt. Die erhaltenen Schaumblöcke wurden am SKZ weiter untersucht. Wie bei den reinen Paneelen wurden Kurzzeitzug- und Biegeversuch sowie Bestimmung des Stoßverhaltens durchgeführt. Die eingeschäumten Paneele zeigten keinerlei Festigkeitssteigerung bei den Kurzzeitzugversuchen sowie Biegekrafterhöhung beim technologischen Biegeversuch. Analog zu den Durchstoßversuchen der reinen Paneele zeigten auch die eingeschäumten Silica-Platte Paneele höhere Durchstoßenergien. Die Entkopplung der Paneele zum umschäumenden Schaum mittels Trennmittel führte zu keiner Festigkeitssteigerung. Daher wurde dieses Konzept nicht weiterverfolgt.

Bei den eingeschäumten Paneelen wurde ebenfalls das Langzeitverhalten mittels Wärme- (70 °C) und Klimaauslagerung (PV VW 1200) simuliert. Der umschließende Schaum konnte die Paneele im Wärmeofen gegen Anstieg des Gasinnendruckes gut schützen. Es kam hier nur zu einem geringen Anstieg des Gasinnendruckes. Durch die Wasserdampfdurchlässigkeit des PU-Schaums wurden die eingeschäumten Paneele während der Klimalagerung kaum geschützt. Hier standen nur Messwerte zur Verfügung, da sich die RFID-Technik als sehr störanfällig erwies. Als weitere Schutzmechanismen wurde das Umgießen mit PU-Gießharz, Hot-Meld-Klebstoff, verkleben mit Metall und GFK untersucht. Diese Schutzmechanismen zeigten im Vergleich zum PU-Schaum bedingt schützende Wirkung. Sowohl an reinen und eingeschäumten Paneele wurden dazu dynamische Wechselversuche durchgeführt. Die PUR-Standard Paneele verzeichneten bis zu einem

Lastwechsel von 90.000 Zyklen kaum einen Anstieg des Gasinnendruckes. Bei allen anderen Paneelen stieg der Gasinnendruck bei ca. 30.000 Zyklen rasant an. Ein Anstieg des Gasinnendruckes bei den eingeschäumten Paneelen war bei ca. 60.000 Zyklen zu sehen. Vorteile zeigten hier die Silica-Platte Paneele und Nano-Foam Paneele, deren Anstieg des Gasinnendruckes deutlich geringer ausfiel. Technikumsversuche bei der BASF haben gezeigt, dass sich die Laborversuche auch auf Großversuche übertragen lassen. Außerdem kann das Brandverhalten der Schäume dabei über eine Flammenschutzmodifizierung gezielt eingestellt werden.

Bewertung von ökologischen und ökonomischen Potentialen der neuen VIP im Vergleich zu einander sowie zu den anderen Dämmungslösungen lieferte folgende Ergebnisse: Verschiedene Parameter wie z.B. Dieserverbrauch, Temperaturdifferenz und Dämmstärke zeigten einen starken Einfluss auf die Gesamtkosten des dämmenden Systems. In den meisten Fällen, vor allem bei Tiefkühlaufliegern, stellt sich der konventionelle PU-Schaum als deutlich kostenintensivere Lösung im Gegensatz zu den VIP Paneelen dar. In Bezug auf die Umweltwirkungen in der Nutzungsphase zeigte sich, dass die VIP Paneelen durch den geringeren Dieserverbrauch deutlich umweltschonender bezogen auf das Treibhauspotential sind.

Final lässt sich feststellen, dass VIP großes Potential besitzen. Die in diesem Projekt aufgezeigten Ansätze müssen noch vertieft (z.B. Auslesen des RFID-Signals) werden. Die Anwendung von VIP mit ihren zahlreichen Vorteilen und Potentialen steht in vielen (dynamischen) Bereichen noch am Anfang. Zusammenfassend lässt sich behaupten, dass die VIP überall dort eine große Zukunft haben, wo der zur Verfügung stehende Platz begrenzt oder wertvoll ist und gleichzeitig eine sehr gute Dämmleistung erforderlich ist. Es ist ein Folgeprojekt geplant, indem aufbauend auf den Forschungsergebnissen ein Kühlauflieger mit integrierten VIP zusammen mit einem Hersteller gebaut werden soll.

8 Literatur

[VAQ15] <http://www.va-q-tec.com/en/va-Q-check-95.html>

[OWE69] D. K. Owens, R. C. Wendt, Estimation of the surface free energy of polymers, Journal of Applied Polymer Science, 13 (8), 1741-1747, 1969.

[DOM12] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer, T. Hirth: Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen, 8. Auflage, Springer-Verlag, 2012.